Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2022

Zied Bouraoui, Valérie Camps, Éric Gaussier, Maxime Guériau, Christelle Launois, Nicolas Prcovic, Céline Rouveirol, Fatiha Saïs, François Schwarzentruber, Anaelle Wilczynski, et al.

▶ **To cite this version:**

Zied Bouraoui, Valérie Camps, Éric Gaussier, Maxime Guériau, Christelle Launois, et al.. Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2022 : Activité AFIA 1er août 2020 – 31 juillet 2022. Association Française d'Intelligence Artificielle, pp.1-239, 2022. hal-03777860v2

HAL Id: hal-03777860
https://hal.science/hal-03777860v2

Submitted on 15 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2022

Sections Spéciales
Zied Bouraoui
Valérie Camps
Éric Gaussier
Maxime Guériau
Christelle Launois
Nicolas Prcovic
Céline Rouveirol
Fatiha Saïs
François Schwarzentruber
Anaëlle Wilczynski

Coordination AFIA
Yves Demazeau
Thomas Guyet
Dominique Longin
Davy, Monticolo
Ahmed, Samet

Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2022

Actes CNIA 2022

Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle

Éditeurs : Président(e)s des CP de CNIA 2022

Table des matières

Mot des Présidents.
Saint-Étienne, au cœur de l'Intelligence Artificielle de demain 5

Comités.
Comités 2022 de programmation, de programme, et d'organisation 7

Partenaires.
Partenaires PFIA 2022 15

Y. Bourahla, M. Atencia, J. Euzenat (JFSMA).
Transmission de connaissances et sélection 17

J. Clech, A. Gotlieb, F. Sève, F. Didout, P. Malléa (APIA).
Méthodologie d'anonymisation dès la conception d'un jeu de données en imagerie médicale 25

M. Cooper, A. Lequen, F. Maris (JFPC).
Isomorphismes entnre instances et sous-instances de planification STRIPS 35

K. Delcourt, J.-P. Arcangeli, S. Trouilhet, F. Adreit (RJCIA).
L'Humain dans l'Apprentissage Automatique Interactif : aperçu de l'état de l'art 43

A. Delecluse, P. Schaus, P. Van Hentenryck (JFPC).
Variables de séquence pour les problèmes de tournée de véhicules 51

B. Doussin, N. Verstaevel, B. Gaudou, E. Kaddoum, F. Amblard (RJCIA).
Une simulation multi-agent basée sur l'affordance pour contraindre l'émergence 55

T. Falque, R. Wallon (JFPC).
Des encodages PB pour la résolution de problèmes CSP 63

Y. Ferguson, C. Pecoste (APIA).
L'IA au travail : propositions pour outiller la confiance 71

V. Fouillard, N. Sabouret, S. Taha, F. Boulanger (CNIA).
Le problème du décor revisité : un modèle logique pour le diagnostic d'erreurs humaines 79

J. Guéneron, G. Bonnet (JFSMA).
Un protocole de concessions monotones pour la formation distribuée de coalitions 87

V.-P. Huynh, J. Liu, Y. Chabot, F. Deuzé, T. Labbé, P. Monnin, R. Troncy (IC).
DAGOBAH : annotation sémantique de données tabulaires par comparaison du contexte des tables et d'un graphe de connaissances 95

M. Lefrançois, R. García-Castro, M. Poveda-Villalón, O. Qawasmeh (IC).
Apports des méthodologies et techniques de développement logiciel pour l'ingénierie des ontologies : retour d'expérience des contributions au développement de l'ontologie ETSI SAREF 103

C. Leturc, G. Bonnet (JIAF).
Raisonner sur l'éthique avec un cadre d'argumentation fondé sur une logique modale normale 113

J. Lieber, J.-G. Mailly, P. Marquis, H. Prade, F. Rollin (JIAF).
Quelques réflexions autour de la notion de bêtise artificielle 121

S. Maqrot, S. Roussel, G. Picard, C. Pralet (CNIA).
Techniques d'allocation de lots avec des préférences conflictuelles représentées par des graphes acycliques dirigés pondérés 131

V. Pellegrain, M. Tami, M. Batteux, C. Hudelot (APIA).
Apprentissage multimodal pour le diagnostic de fautes sur données séquentielles non alignées et arbitrairement longues 139

G. Picard (JFSMA).
Coordination de trajectoires 4D par optimisation distribuée dans la gestion du trafic aérien sans pilote 147

H. M. Rawsthorne, N. Abadie, E. Kergosien, C. Duchêne, E. Saux (IC).
ATLANTIS : une ontologie pour représenter les instructions nautiques 155

L. Simonne, N. Pernelle, F. Saïs, R. Thomopoulos (IC).
Découverte de règles causales dans les graphes de connaissances à l'aide de plongements dans les graphes 163

M. Zaninotti, C. Lesire, Y. Watanabe, C. P. C. Chanel (JFPDA).
Learning Path Constraints for UAV Autonomous Navigation under Uncertain GNSS Availability 171

Saint-Étienne, au cœur de l'Intelligence Artificielle de demain

Maxime Lefrançois
Maître-Assistant, Ecole des Mines de Saint-Étienne
Président du Comité d'Organisation de la Plate-Forme IA 2022

Thomas Guyet, **Yves Demazeau**, **Davy Monticolo**, **Ahmed Samet**
CR INRIA Lyon, DR CNRS, Professeur Université de Lorraine, Maître de Conférence INSA Strasbourg,
Co-Présidents du Comité de Programmation de la Plate-Forme IA 2022

L'AFIA et l'École des Mines de Saint-Etienne s'associent pour organiser du 27 juin au 01 juillet 2022 la quinzième Plate-Forme Intelligence Artificielle (2022). Les précédentes éditions se sont tenues à Palaiseau (1999), Grenoble (2001), Laval (2003), Nice (2005), Grenoble (2007), Hammamet (2009), Chambéry (2011), Lille (2013), Rennes (2015), Caen (2017), Nancy (2018), Toulouse (2019), Angers (2020) et Bordeaux (2021).

La plate-forme IA constitue un point de rencontre unique pour la communauté IA permettant de rapprocher les différentes disciplines qui la composent et d'établir des passerelles entre elles. A cette intention, la plate-forme IA s'adresse à l'ensemble de la communauté francophone en IA pour aborder des problématiques communes.

Pour son édition 2022, la Plate-Forme IA héberge les douze conférences et journées suivantes...

APIA	8e Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'IA
CNIA	25e Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle
EIAH et IA	4e Journée EIAH et IA, en partenariat avec ATIEF
IC	33es Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances
JFPC	17es Journées Francophones de Programmation par Contraintes
JFPDA	17es Journées Francophone Planification, Décision et Apprentissage
JFSMA	30es Journées Francophones sur les Système Multi-Agents
JIAF	16es Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale
IoT et IA	2e Journée Internet des Objets et IA, en partenariat avec IMT
Résilience et IA	1re Journée Résilience et IA, en partenariat avec IMT
RJCIA	20es Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle
Santé et IA	6e Journée Informatique Médicale et IA, en partenariat avec AIM

... ainsi que dix tutoriels sur les thèmes : agents : comportements et protocoles de communications, apprentissage conforme, éthique de l'IA, campagnes expérimentales avec l'outil Metrics, fonctions de croyance et apprentissage automatique, modélisation et résolution de problèmes sous contraintes, motifs graduels, planification cognitive, systèmes de recommandation : filtrage collaboratif et bandits manchots, théorie TRIZ pour la conception inventive.

Huit collègues ont également été invités pour des conférences en début de chaque demi-journée :

Leila Amgoud	CNRS Toulouse	France
Chris Bizer	Universität Mannheim	Allemagne
Cédric Colas	Lauréat du Prix de Thèse IA 2022	France
Franck Gechter	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard	France
Hector Geffner	Universitat Pompeu Fabra	Espagne
Tias Guns	Katholieke Universiteit Leuven	Belgique
Jean-François Puget	NVIDIA Nice	France
Franco Zambonelli	Università di Modena e Reggio Emilia	Italie

Les inscriptions à PFIA 2022 sont à réaliser sur le site : https://ci.mines-stetienne.fr/pfia2022/infos-locales/inscriptions/.

Nous remercions les présidents et membres de comités de programme des conférences et journées hébergées, les orateurs, les membres des comités de programmation et d'organisation, nos partenaires institutionnels et industriels, ainsi que tous les participants, pour leurs contributions précieuses à la réussite de cette plateforme.

L'ensemble des informations sur ces événements est disponible à partir du site de la Plate-Forme IA 2022 (https://ci.mines-stetienne.fr/pfia2022/) dont le contenu sera maintenu jusqu'à l'été 2026.

©AFIA2022

Comité de programmation

Conseil d'Administration de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle

Président

— Thomas GUYET, LOCADAM, IRISA

Membres

— Davy Monticolo, Université de Lorraine, ERPI ;
— Ahmed Samet, INSA Strasbourg, ICube.

Comités de programme

Conférence nationale sur les Applications Pratiques de l'IA (APIA)

Présidentes

— Christelle Launois (Société Générale) ;
— Céline Rouveirol (Université Sorbonne Paris Nord).

Membres

— Florence Amardeilh (Elzeard) ;
— Ghislain Atemezing (Mondeca) ;
— Alain Berger (Ardans) ;
— Sandra Bringay (LIRMM) ;
— Yves Demazeau (LIG) ;
— Valentina Dragos (Onera) ;
— Fraçoise Fogelman Soulie (Hub France IA) ;
— Céline Hudelot (Ecole Centrale Paris) ;
— Arnaud Lallouet (Huawei) ;
— Christine Largouët (IRISA) ;
— Dominique Lenne (Université de Technologie de Compiègne) ;
— Philippe Leray (Université de Nantes) ;
— Domitile Lourdeaux (Université de Technologie de Compiègne) ;
— Sylvain Mahé (EDF Recherche et Développement) ;
— Juliette Mattioli (Thales) ;
— Youssed Miloudi (Berger Levrault) ;
— Marie Christine Rousset (Université Grenoble Alpes) ;
— Brigitte Trousse (INRIA).

Conférence Nationale en Intelligence Artificielle (CNIA)

Président

— Éric Gaussier, Université Grenoble Alpes.

Membres

— Isabelle Bloch, Sorbonne Université ;
— Olivier Boissier, École des Mines de Saint-Étienne ;
— Grégory Bonnet, Université de Caen Normandie ;
— Elise Bonzon, Université Paris Cité ;
— Robert Bossy, INRAE Centre de Jouy en Josas, MaIAGE ;
— Sylvie Coste-Marquis, Université d'Artois ;
— Benjamin Dalmas, École des Mines de Saint-Étienne ;
— Yves Demazeau, CNRS ;
— Arnaud Doniec, IMT Lille Douai ;
— Jean-Gabriel Ganascia, Sorbonne Université ;
— Gregor Goessler, Inria ;
— Salima Hassas, Université Lyon Claude Bernard ;
— Nathalie Hernandez, Université Toulouse Jean Jaurès ;
— Nicolas Lachiche, Université de Strasbourg ;
— Florence Le Ber, École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg ;

©AFIA2022

— Marie-Jeanne Lesot, Sorbonne Université ;
— Engelbert Mephu Nguifo, Université Clermont Auvergne ;
— Fabrice Muhlenbach, Université de Saint-Étienne ;
— Marie-Christine Rousset, Université Grenoble Alpes ;
— Catherine Roussey, INRAE Centre de Clermont, TSCF ;
— Olivier Simonin, INSA de Lyon ;
— Catherine Tessier, ONERA ;
— Laurent Vercouter, INSA Rouen Normandie ;
— Bruno Zanuttini, Université de Caen Normandie.

Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC)

Président

— Fatiha Saïs - Université Paris Saclay/LISN

Membres

— Marie-Hélène Abel - Université de technologie de Compiègne ;
— Xavier Aimé - Cogsonomy ;
— Yamine Ait-Ameur - INPT/IRIT ;
— Nathalie Aussenac-Gilles - CNRS/IRIT ;
— Bruno Bachimont - University de technologie de Compiègne ;
— Nacera Bennacer - CentraleSupélec ;
— Nathalie Bricon-Souf - Université Toulouse 3/IRIT ;
— Sandra Bringay - LIRMM, Université Paul Valéry ;
— Patrice Buche - INRAE ;
— Davide Buscaldi - École Polytechnique ;
— Sylvie Calabretto - INSA de Lyon ;
— Jérôme David - INRIA, Université Grenoble Alpes ;
— Pierre-Antoine Champin - ERCIM ;
— Jean Charlet - Assistance Publique hôpitaux de Paris ;
— Victor Charpenay - MINES Saint-Étienne ;
— Olivier Corby - Université Côte d'Azur ;
— Sylvie Despres - Université Sorbonne Paris Nord/LIMICS ;
— Gilles Falquet - University of Geneva, Switzerland ;
— Catherine Faron - Université Côte d'Azur ;
— Béatrice Fuchs - Université Lyon 3 ;
— Frederic Furst - Université de Picardie ;
— Alban Gaignard - CNRS ;
— Jean-Gabriel Ganascia - LIP6 ;
— Ollivier Haemmerlé - Université Toulouse 2/IRIT ;
— Mounira Harzallah - Université de Nantes ;
— Nathalie Hernandez - Université Toulouse 2/IRIT ;
— Liliana Ibanescu - Agro Paris Tech ;
— Sébastien Iksal - Le Mans Université ;
— Antoine Isaac - Europeana ;
— Clement Jonquet - INRAE ;
— Mouna Kamel - Université de Perpignan Via Domitia/IRIT ;
— Gilles Kassel - Université de Picardie Jules Verne ;
— Pascale Kuntz - Université de Nantes ;
— Michel Leclère - LIRMM ;
— Marie Lefèvre - Université Lyon 1 ;
— Dominique Lenne - Université de technologie de Compiègne ;
— Cedric Lopez - emvista ;
— Pascal Molli - Université de Nantes ;
— Isabelle Mougenot - Université de Montpellier ;
— Fleur Mougin - Université de Bordeaux ;
— Jérôme Nobécourt - Université Sorbonne Paris Nord/LIPN ;
— Nathalie Pernelle - Université Sorbonne Paris Nord/LIPN ;
— Yannick Prié - Université de Nantes ;

— Cedric Pruski - LIST, Luxembourg ;
— Sylvie Ranwez - IMT Mines Ales ;
— Catherine Roussey - INRAE ;
— Pascal Salembier - UTT ;
— Karim Sehaba - CNRS/LIRIS ;
— Danai Symeonidou - INRAE ;
— Rallou Thomopoulos - INRAE ;
— Cassia Trojahn - Université Toulouse 2/IRIT ;
— Raphael Troncy - Eurecom ;
— Haïfa Zargayouna - Université Sorbonne Paris Nord.

Journées Francophones de Programmation par Contraintes (JFPC)

Président

— Nicolas Prcovic, LIS, Université d'Aix-Marseille.

Membres

— Quentin Cappart, Ecole Polytechnique de Montréal ;
— Clément Carbonnel, CNRS ;
— Mohamed Sami Cherif, Aix-Marseille Université, LIS ;
— Thi-Bich-Hanh Dao, Université d'Orléans ;
— Sophie Demassey, CMA, MINES ParisTech ;
— Guillaume Derval, Université Catholique de Louvain ;
— Jean-Guillaume Fages, COSLING S.A.S. ;
— Xavier Gillard, Université Catholique de Louvain ;
— Jin-Kao Hao, Université d'Angers ;
— Arnaud Lallouet, Huawei Technologies Ltd ;
— Olivier Lhomme, IBM France ;
— Chu-Min Li, Université de Picardie Jules Verne ;
— Giovanni Lo Bianco, Université de Toronto ;
— Pierre Montalbano, ANITI/INRAE ;
— Margaux Nattaf, Grenoble INP - G-SCOP ;
— Samba Ndojh Ndiaye, Liris ;
— Bertrand Neveu, Ecole des ponts ;
— Abdelkader Ouali, GREYC, Université de Caen Normandie ;
— Marie Pelleau, Université Côte d'Azur, I3S ;
— Guillaume Perez, Université Côte d'Azur, I3S ;
— Eric Piette, DKE ;
— Charles Prud'Homme, IMT Atlantique, LS2N ;
— Mathieu Py, LIS, Aix-Marseille Université ;
— Julien Vion, LAMIH, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis ;
— Romain Wallon, CRIL, Université d'Artois ;
— Ghiles Ziat, LIP6.

Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage pour la conduite de systèmes (JFPDA)

Président

— François Schwarzentruber (ENS Rennes, IRISA).

Membres

— Pegah Alizadeh (University of Caen Normandy) ;
— Aurélie Beynier (LIP6, Sorbonne Université) ;
— Olivier Buffet (INRIA / LORIA) ;
— Martin Cooper (Université Toulouse 3, IRIT) ;
— Alain Dutech (Loria - Inria) ;
— Humbert Fiorino (LIG) ;
— Jérôme Lang (CNRS, LAMSADE, Université Paris-Dauphine) ;
— Frédéric Maris (Université Toulouse 3, IRIT) ;
— Laetitia Matignon (LIRIS CNRS) ;

— Damien Pellier (Laboratoire d'Informatique de Grenoble) ;
— Sophie Pinchinat (Université de Rennes 1, IRISA, Rennes) ;
— Philippe Preux (Université de Lille) ;
— Emmanuel Rachelson (ISAE-SUPAERO) ;
— Régis Sabbadin (INRAE) ;
— Francois Schwarzentruber (École normale supérieure de Rennes, IRISA, Rennes) ;
— Olivier Sigaud (ISIR, UPMC) ;
— Vincent Thomas (LORIA) ;
— Bruno Zanuttini (GREYC, Normandie Univ. ; UNICAEN, CNRS, ENSICAEN) ;
— Paul Weng (UM-SJTU Joint Institute).

Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)

Présidente

— Valérie Camps (IRIT, Université Paul Sabatier, France).

Comité consultatif

— Jean-Paul Jamont (LCIS, Université Grenoble Alpes, France) ;
— Fabien Michel (LIRMM, Université de Montpellier, France) ;
— Gauthier Picard (DTIS - SYD, ONERA, France) ;
— Nicolas Sabouret (LIMSI, Université Paris Sud, France) ;
— Olivier Simonin (CITI lab, INSA Lyon, France).

Membres

— Carole Adam (LIG, CNRS, Université Grenoble Alpes, France) ;
— Emmanuel Adam (LAMIH, Université Polytechnique Hauts-De-France, France) ;
— Flavien Balbo (Limos, École des Mines de Saint-Etienne, France) ;
— Aurélie Beynier (LIP6, Université Pierre et Marie Curie, France) ;
— Olivier Boissier (Limos, École des Mines de Saint-Etienne, France) ;
— Grégory Bonnet (GREYC, Université Caen Normandie, France) ;
— Jonathan Bonnet (Continental CSV, Toulouse) ;
— Florent Carlier (CREN, Le Mans Université, France) ;
— Anne-Cécile Caron (CRISTAL, Université de Lille, France) ;
— François Charpillet (LORIA, INRIA, Nancy, France) ;
— Vincent Chevrier (LORIA, Université de Lorraine, France) ;
— Caroline Chopinaud (Hub France IA, France) ;
— Rémy Courdier (LIM, Université de la Réunion, France) ;
— Yves Demazeau (LIG, CNRS, Université Grenoble Alpes, France) ;
— Julie Dugdale (LIG, Université de Grenoble Alpes, France) ;
— Stéphane Galland (CIAD, Université de Technologie Belfort-Montbéliard, France) ;
— Sylvain Giroux (DOMUS, Université de Sherbrooke, Canada) ;
— Emmanuelle Grislin (LAMIH, INSA, Université Polytechnique Hauts-De-France, France) ;
— Zahia Guessoum (LIP6 & CReSTIC, Université de Reims, France) ;
— Salima Hassas (LIRIS, Université de Lyon, France) ;
— Cédric Herpson (LIP6, Université Pierre et Marie Curie, France) ;
— Guillaume Hutzler (IBISC, Université Évry Val d'Essonne, France) ;
— Elsy Kaddoum (IRIT, Université Toulouse Jean Jaurès, France) ;
— Jean-Daniel Kant (LIP6, Université Pierre et Marie Curie, France) ;
— Christophe Lang (FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, France) ;
— Domitile Lourdeaux (UTC, Université de Technologie de Compiègne) ;
— René Mandiau (LAMIH, Université Polytechnique Hauts-De-France, France) ;
— Nicolas Marilleau (UMMISCO, IRD, France) ;
— Philippe Mathieu (CRISTAL, Université de Lille, France) ;
— Bruno Mermet (GREYC, Université Caen Normandie, France) ;
— Frédéric Migeon (IRIT, Université Paul Sabatier de Toulouse, France) ;
— Maxime Morge (CRISTAL, Université de Lille, France) ;
— Gildas Morvan (LG2IA, Université d'Artois, France) ;
— Jean-Pierre Müller (SENS, CIRAD, Université de Montpellier, France) ;
— Antoine Nongaillard (CRISTAL, Université de Lille, France) ;
— Michel Occello (LCIS, Université Grenoble Alpes, France) ;

— Wassila Ouerdane (MICS, École Centrale Supélec, France) ;
— Alexandre Pauchet (LITIS, INSA Rouen Normandie, France) ;
— Sébastien Picault (INRAE, UMR BIOEPAR, France) ;
— Suzanne Pinson (LAMSADE, Université Paris Dauphine, France) ;
— Éric Platon (CosmosX, Japon) ;
— Clément Raievsky (LCIS, Université Grenoble Alpes, France) ;
— Lilia Rejeb (SMART Lab, Institut Supérieur de Gestion, Tunisie) ;
— Valérie Renault (CREN, Le Mans Université, France) ;
— Julien Saunier (LITIS, INSA Rouen Normandie, France) ;
— Cristina Stoica Maniu (L2S, École Centrale Supélec, France) ;
— Patrick Tailliandier (COGIT, IGN, France) ;
— Paul Théron (Thalès TCS, France) ;
— Laurent Vercouter (LITIS, INSA Rouen Normandie, France) ;
— Mahdi Zargayouna (IFSTTAR Université Marne-la-Vallée, France).

Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale (JIAF)

Président

— Zied Bouraoui (CRIL, Univ Artois & CNRS) ;
— Anaëlle Wilczynski (MICS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay).

Membres

— Khaled Belahcène (Heudiasyc, Université de Technologie de Compiègne) ;
— Francesco Belardinelli (IBISC, Université d'Évry) ;
— Nawal Benabbou (LIP6, Sorbonne Université) ;
— Elise Bonzon (LIPADE, Université Paris Descartes) ;
— Tristan Cazenave (LAMSADE, Université Paris Dauphine) ;
— Nadia Creignou (LIS, Aix-Marseille Université) ;
— Tiago de Lima (CRIL, Univ Artois & CNRS) ;
— Sylvie Doutre (IRIT, Université Toulouse 1 Capitole) ;
— Jérôme Euzenat (LIG, INRIA) ;
— Hugo Gilbert (LAMSADE, Université Paris-Dauphine) ;
— George Katsirelos (MIAT, INRA) ;
— Sébastien Konieczny (CRIL, CNRS) ;
— Marie-Laure Mugnier (LIRMM, Université de Montpellier) ;
— Jean Lieber (LORIA, INRIA) ;
— Pierre Marquis (CRIL, IUF, Univ Artois & CNRS) ;
— Meltem Öztürk (LAMSADE, Université Paris Dauphine) ;
— Odile Papini (LIS, Aix-Marseille Université) ;
— Célia da Costa Pereira (I3S, Université Nice Sophia Antipolis) ;
— Laurent Perrussel (IRIT, Université Toulouse 1 Capitole) ;
— Sophie Pinchinat (IRISA, INRIA) ;
— Stéphanie Roussel (ONERA) ;
— Julien Rossit (LIPADE, Université Paris Decartes) ;
— Serena Villata (I3S, CNRS) ;
— Bruno Zanuttini (GREYC, UNICAEN).

Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA)

Président

— Maxime Guériau (LITIS, INSA Rouen Normandie, France).

Membres

— Arthur Aubret (LITIS, Université Claude Bernard Lyon 1, France) ;
— Zied Bouraoui (CRIL-CNRS, Université d'Artois, France) ;
— Mathieu Chollet (LS2N, IMT Atlantique, France) ;
— Baudouin Dafflon (DISP, Université Claude Bernard Lyon 1, France) ;
— Maxime Devanne (IRIMAS, Université Haute-Alsace, France) ;
— Madeleine El-Zaher (LINEACT, CESI, France) ;
— Maxime Folschette (CRIStAL, Centrale Lille, France) ;

— Abir Beatrice Karami (FGES, Université Catholique de Lille, France) ;
— Pierre-Antoine Laharotte (LICIT, Université Gustave Eiffel, France) ;
— Alexandre Lombard (CIAD, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France) ;
— Guillaume Lozenguez (Center Digital Systems, IMT Lille Douai, France) ;
— Jean-Guy Mailly (LIPADE, Université de Paris, France) ;
— Mohamed-Lamine Messai (ERIC, Université Lumière Lyon 2, France) ;
— Arianna Novaro (Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, France) ;
— Charlotte Pelletier (IRISA, Université Bretagne Sud, France) ;
— Nicolas Verstaevel (IRIT, Université Toulouse 1 Capitole, France).

Comité d'organisation

Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT

Président

— Maxime LEFRANÇOIS, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS.

Gestion administrative

— Marie-Line BARNEOUD, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT ;
— Florent BREUIL, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne ;
— Magali ROUSSET, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT.

Membres

— Olivier BOISSIER, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS ;
— Philippe BEAUNE, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS ;
— Flavien BALBO, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS ;
— Victor CHARPENAY, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS ;
— Benjamin DALMAS, Centre Ingénierie et Santé, Mines Saint-Etienne, IMT ;
— Alaa DAOUD, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS ;
— Mihaela JUGANARU-MATHIEU, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS ;
— Christopher LETURC, Inria Sophia Antipolis - Méditerranée ;
— Yousouf TAGHZOUTI, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS ;
— Antoine ZIMMERMANN, Institut Henri Fayol, Mines Saint-Etienne, IMT, LIMOS.

Les partenaires de PFIA 2022

©AFIA2022

Transmission de connaissances et sélection

Y. Bourahla[1], M. Atencia[2,1], J. Euzenat[1]

[1] Univ. Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP, LIG, F-38000 Grenoble, France
[2] Universidad de Málaga, 29071 Málaga, Spain

{Yasser.Bourahla,Jerome.Euzenat}@inria.fr,atencia@lcc.uma.es

Résumé

Les agents peuvent être utilisés pour simuler l'évolution culturelle et l'évolution culturelle peut être utilisée comme modèle pour les agents artificiels. Des expériences ont montré que la transmission intragénérationnelle des connaissances permet aux agents d'en améliorer la qualité. De plus, sa transmission intergénérationnelle permet de dépasser ce niveau. Ces résultats ont été obtenus dans des conditions particulières : sélection drastique des agents transmetant leurs connaissances, initialisation avec des connaissances correctes ou introduction de bruit lors de la transmission. Afin d'étudier l'impact de ces mesures sur la qualité de la connaissance transmise, nous combinons les paramètres de deux expériences précédentes et relâchons ces conditions. Ce dispositif confirme que la transmission verticale permet d'améliorer la qualité de la connaissance obtenue par transmission horizontale même sans sélection drastique et apprentissage orienté. Il montre également qu'une transmission intragénérationnelle suffisante peut compenser l'absence de sélection parentale.

Mots-clés

Simulation sociale multi-agents, Évolution culturelle, Transmission des connaissances, Génération d'agents, Évolution culturelle des connaissances

Abstract

Agents have been used for simulating cultural evolution and cultural evolution can be used as a model for artificial agents. Previous results have shown that intra-generation knowledge transmission allows agents to improve the quality of their knowledge. Moreover, variation generated through inter-generation transmission allows agents to exceed that level. Such results were obtained under specific conditions such as the drastic selection of agents allowed to transmit their knowledge, seeding the process with correct knowledge or introducing artificial noise during transmission. Here, we question the necessity of such measures and study their impact on the quality of transmitted knowledge. For that purpose, we combine the settings of two previous experiments and relax these conditions. We confirm through this setting that vertical transmission improves on horizontal transmission even without drastic selection and oriented learning. In addition, sufficient intra-generation transmission can compensate for the absence of parent selection.

Keywords

Multi-agent social simulation, Cultural evolution, Knowledge transmission, Agent generation, Cultural knowledge evolution

1 Introduction

L'évolution culturelle [10, 17] applique les concepts de l'évolution biologique à la culture d'une société. Ceci a été exploré expérimentalement à l'aide de systèmes multi-agents faisant évoluer le comportement d'une population d'agents [11, 5], leur langage [19] leurs connaissances [12] ou leur culture. L'évolution culturelle repose sur la sélection de variations transmissibles. Différents modes de transmission culturelle, inspirés de l'épidémiologie, ont été identifiés [10, 8] : *transmission verticale* des parents aux enfants, *transmission oblique* des agents de la génération précédente (comme l'éducation) à ceux de la génération suivante et *transmission horizontale* entre les agents de la même génération. Ici, nous utiliserons également le terme *transmission intergénérationnelle* pour les deux premières et le terme *transmission intragénérationnelle* pour la dernière.

Dans les systèmes multi-agents où les agents s'adaptent suite à leurs interactions [19], ceci peut être considéré comme une transmission intragénérationnelle. Cette approche s'est avérée efficace pour développer une culture partagée. Récemment, nous avons étudié les agents qui adaptent leurs connaissances sur l'environnement, exprimées sous forme d'ontologies, par le biais d'interactions sociales afin de parvenir à un accord. Nous avons constaté qu'ils amélioraient la précision de leurs ontologies sans nécessairement adopter la même ontologie [6]. Ainsi, la transmission horizontale est capable d'améliorer les connaissances dans une société d'agents.

La transmission verticale, d'une génération à une autre, peut être considérée comme l'occasion de rebattre les cartes. Elle peut introduire plus de variation ou imposer (sélectionner) une culture dominante. Il convient donc de déterminer les rôles respectifs de la transmission intergénérationnelle et intragénérationnelle.

D'autres travaux ont considéré exactement ceci et ont montré que la transmission intergénérationnelle permet aux agents d'améliorer leur connaissance au-delà de ce que la transmission intragénérationnelle seule permet [11]. En revanche, en désactivant la transmission intergénérationnelle,

©AFIA2022

les agents doivent recommencer à améliorer leurs connaissances à chaque génération. Dans un cadre similaire, il a également été constaté que la transmission intragénérationnelle engendre de la variation et que la transmission intergénérationnelle procède à la sélection [1].
Cependant, ces travaux reposent sur de fortes contraintes pour assurer la transmission fidèle de connaissances correctes (en utilisant uniquement la partie de la population la plus performante comme enseignants ou en initialisant les ontologies des agents à partir d'échantillons corrects) ou pour générer de la variation (en ajoutant du bruit dans le processus d'apprentissage).
Ici, nous relâchons ces contraintes pour étudier les effets de la transmission horizontale et verticale de la culture sans sélectionner les agents les plus performants et sans commencer avec des informations correctes. Pour ce faire, l'opportunité de se reproduire et de propager ses connaissances est élargie à l'ensemble de la société d'agents et les connaissances sont initialisées aléatoirement. Cela est susceptible de fournir suffisament de variation au système.
Pour tester cela, nous avons conçu un nouveau cadre expérimental basé sur ces travaux précédents, en faisant varier les modalités de transmission et les stratégies d'appariement. La transmission intergénérationnelle s'appuie sur l'enseignement comme [1] et la transmission intragénérationnelle sur l'interaction comme [6]. Nous confirmons les résultats des études précédentes sous des hypothèses relâchées : la transmission intergénérationnelle augmente la correction des connaissances obtenues par la transmission intragénérationnelle. De plus, nous montrons que même si la transmission intergénérationnelle ne sélectionne pas les parents les plus aptes, la transmission intragénérationnelle, avec suffisamment de temps, peut compenser cela, c'est-à-dire que les agents se mettent finalement d'accord pour sélectionner les éléments de connaissance pertinents.
Le reste de l'article est organisé comme suit : dans la section 2, on présente les travaux connexes. La section 3 aborde les limites des systèmes actuels et propose des solutions pour les surmonter. Leur mise en œuvre effective est précisément détaillée dans la Section 4. La section 5 présente les expériences réalisées et la section 6 fournit leurs résultats qui sont discutés dans la section 7.
Cet article est une version abrégée en français de [7].

2 Travaux connexes

Nous présentons d'abord les travaux relatifs aux agents et à l'évolution culturelle en général avant de considérer plus précisément deux expériences sur lesquelles ce travail est basé.

2.1 Agents et évolution culturelle

Les interactions entre agents peuvent servir de moyen d'adaptation. De nombreuses approches multi-agents les exploitent, par exemple, pour améliorer l'interopérabilité [20, 4] ou observer les comportements émergents [15]. Dans certains cas, en interagissant les uns avec les autres, les agents finissent par partager et faire évoluer une culture particulière, par exemple des connaissances sur l'environnement, des façons d'interagir, des normes ou des conventions [18, 13]. Ce phénomène est généralement étudié en observant une population d'agents qui interagissent entre eux selon un protocole bien défini. L'état du système est suivi jusqu'à ce que les agents atteignent un état stable dans lequel leur culture ne change plus. Les caractéristiques de cette culture sont alors évaluées [19].
Ici, nous nous intéressons à l'évolution des connaissances que les agents utilisent pour se comporter. L'évolution culturelle a été appliquée aux connaissances sous la forme d'alignements d'ontologies [12, 2]. Elle a également été appliquée aux ontologies [6] dans lesquelles les agents adaptent leurs définitions de concepts pour prendre des décisions communes. Dans ce contexte, les agents apprennent des autres en interagissant avec eux.
Lorsque les agents parviennent à un état stable, ils atteignent un optimum local en ce qui concerne la qualité de leurs connaissances. Pour sortir de cet état, il faut modifier l'environnement ou les agents.
L'évolution de différentes générations d'agents a été envisagée dans les systèmes multi-agents évolutionnaires [9] dans lesquels les agents peuvent se reproduire et mourir. Cela n'a pas été particulièrement étudié sous l'angle de la culture développée par ces agents. Les algorithmes culturels [16] appliquent principalement l'évolution culturelle à des problèmes d'optimisation.
Il a été montré que la transmission de culture permet de découvrir des comportements inaccessibles à l'évolution génétique [14]. La simulation multi-agents de l'évolution culturelle impliquant la transmission intragénérationnelle et intergénérationnelle a été étudiée dans une série d'expériences [11, 5, 1, 3]. En se basant sur les réseaux de neurones pour incarner les connaissances, ils mettent en œuvre la communication de poids de connexion [5], l'apprentissage supervisé (imitation) [11, 1] ou l'instruction directe [3] comme mécanisme de transmission verticale. En utilisant le même mécanisme d'imitation pour la transmission horizontale [1], il a été montré que la transmission de la culture intragénérationnelle fournissait la variation qui permettait au processus évolutif d'être plus efficace que ce qu'il est avec la transmission intergénérationnelle uniquement. Ce travail est cependant basé sur une sélection drastique des enseignants auprès desquels les agents apprennent, tant en transmission oblique qu'horizontale.
Nous discutons plus longuement ci-dessous les travaux développés dans [1] et [6] sur lesquels nous nous appuyons.

2.2 Héritage culturel intergénérationnel

Acerbi et Parisi [1] ont conçu une expérience dans laquelle des agents utilisent leurs réseaux de neurones pour naviguer dans un environnement. Lorsqu'un agent s'approche d'une source de nourriture comestible, il reçoit une récompense et lorsqu'il s'approche d'une source de nourriture toxique, il reçoit une pénalité. À la naissance, les agents commencent avec des réseaux de neurones pondérés aléatoirement (W). Dans la première partie de leur vie, les agents apprennent leur comportement par des enseignants de la génération précédente : transmission oblique. Ensuite, ils l'apprennent

de ceux de leur génération qui ont le mieux réussi : transmission horizontale. Un point clé est que, dans les deux cas, ils ne sont enseignés que par les 5% meilleurs agents en termes de récompense accumulée. Les enseignants peuvent ajouter du bruit dans leur comportement afin d'engendrer de la variation.

Les résultats montrent que la transmission oblique seule permet aux agents de s'améliorer (mesuré par les récompenses accumulées) au fil des générations, alors que la transmission horizontale ne le fait pas, car les agents apprennent d'agents novices. Ils montrent également que l'introduction de bruit est essentielle pour accélérer l'amélioration, et que la transmission horizontale peut le fournir.

Dans ces expériences, la sélection des 5% agents les plus performants dans les deux modes de transmission (20% pour [11]) est un biais très fort car il donne peu d'opportunité à la population générale de se reproduire. Cela ne se produit pas dans les sociétés humaines.

2.3 Apprentissage social intragénérationnel

Nous avons conçu une expérience dans laquelle des agents vivent dans un environnement peuplé d'objets, identifiés par leurs caractéristiques, pour lesquels ils doivent prendre des décisions [6]. Le but des agents est de se mettre d'accord avec les autres agents sur la décision à prendre. Ils suivent un protocole d'expérimentation en deux étapes (Figure 1, à droite). Premièrement, les agents apprennent à prendre des décisions sur les objets de leur environnement à partir d'un échantillon (S). Le résultat de cette étape est, en particulier, une ontologie simple (O) permettant de classer les objets et de déterminer la décision à prendre. Ensuite, les agents interagissent répétitivement entre eux deux-à-deux. Ils comparent les décisions qu'ils prendraient concernant les objets. Les interactions réussissent lorsque les agents sont d'accord sur la décision à prendre ; elles échouent dans le cas contraire. En cas d'échec, l'un des agents adapte son ontologie afin d'adopter la décision de l'autre sur cet objet.

Les expériences ont montré que les agents sont capables d'atteindre un état dans lequel ils sont toujours d'accord. La qualité de leurs ontologies, mesurée par sa correction [1], augmente en moyenne, mais pas dans tous les cas, et n'atteint pas nécessairement une correction totale. Enfin, bien que la distance entre les ontologies des agents diminue, ils n'adoptent pas nécessairement avec les mêmes ontologies.

Le critère de réussite des agents est de se mettre d'accord, mais pas nécessairement de prendre la bonne décision. La décision correcte à prendre est inconnue par les agents. Elle n'est considérée que dans deux occasions : (1) initialement, les agents sont formés avec un échantillon correct, mais incomplet ; (2) le choix de l'agent qui adaptera ses connaissances est basé sur les récompenses qu'il a reçues sur un échantillon (différent). Bien que (2) soit légitime, (1) ne l'est pas. Par conséquent, nous le relâchons en utilisant des échantillons étiquetés par des parents ne connaissant pas la décision correcte.

1. Ici, nous traduisons le terme *accuracy* [6] par correction. Il s'agit d'un degré de correction.

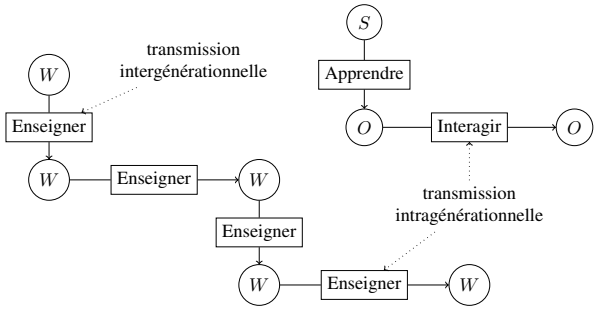


FIGURE 1 – Cadres expérimentaux de [1] (en bas à gauche) et de [6] (en haut à droite). (W=poids des réseaux de neurones, S=échantillon d'entraînement, O=ontologie). Malgré les similarités structurelles, les mécanismes de transmission des connaissances sont différents : Apprendre et Enseigner sont des apprentissages supervisés, mais la transmission intragénérationnelle (Interagir et Enseigner) est différente.

3 Vers une approche intégrée de la transmission des connaissances

Nous discutons d'abord les limites des expériences présentées précédemment. Nous proposons ensuite de les combiner d'une manière qui tienne compte de ces limites. Cela permet de formuler nos questions sous forme d'hypothèses.

3.1 Limites

Les deux expériences décrites dans les dernières sous-sections ont le mérite de fournir un modèle de transmission culturelle pour les agents et de montrer qu'elle a un effet positif sur leur rendement. Cependant, elles le font avec des modalités qui semblent fortes et peu naturelles :

- restreindre le rôle des enseignants à une partie très limitée de la population (5%, 20%) va à l'encontre de l'idée d'une culture qui se propage ;
- commencer par des échantillons corrects ne correspond pas à ce qui se passe dans la vie réelle.

Ces deux modalités tendent à imposer la transmission fidèle d'une culture correcte, alors que les avantages de la transmission verticale sont censés provenir de la variation qu'elle procure. C'est au point que [1] introduit un bruit artificiel dans le modèle afin d'augmenter la variation.

Nous conjecturons qu'une transmission des connaissances moins restreinte, à la fois entre les générations et au sein d'une même génération, fournit suffisamment de variation pour améliorer la transmission horizontale.

3.2 Combinaison des deux expériences

Pour tester notre conjecture, nous combinons les deux approches de la Figure 1 et relâchons les contraintes imposées. Le cadre résultant, illustré par la Figure 2, est composé de :

transmission intragénérationnelle mise en œuvre par interaction, comme dans [6] ;

transmission intergénérationnelle mise en œuvre par

©AFIA2022

l'apprentissage, comme dans [1]. Une génération d'agents est remplacée par une autre ; les agents se reproduisent de manière différentielle par rapport à une distribution de probabilité et transmettent leurs connaissances à leurs enfants. Cependant, ils le font avec les modalités de [6].

3.3 Relaxation des contraintes élitistes

Deux mesures sont prises pour relâcher les deux modalités discutées. D'une part, la possibilité pour les agents d'avoir des enfants sera déterminée soit de manière équiprobable, soit par rapport au revenu des agents (dénotant leur succès). D'autre part, l'ontologie initiale pourra être vide, aléatoire, être une fusion des ontologies des parents ou être apprise comme dans la première étape ci-dessus, à partir d'échantillons fournis par les parents (Figure 2). Ainsi, l'échantillon à partir duquel les enfants apprennent peut être incorrect (parce que les parents n'ont pas une connaissance totalement correcte) et incomplet (parce qu'il ne couvre pas tout l'espace objet).
Enfin, aucun bruit artificiel n'est ajouté au comportement des agents. Comme mentionné ci-dessus, le recrutement "égalitaire" des parents et l'inexactitude des échantillons fournis par les parents sont déjà des sources de variation lors de la transmission verticale.

3.4 Hypothèses

Notre objectif est d'étudier principalement deux directions. Premièrement, une fois que les agents ont atteint un accord global, ils n'adaptent plus leurs connaissances. Comme le montre [6], ils peuvent encore s'accorder sur des décisions incorrectes. La transmission intergénérationnelle devrait introduire une variation supplémentaire permettant aux agents de découvrir de nouveaux éléments de connaissance pertinents. En conséquence, comme dans [11, 1], nous faisons l'hypothèse que (H_1) *la transmission verticale permet aux connaissances des nouvelles générations d'être plus correctes que celles de la génération précédente*.
Deuxièmement, selon [6], les agents sont capables d'améliorer l'exactitude de leurs décisions lorsqu'ils adaptent leurs connaissances pour se mettre d'accord. Ceci suggère que la transmission de connaissances intragénérationnelle est capable de sélectionner les éléments de connaissances à préserver. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que (H_2), *l'interaction, utilisée pour la transmission intragénérationnelle, peut compenser l'absence de sélection des parents*.

4 Cadre expérimental

Afin de tester les deux hypothèses proposées, nous avons conçu un cadre expérimental suivant les principes ci-dessus avec des mécanismes pour que les agents s'apparient, se reproduisent, meurent, et transmettent leurs connaissances à leurs enfants. Nous décrivons ci-dessous le processus général (Section 4.1) et détaillons ce qui diffère des expériences originales :

— Le cycle de vie des agents (Section 4.2),
— Comment les agents sont sélectionnés pour se reproduire (Section 4.3),

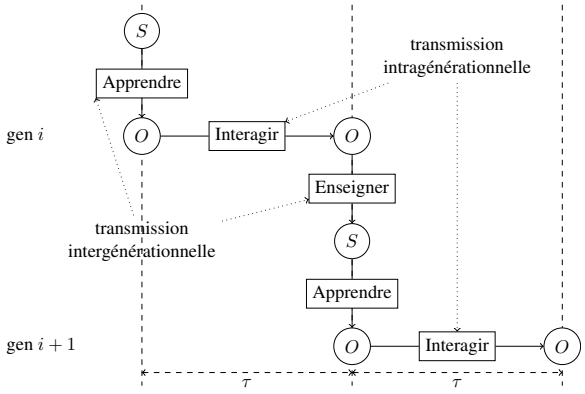


FIGURE 2 – Combinaison des mécanismes de la figure 1 : la transmission horizontale est réalisée par l'interaction des agents (pendant une période τ) ; la transmission verticale (tous les τ) utilise des échantillons (S) engendrés par les parents à partir desquels les enfants apprendront leurs ontologies (O).

— Comment les agents transmettent leurs connaissances à leurs enfants (Section 4.4).

Plusieurs questions peuvent être soulevées sur la façon dont ces modifications affectent les connaissances des agents. Ici, nous nous concentrons sur l'impact de la transmission des connaissances sur leur correction.

4.1 Processus global

Nous réutilisons les mêmes environnements et ontologies, procédure d'apprentissage d'ontologie et procédure d'apprentissage social de [6]. Le jeu se déroule avec des objets caractérisés par 4 caractéristiques sur lesquelles une seule décision est valable parmi 6 possibles.
Les expériences sont constituées de périodes divisées en deux parties (Figure 3) :

reproduction dans laquelle la génération $i-1$ (la moitié de la population) est supprimée (meurt) et la génération i engendre la génération $i+1$ qui est ajoutée (naît) et acquiert ses connaissances initiales ;

interaction dans laquelle les agents utilisent leurs ontologies pour se mettre d'accord sur les décisions concernant les objets et les modifier en cas de désaccord.

Ce processus est illustré dans la figure 2 et décrit précisément ci-dessous.

4.2 Cycle de vie des agents

Un agent naît au début d'une période et meurt à la fin de la période suivante (il vit pendant 2 périodes). Dans la première période, l'agent est considéré comme un enfant. Dans la seconde période, il est considéré comme un adulte. Entre ces deux périodes, les agents peuvent se reproduire selon les modalités précisées dans la section 4.3.
Au cours de la première période de leur vie, les agents (enfants) apprennent de leurs parents par le biais d'une transmission de connaissances intergénérationnelle détaillée

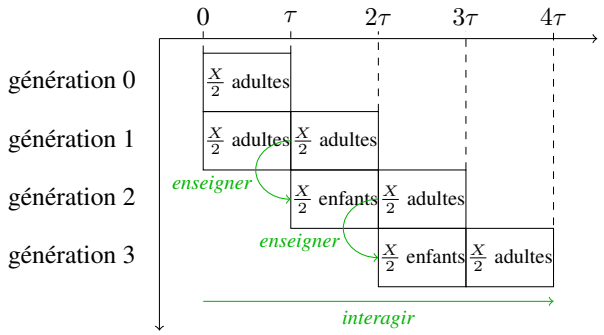


FIGURE 3 – Évolution d'une société au cours de 3 générations d'agents.

dans la section 4.4. Durant la deuxième période de leur vie, certains agents deviennent parents et transmettent leurs connaissances à leurs enfants. Ils continuent à interagir avec les autres individus de la société et peuvent adapter leurs connaissances.

À la fin de chaque période, $\frac{X}{2}$ agents de l'ancienne génération meurent et $\frac{X}{2}$ agents naissent. Pour maintenir constant le nombre d'agents dans la population, la population initiale est composée de X agents. La moitié de cette population, considérée comme la génération 0, meurt à la fin de la première période et ne se reproduit pas. La figure 3 montre l'évolution d'une société sur 3 générations.

4.3 Stratégies d'appariement

Pour se reproduire, les agents (adultes) se comportent selon la règle suivante : $v = 2$ parents sélectionnés aléatoirement suivant une distribution s auront $c = 1$ enfant. La distribution de probabilité de se reproduire s peut être :

- Maximale (100%) pour les v agents ayant rassemblé le plus de revenus et minimale (0%) pour les autres agents ($best$),
- Proportionnel au revenu perçu en effectuant leurs tâches ($income$),
- Équiprobable ($random$).

La stratégie maximale est introduite pour simuler la sélection forte [1].

4.4 Transmission des connaissances

La transmission passe par deux étapes (Figure 3).

Transmission verticale initiale Dans la première étape, chaque agent de la nouvelle génération acquiert des connaissances directement de ses v parents. Ici, nous expérimentons deux types d'ontologies initialement acquises : des ontologies aléatoires (abusivement notées $r = 0$) ou des ontologies apprises des parents en réutilisant la technique de [6]. Plus précisément, $r\%$ de tous les objets ayant des propriétés distinctes (types d'objets) sont sélectionnés aléatoirement. Chaque parent étiquette la moitié de ces objets avec les décisions qu'il prendrait (qui peuvent être incorrectes). Cet ensemble est présenté à l'enfant comme un échantillon d'apprentissage (S) à partir duquel il apprend son ontologie.

Interactions Une fois cette transmission initiale effectuée, les agents interagissent entre eux en suivant le protocole de [6]. Les interactions sont restreintes de telle sorte que les agents sont initialement biaisés vers plus d'interactions avec leurs parents : à sa i^{ime} itération, chaque agent a une probabilité P_i d'interagir avec un de ses parents choisi aléatoirement. La probabilité de restreindre l'interaction de l'agent dépend de i et du taux de réduction de l'interaction restreinte $\epsilon < 1$:

$$P_i = \max(0, 1 - i \times \epsilon)$$

Ainsi, le biais est maximal à la première interaction et diminue au fur et à mesure que les interactions augmentent. Cela imite les agents qui élargissent progressivement leurs cercles sociaux. Ci-après, nous utilisons $\epsilon = .01$.

5 Expériences

Nous réalisons deux expériences pour tester chacune des hypothèses introduites dans la section 3.4. Elles utilisent le même mode opératoire, seules quelques variables indépendantes diffèrent. Le tableau 1 résume les valeurs des paramètres considérés dans ces plans d'expérience. Les valeurs de τ se terminent par 1 afin de calculer les mesures à l'itération $\tau - 1$, c'est-à-dire avant que la population ne soit remplacée. Chaque combinaison de valeurs de paramètres est exécutée 10 fois. Pour chaque expérience, nous mesurons la correction (*accuracy*) de l'ontologie comme dans [6]. La taille de la population et le nombre d'itérations sont fixés à 40 et 200000 respectivement.

5.1 Expérience 1 : Effet de la transmission intergénérationnelle sur la correction des ontologies

La première expérience, vise à évaluer les effets de l'introduction de générations d'agents. Ainsi, nous nous concentrons sur les variables affectant la transmission verticale des connaissances : la proportion d'instances couvertes par l'échantillon d'entraînement et la durée de vie de la population.

En conséquence, nous faisons varier le pourcentage de transmission r qui correspond au degré de complétude et d'imperfection du transfert intergénérationnel. Lorsque le pourcentage de transmission est de 0, les agents commencent avec des ontologies aléatoires. Nous faisons également varier la longueur de la période τ qui correspond à la demi-vie des agents. Lorsque la période est plus longue que le nombre d'itérations ($\tau > n$), l'expérience se déroule en une génération (pas de transmission intergénérationnelle).

L'hypothèse H_1 peut donc être reformulée comme suit : *L'ajout de la transmission intergénérationnelle entraîne une plus grande correction que la transmission intragénérationnelle seule.*

5.2 Expérience 2 : Interaction entre la sélection et la durée d'interaction

Dans cette deuxième expérience, nous testons les politiques moins sélectives. Plus précisément, nous cherchons à savoir si la transmission intragénérationnelle, un mécanisme

©AFIA2022

Signification	Variable	Expérience 1	Expérience 2
Durée de la période	τ	$5001, 10001, 20001, 200001$	$5001, 10001, 20001$
Pourcentage de transmission	r	$0 = random, 20, 40, 60, 80, 100$	40
Sélection des parents	s	$random$	$income, random, best$
Transmission horizontale	ht	oui	oui, non

TABLE 1 – Variables indépendantes et valeurs expérimentales.

typique de l'évolution culturelle, peut compenser la réduction ou l'absence de sélection des parents.
Cette expérience se concentre sur (1) la manière dont les parents sont sélectionnés pour la reproduction, et (2) la durée de vie d'une génération, car les agents ont besoin de temps pour se mettre d'accord sur les décisions à adopter. Ainsi, la politique de sélection des parents s prend les valeurs $random$, $income$ et $best$ et la durée de la période τ varie comme dans la première expérience. Nous réalisons également l'expérience avec des agents qui n'adaptent pas leurs connaissances après l'interaction ($ht = non$), écartant complètement la transmission horizontale.
L'hypothèse H_2 peut donc être testée comme suit : *Avec une transmission intragénérationnelle suffisante, la correction obtenue avec ou sans sélection est similaire.*

6 Résultats

Les résultats des deux expériences sont présentés ci-après.

6.1 La transmission entre générations améliore la correction des ontologies

Pour tester l'hypothèse H_1, nous comparons la correction (*accuracy*) finale moyenne des expériences avec une seule génération ($\tau = 200001$) aux expériences avec plusieurs générations (de différentes durées de période). La figure 4 montre cette évolution. En effectuant un test ANOVA (analyse de la variance) et un test post-hoc tuckey-hsd, la correction à la fin de l'expérience lorsque la transmission intergénérationnelle se produit à des périodes de longueur 10001 et 20001 est significativement plus élevée que lorsqu'elle ne se produit pas ($p \ll 0,01$). Ainsi, l'hypothèse H_1 est acceptée lorsque la période est suffisamment longue ($\tau \geq 10001$). **La transmission intergénérationnelle nécessite de longues périodes d'interaction.** On peut observer, dans les premières itérations de la figure 4, que chaque génération améliore sa correction par rapport à la précédente. En particulier, la correction obtenue à 2τ est strictement supérieure à la correction à τ. Cela confirme que la connaissance des agents avec une transmission verticale est plus correcte qu'avec la transmission horizontale seule. Cependant, lorsque la période d'interaction n'est pas assez longue, les agents n'ont pas le temps de diffuser largement les connaissances pertinentes. La transmission verticale souffre alors de la faible correction des connaissances transmises et la courte période ne permet que de s'en remettre. Ceci explique pourquoi, lorsque la longueur de la période est de 5001, la correction ne s'améliore pas.
Pourcentage de transmission et durée de la période interagissent. La figure 5 compare la correction des agents

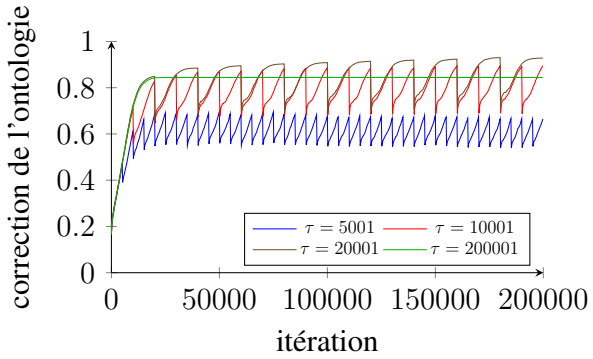


FIGURE 4 – Correction moyenne (sur r) par longueur de période (τ).

avec ($r \neq 0$) et sans ($r = 0$) transmission verticale initiale, sous différentes durées de période ($\tau = 5001$ et $\tau = 20001$). Lorsque la période est courte ($\tau = 5001$), un pourcentage de transmission plus élevé ($r = .8$) donne de meilleurs résultats qu'un pourcentage de transmission faible. Au contraire, avec une période longue ($\tau = 20001$), les meilleurs résultats sont obtenus sans transmission verticale initiale ($r = 0$), ceux avec transmission verticale initiale étant très proches les uns des autres.
Ceci s'explique par la capacité de la transmission intragénérationnelle à diffuser des connaissances plus correctes à l'ensemble de la population. Ces connaissances ont une chance d'être transmises même avec un faible r et même en l'absence de transmission verticale initiale ($r = 0$) car elles peuvent être transmises par interaction. Dans ce cas, un faible r fournit la variation permettant d'augmenter encore la correction. Au contraire, si la transmission intragénérationnelle est insuffisante (τ court), une transmission initiale plus fidèle ($r \geq 0.8$) est nécessaire pour préserver la correction. Ceci montre le délicat équilibre à trouver entre r et τ pour assurer l'amélioration des connaissances.

6.2 La transmission intragénérationnelle peut compenser l'absence de sélection

Pour tester l'Hypothèse H_2, nous montrons d'abord que la sélection des parents sans transmission intragénérationnelle améliore effectivement la correction des connaissances. Ensuite, nous montrons que cet effet n'existe pas avec la transmission intragénérationnelle. Le tableau 2 résume ces résultats. Les résultats présentés ci-dessous sont ceux avec $\tau = 20001$, les mêmes résultats sont obtenus avec 5001 et 10001 (20001 étant le cas le moins favorable).
La sélection est efficace. La figure 6 montre en pointillés

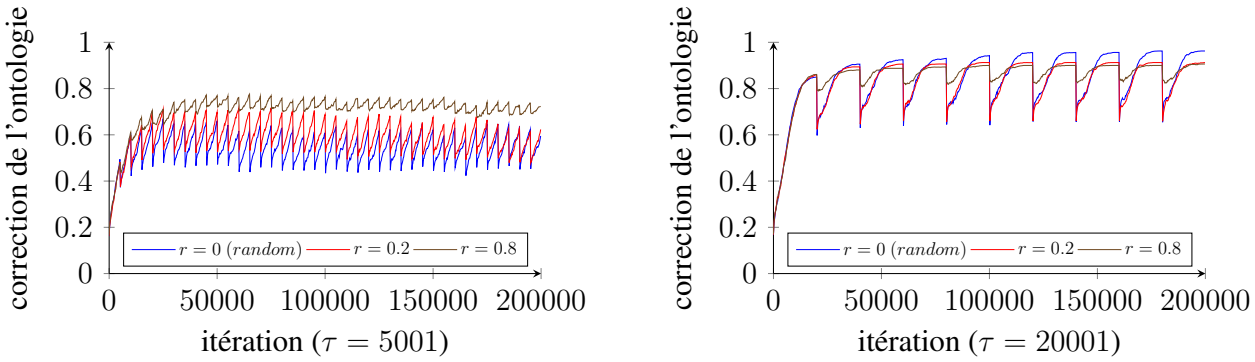


FIGURE 5 – Correction moyenne avec (rouge et marron) ou sans (bleu) transmission verticale initiale.

$ht \setminus s$	$random$	$income$	$best$
no	aucun	moyen	moyen
yes	élevé	élevé	élevé

TABLE 2 – Amélioration de la correction en fonction de la sélection (s) et de la transmission horizontale (ht). En l'absence de transmission horizontale ($ht = non$), la sélection maximale et la sélection basée sur le revenu améliorent la correction finale ; avec la transmission horizontale ($ht = oui$), toutes les stratégies fournissent une amélioration plus élevée.

$ht \setminus s$	$income$	$best$
non	$-0.115(35)$	$-0.165(35)$
oui	$-0.01(4)$	$0.005(35)$

TABLE 3 – Intervalles de confiance à 95% de la différence moyenne entre la sélection équiprobable et les autres méthodes de sélection avec ($ht = oui$) et sans ($ht = non$) transmission intragénérationnelle.

l'évolution de la correction avec uniquement la transmission intergénérationnelle comparant les politiques de sélection maximale ($best$), basée sur le revenu ($income$) et équiprobable ($random$). En l'absence de transmission intragénérationnelle, le fait d'avoir des parents aléatoires n'améliore pas la correction au fil des périodes, bien que la sélection des parents l'améliore. Le test ANOVA sur la correction finale des trois méthodes de sélection donne une différence significative ($p \ll 0,01$).

La transmission intragénérationnelle compense l'absence de sélection. La figure 6 montre que l'évolution de la correction lorsqu'il y a une transmission intragénérationnelle (lignes continues), est significativement plus élevée que lorsqu'elle n'est pas présente (lignes pointillées). De plus, contrairement à la transmission intergénérationnelle, lorsque la transmission intragénérationnelle est présente, la façon dont les parents sont sélectionnés a peu d'impact sur la correction finale. En présence de transmission intragénérationnelle ($ht = oui$), ANOVA ne retourne pas de différence significative entre les trois méthodes de sélection des parents ($p = 0.34$). Dans ce cas, la table 3 montre que la différence entre l'absence de sélection ($random$) et les politiques de sélection maximale et basée sur le revenu est proche de 0, bien qu'elle soit significativement plus importante sans transmission intragénérationnelle. Ainsi, nous acceptons l'hypothèse H_2 : la transmission intragénérationnelle compense l'absence de sélection.

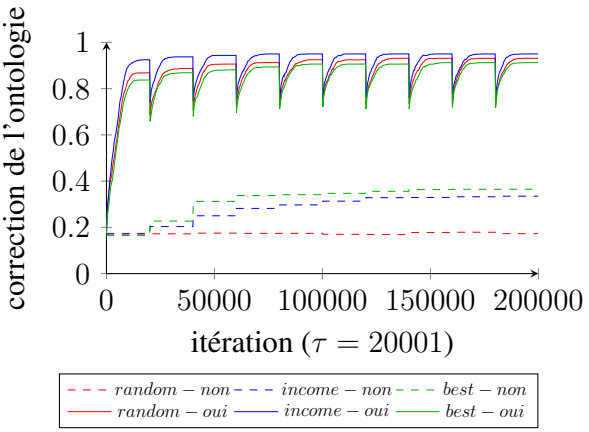


FIGURE 6 – Correction moyenne par mode de sélection avec (ligne continue) et sans (ligne discontinue) transmission horizontale.

7 Discussion

Ces résultats peuvent être lus comme une confirmation, en utilisant un cadre expérimental différent et des contraintes plus souples, des résultats de [1] sur l'efficacité de la transmission verticale pour améliorer la connaissance des agents. Ils peuvent également être considérés comme une réfutation de l'idée qu'une forte sélection des parents soit un facteur important pour observer de tels effets. En effet, plus une culture est partagée dans une population, moins la sélection est nécessaire. Les résultats obtenus montrent que la diffusion de connaissances de qualité nécessite du temps. Si les agents ont une durée de vie courte et qu'il n'y

©AFIA2022

a pas de sélection, alors les connaissances ne s'amélioreront pas car les plus correctes auront peu de chance d'être transmises à la génération suivante. Mais s'ils ont suffisamment de temps pour diffuser des connaissances de qualité, alors celles-ci s'amélioreront au fil des générations sans sélection des parents.
Contrairement aux gènes, même si les parents ne fournissent pas les meilleurs atouts culturels, les enfants sont capables de les acquérir auprès de leurs pairs ou d'autres sources. [1] a montré que (1) la transmission intragénérationnelle peut introduire une variation dans la culture et (2) sa sélection se produit dans la transmission intergénérationnelle. À l'inverse, nous avons montré comment (1) la transmission intergénérationnelle peut introduire des variations, qui permettent aux agents d'améliorer encore leur correction (section 6.1), et (2) la transmission intragénérationnelle peut sélectionner les connaissances qui se répandent dans la population des agents (section 6.2). Ces résultats illustrent la robustesse de l'évolution culturelle dans laquelle les deux modes de transmission peuvent s'équilibrer.

Disponibilité des données

Toutes les expériences ont été réalisées dans l'environnement logiciel *Lazy lavender* [2]. Les paramètres, les résultats et les carnets d'analyse des données sont disponibles sur https://sake.re [3].

8 Remerciements

Ce travail a été partiellement soutenu par MIAI @ Grenoble Alpes (ANR-19-P3IA-0003).

Références

[1] A. Acerbi and D. Parisi. Cultural transmission between and within generations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1) :1–16, 2006.

[2] M. Anslow and M. Rovatsos. Aligning experientially grounded ontologies using language games. In *Actes 4e International Workshop on Graph Structures for Knowledge Representation and Reasoning*, pages 15–31, 2015.

[3] D. Anzola and D. Rodríguez-Cárdenas. A model of cultural transmission by direct instruction : An exercise on replication and extension. *Cognitive Systems Research*, 52 :450–465, 2018.

[4] M. Atencia and M. Schorlemmer. An interaction-based approach to semantic alignment. *Journal of Web Semantics*, 12 :131–147, 2012.

[5] E. Borenstein and E. Ruppin. Enhancing autonomous agents evolution with learning by imitation. *Artificial Intelligence and Simulation of Behaviour*, 1(4) :335–347, 2003.

[6] Y. Bourahla, M. Atencia, and J. Euzenat. Knowledge improvement and diversity under interaction-driven adaptation of learned ontologies. In *Actes 20e AAMAS*, pages 242–250, 2021.

[7] Y. Bourahla, M. Atencia, and J. Euzenat. Knowledge transmission and improvement across generations do not need strong selection. In *Actes 21e AAMAS*, pages 163–171, 2022.

[8] R. Boyd and P. Richerson. *Culture and the evolutionary process*. The University of Chicago Press, Chicago, 1985.

[9] A. Byrski, R. Drezewski, L. Siwik, and M. Kisiel-Dorohinicki. Evolutionary multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 30(2) :171–186, 2015.

[10] L. L. Cavalli-Sforza and M. Feldman. *Cultural transmission and evolution : a quantitative approach*. Princeton University Press, New Jersey, 1981.

[11] D. Denaro and D. Parisi. Cultural evolution in a population of neural networks. In *Actes 8th Italian Workshop on Neural Nets*, pages 100–111, 1996.

[12] J. Euzenat. Interaction-based ontology alignment repair with expansion and relaxation. In *Actes 26e IJCAI*, pages 185–191, 2017.

[13] S. Gerard and M. Singh. Evolving protocols and agents in multiagent systems. In *Actes 12e AAMAS*, pages 997–1004, 2013.

[14] B. Jolley, J. Martin Borg, and A. Channon. Analysis of social learning strategies when discovering and maintaining behaviours inaccessible to incremental genetic evolution. In *Actes International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pages 293–304, 2016.

[15] S. Nolfi. Emergence of communication in embodied agents : Co-adapting communicative and non-communicative behaviours. *Connection Science*, 17(3–4) :231–248, 2005.

[16] R. Reynolds. An introduction to cultural algorithms. In *Actes 3e Annual Conference on Evolutionary Programming*, pages 131–139, 1994.

[17] P. Richerson and R. Boyd. *Not By Genes Alone : How Culture Transformed Human Evolution*. The University of Chicago Press, Chicago, 2005.

[18] S. Sen and S. Airiau. Emergence of norms through social learning. In *Actes 20e IJCAI*, pages 1507–1512, 2007.

[19] L. Steels. *Experiments in cultural language evolution*. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam, 2012.

[20] J. van Diggelen, R.-J. Beun, F. Dignum, R. van Eijk, and J.-J. Meyer. Anemone : An effective minimal ontology negotiation environment. In *Actes 5e AAMAS*, pages 899–906, 2006.

2. https://gitlab.inria.fr/moex/lazylav
3. https://sake.re/20210601-DOTG et https://sake.re/20210927-DOTG

Méthodologie d'anonymisation dès la conception d'un jeu de données en imagerie médicale

J. Clech[1,5], A. Gotlieb[2], F. Sève[3,5], F. Didout[4,5], P. Malléa[1,5]

[1] NEHS Digital, 1 rue Augustine Variot 92240 Malakoff, France
[2] Simula Research Laboratory, KA 23, 0164 Oslo, Norway
[3] Kalhyge, 4-6 rue Truillot 94200 Ivry sur Seine, France
[4] MNH, 331, avenue d'Antibes, 45200 Amilly, France
[5] groupe NEHS, 185, rue de Bercy 75012 Paris, France

jeremy.clech@groupe-nehs.com

Résumé

La recherche en santé s'appuie notamment sur des bases de données d'imagerie médicale. Les données personnelles qu'elles contiennent doivent être évacuées afin d'empêcher toute réidentification ultérieure des patients. Dans cet article, nous présentons notre méthodologie d'anonymisation de données d'imagerie médicale. Les leçons apprises dans cette expérience nous ont permis 1) de créer un premier outil qui peut anonymiser ce type d'imagerie et 2) de mettre à la disposition de la communauté IA cette base de données au travers de la plateforme européenne AI4Europe.

Mots-clés

Imagerie médicale, Apprentissage automatique, Qualité des données, Anonymisation, RGPD.

Abstract

Health research relies in particular on medical imaging databases. The personal data they contain must be removed in order to prevent any subsequent re-identification of patients. In this article, we present our methodology for anonymizing medical imaging data. The lessons learned in this experience allowed us 1) to create a first tool that can anonymize this type of imagery and 2) to make this database available to the AI community through the European platform AI4Europe.

Keywords

Medical imaging, Machine learning, Data quality, Anonymization, GDPR.

1 Introduction

Le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) apporte à travers ses principes et ses obligations un cadre juridique pour l'exploitation de données à caractère personnel. L'objectif de ce papier est de proposer un retour d'expérience sur la mise en application d'un traitement d'anonymisation sur des données à caractère personnel liée à une base de données d'imagerie médicale : comment conjuguer les contraintes réglementaires, de structuration et mise en qualité des données collectées afin de pouvoir proposer en un temps court des volumes de données et les exploiter à des fins de recherche en IA.

L'imagerie médicale produit annuellement plusieurs dizaines de millions d'examens en France. Ainsi en 2019, 56,7 millions d'actes d'imageries médicales ont été réalisés par les radiologues libéraux[1] [1, p. 134]. Ces données, stockées en France dans des infrastructures informatiques sécurisées contre la violation de données (divulgation, perte et altération), sont un formidable vivier et sont sources d'innovations médicales afin de lutter contre la perte de chance d'un patient en réalisant trop tardivement des examens, d'améliorer la productivité des radiologues en garantissant la qualité et la constance du diagnostic ou encore de personnaliser les soins en fonction du patient, de ses souhaits et de son contexte.

Alors même que l'apprentissage automatique est arrivé à un haut niveau de maturité méthodologique et industrielle, l'accès à ces larges volumes de données est malaisé. En effet, tant en France qu'en Europe, leur accès requiert d'une part des déclarations et autorisations auprès des autorités compétentes (e.g. CNIL) et information auprès des patients et d'autres part que le recours à des sous-traitants (e.g. prestataires, intervenants) garantisse le bon respect des exigences du RGPD. Dès lors, accéder à ces bases de données requiert un investissement important sur les plans juridique et financier et sur un temps long. Les difficultés rencontrées par le gouvernement français pour la mise en place du *Health Data Hub*, avec la remise en cause de l'hébergeur de données de santé Microsoft en raison de risques de transferts de données vers les États-Unis [2], sont un exemple flagrant.

La pandémie du COVID-19 apporte un éclairage fort sur cette problématique : la Chine a pu proposer dès mars 2020 une solution de triage des patients à partir d'un jeu de données composé de 3 191 patients (dont 1 000 non atteints du COVID-19) [3] alors même que de nombreuses sociétés

[1] Ce nombre d'actes ne prend donc pas en compte ceux réalisés par les hôpitaux publics et ni ceux réalisés par les autres spécialités comme par exemple la cardiologie, la médecine nucléaire ou encore la gynécologie.

©AFIA2022

existent en France (startup et PME établies) en imagerie médicale, et que l'écosystème français maîtrise toute la chaîne de traitements de l'IA (laboratoires de recherche, centres de calculs…).

Nous souhaitons lever ce verrou à l'innovation en proposant un cadre méthodologique permettant un accès à des données de qualité aux acteurs de cet écosystème, dans des délais courts, de manière maîtrisée et respectueuse de la réglementation européenne. Ainsi, nos travaux visent à réaliser dès la conception du projet une collecte anonymisée de données. La finalité de cette démarche a permis de mettre à disposition une base de données d'imagerie médicale de forte volumétrie mais également une preuve de concept avec un outil d'anonymisation automatique de rapports radiologiques.

L'anonymisation est un traitement qui consiste à utiliser un ensemble de techniques de manière à rendre impossible, en pratique, toute identification de la personne par quelque moyen que ce soit et ce de manière irréversible. De fait, l'anonymisation permet de sortir du cadre du RGPD au prix d'une perte relative d'information puisque supprimant les données à caractère personnel. Comme rapidement décrit en section 2, de nombreuses méthodes existent afin d'altérer ces données en vue d'écarter la possibilité de réidentification ultérieure. Toutefois, ces dernières sont réalisées *a posteriori* de la collecte et peuvent introduire des biais.

Après présentation en section 3 des motivations et enjeux à la collecte d'une base de scanners thoraciques, nous décrivons en section 4 les éléments clefs du traitement portant sur des données anonymisées. Nous abordons en section iv la conception et les opérations mises en œuvre pour la collecte des données anonymisées. La section 6 est consacrée à la vérification de l'efficacité de l'anonymisation. La section 7 décrit les éléments mis à la disposition de la communauté IA tandis que la section 8 discute de la pertinence de l'approche proposée consistant à définir l'anonymisation des données lors de la définition du projet de recherche. Enfin, la section 9 conclue ce travail et propose quelques perspectives.

2 Rappel des travaux antérieurs

Le RGPD met en place des contraintes, telles que le recueil du consentement préalable des personnes, rendant parfois impossible l'exploitation des données et l'anonymisation est la seule méthode (lorsque ce recueil ne peut être envisagé) permettant de réaliser ces exploitations dans un cadre licite [4]. De nombreuses techniques, rappelées dans [5] ont été développées et existent aujourd'hui. Les approches classiques de suppression [6] et de généralisation [7] ou encore de recodage global [8] visent en premier objectif à supprimer le caractère personnel des données respectivement par suppression pure ou simple ou par réduction de l'espace des valeurs possibles afin de diminuer les valeurs singulières. Ces approches ont été enrichies afin de mieux intégrer la diversité des données dans ces données généralisées comme avec « *Anotomy* » [9] ou bien par des permutations d'une valeur au sein d'un groupe d'individus évalués comme similaire [10].

Ces techniques réalisées *a posteriori* de la collecte sont utiles en fonction des cas d'usage et des spécificités des données à anonymiser mais présentent plusieurs inconvénients comme i) la lenteur de réalisation, car les traitements imposent une intervention manuelle pour les prises de décision critique ; ii) l'impact sur les modèles d'apprentissage car une généralisation trop importante peut diminuer drastiquement la pertinence d'un modèle et que des permutations mal maîtrisées peuvent entraîner un biais d'apprentissage.

Pour contrer ces problématiques et partant du principe que les données ne peuvent pas être anonymisées tout en restant utiles, l'approche de la confidentialité différentielle[2] [11] propose de contourner l'obstacle en empêchant d'accéder directement à la donnée initiale. Ces solutions sont de plus en plus utilisées, notamment par les GAFAM[3], pour garantir la confidentialité. Cette approche est intéressante mais conduit à la production de biais potentiels liés à l'utilisation d'un générateur, qui rendent les approches d'apprentissage automatique inopérantes.

L'Apprentissage Fédéré[4] est utilisé sur les données de santé [12] car proposant également de ne pas accéder directement aux données en permettant de distribuer l'apprentissage sur les différents sites gérant les données et sous la responsabilité des DPD de chacun de ces sites. Cette approche offre un solide niveau de sécurité et de traçabilité des accès mais induit pour ce faire un prérequis technique non négligeable avec la mise en place d'une infrastructure sur chacun des sites concernés. Ceci génère 2 difficultés : une organisationnelle et une de ressources. En effet, il est nécessaire d'impliquer chacune des Direction des Systèmes Informatiques (DSI) des établissements participants afin qu'elles mettent à disposition les données dans une base distincte de celle de production, accorder de la puissance de calcul et autoriser et contrôler les flux.

Nous pensons que de définir dès la conception du traitement de collecte cet objectif clair d'anonymisation permet de minimiser l'utilisation de ces techniques ou du moins d'en avoir une meilleure maîtrise. C'est cette approche de la confidentialité par construction[5] pour les données d'imagerie médicale que nous présentons et défendons dans cet article

3 Genèse de FIDAC

Lors de la première vague de la pandémie de maladies liée à la propagation du coronavirus, il était difficile de déterminer rapidement si un patient était atteint du COVID-19 ou bien d'une autre maladie pulmonaire. Or, à ce stade limité de nos connaissances sur cette nouvelle maladie, il était crucial de pouvoir séparer les flux de patients (covid et non covid) au sein des établissements de santé pour réguler au mieux la propagation de l'épidémie. Toutefois, nous ne disposions ni de tests antigéniques, ni d'autotests permettant une réponse rapide. À cette période, seuls les tests PCR étaient disponibles mais ceux-ci étaient en nombre limité et rendent leur résultat sous 24h. Dans ce contexte, le scanner thoracique a beaucoup été employé car il permet de caractériser la pathologie du patient par la présence de signes radiologiques typiques, comme par exemple de « *crazy-paving pattern* » [13].

[2] *Differential Privacy*
[3] Google Apple Facebook Amazon Microsoft
[4] *Federated Learning*
[5] *Privacy-by-design*

Afin de favoriser l'effort collectif de lutte contre la crise liée à la pandémie, NEHS Digital, la Société Française de Radiologie (SFR) et le Collège des Enseignants en Radiologie de France (CERF) se sont mobilisés pour mettre en place une base de données anonymisées de référence nationale et européenne permettant l'amélioration des connaissances et le développement de solutions innovantes pour le diagnostic, le pronostic et le suivi des conséquences de la COVID-19. Cette base de données anonymisées a été baptisée FIDAC pour ***F**rench **I**maging **D**atabase **A**gainst **C**oronavirus*.

Nous avons mis en place un système de collecte de scanners thoraciques avec des données complémentaires de type clinique, virologique et radiologique sur une cohorte de patients présentant des signes cliniques d'infection au COVID-19. Dès le départ du projet, les partenaires avaient pour exigence que ces données soient anonymisées afin de favoriser les échanges et le partage des connaissances. Au final, la base anonymisée est constituée de l'imagerie de 5 843 patients adultes.

Ces scanners sont enrichis de métadonnées médicales et les données sont anonymisées par les établissements de santé volontaires. Cette base est destinée à être mettre mise à disposition de tiers à des fins statistiques ou de recherche.

Afin de rendre cette base exploitable pour la recherche en IA, nous avons proposé un mécanisme d'anonymisation qui assure l'impossibilité de réidentification d'une personne physique et ce, en considérant les principes de régulation du RGPD tels que définis dans l'article 26 [14]. Il est important de noter que le traitement amont de ces données (de leur collecte à leur anonymisation) doit lui répondre strictement aux exigences du RGPD. Dans le reste de ce document, nous nous focalisons sur le processus d'anonymisation et proposons un retour d'expérience sur son utilisation dans cette base de données d'imagerie médicale.

4 Conception du processus d'anonymisation des données

4.1 Les grands principes

Pour concevoir un processus d'anonymisation pertinent, nous avons suivi les recommandations de l'autorité nationale, c'est-à-dire la CNIL [15] [16] :

1. Supprimer les éléments d'identification directe ainsi que les valeurs rares qui pourraient permettre une réidentification aisée des personnes ;
2. Distinguer les informations importantes des informations secondaires ou inutiles (i.e., supprimables) ;
3. Définir la finesse acceptable pour chaque information conservée (e.g., conserver l'année de naissance des patients n'est pas possible, mais conserver la décennie dans laquelle ils sont nées est acceptable) ;
4. Définir les priorités (e.g. est-il plus important de conserver une grande finesse sur telle information ou de conserver telle autre information ?).

La suppression d'éléments d'identification est triviale lorsqu'ils sont explicites (e.g. nom et prénom) et ceux-ci sont soit écartés lors de la collecte, soit ils sont immédiatement supprimés. Évaluer le degré d'importance des données ainsi que définir leur finesse et priorité relative requièrent de réaliser des arbitrages. C'est pourquoi, il est indispensable de bien définir les objectifs d'études ainsi que le domaine métier concerné.

Ce processus d'anonymisation correspond ainsi à identifier et réduire les données à collecter mais également de baisser leur granularité informationnelle. La conséquence de l'anonymisation correspond donc une nécessaire perte de précision des données.

Cette seule phase de conception est loin d'être suffisante. En ce sens, le RGPD [17, pp. 11-12] définit trois critères qui permettent de s'assurer qu'un jeu de données est véritablement anonyme :

1. La non-individualisation : il ne doit pas être possible d'isoler un individu dans le jeu de données ;
2. La non-corrélation : il ne doit pas être possible de relier entre eux des ensembles de données distincts concernant un même individu ;
3. La non-inférence : il ne doit pas être possible de déduire de façon quasi-certaine de nouvelles informations sur un individu.

Cette seconde phase de robustesse de l'anonymisation ne peut pleinement s'évaluer qu'au regard des données collectées. Elle est donc à réaliser *a minima* à la fin de la collecte, bien qu'il puisse être intéressant de la faire en cours de collecte pour disposer de premières tendances. Enfin, les techniques d'anonymisation et de réidentification étant amenées à évoluer régulièrement, il est indispensable d'effectuer une troisième phase de surveillance afin de préserver dans le temps le caractère anonyme des données produites.

4.2 Un processus d'anonymisation par construction

La FIGURE 1 ci-dessous illustre la méthodologie d'anonymisation par construction que nous avons mise en place pour le traitement des données personnelles issues des jeux de données en imagerie médicale. Cette méthodologie, comme nous allons le voir, s'appuie sur les principes énoncés ci-dessus.

En s'inspirant des bonnes pratiques utilisées en confidentialité par construction, nous distinguons cinq phases successives, c'est à dire :

i. la phase de conception du projet de diffusion des données d'imagerie médicale, essentiellement portées par les experts du domaine concerné et par les responsables du projet
ii. la phase de traitement qui porte sur la collecte des données en établissements de santé ;
iii. la phase de vérification de l'anonymisation des données, principalement réalisée par des experts du traitement des données ;

©AFIA2022

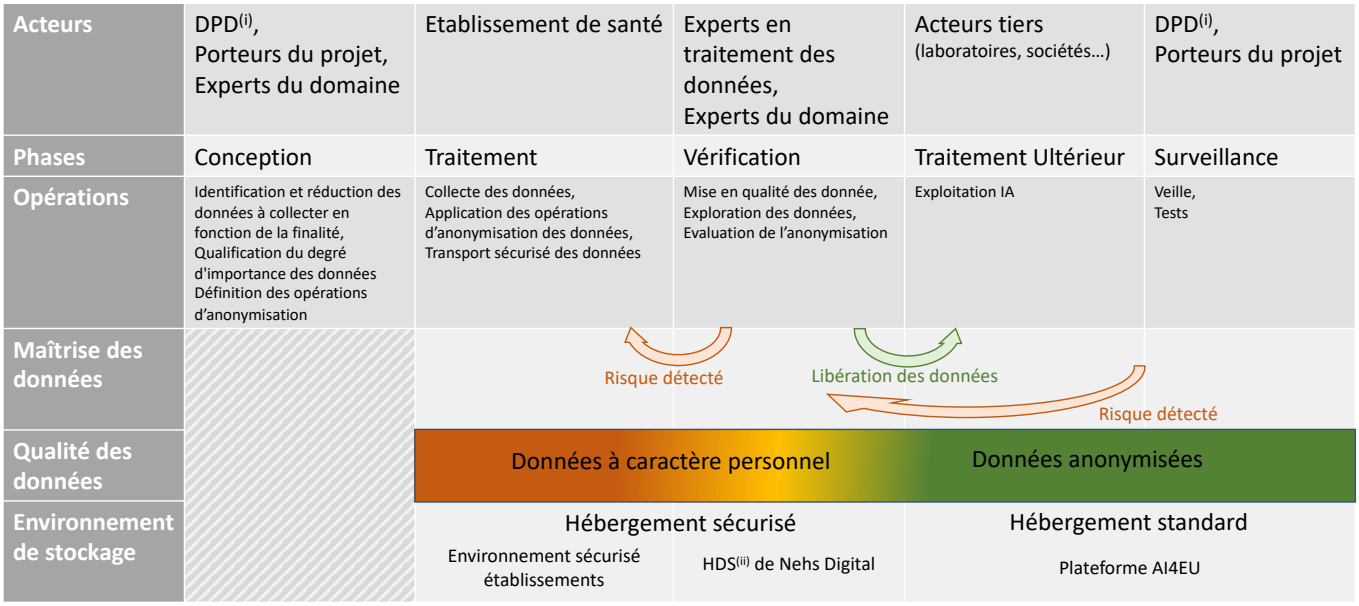


FIGURE 1 - METHODOLOGIE D'ANONYMISATION PAR CONSTRUCTION

iv. la phase de traitement ultérieur des données utilisant massivement l'apprentissage automatique et qui concerne les acteurs tiers tels que les laboratoires privés ou publiques, les sociétés privés qui développent des solutions innovantes, etc. ;

v. la phase de surveillance qui incombe principalement aux Délégués à la Protection des Données (DPD)[6] des entités concernées et qui interagissent de concert avec les responsables de projet.

Les opérations concernées par ces différentes phases sont indiquées dans la figure car elles représentent véritablement le cœur des activités du projet de diffusion des données d'imagerie médicale. Il est intéressant de noter que le basculement entre l'hébergement sécurisé et privé vers un hébergement des données accessible aux acteurs finaux et au public (par exemple, par l'entremise de plateformes d'IA) n'est réalisé qu'après la phase de vérification (libération des données). En effet, il n'est pas rare que cette phase identifie des risques majeurs qu'il faut traiter en appliquant des processus d'élimination ou bien d'offuscation des données.

Les risques identifiés dans les environnements de production sont quant à eux surveillés et conduisent à une amélioration de la phase de vérification.

5 Mise en œuvre du processus d'anonymisation pour la base FIDAC

5.1 Identification et réduction des données à collecter

Pour définir la pertinence des données à collecter, NEHS Digital s'est appuyé sur la Société Française de Radiologie (SFR) et le Collège d'Enseignants Radiologues de France (CERF) qui ont défini, outre la série de scanner et leur compte-rendu radiologique, un ensemble de 4 informations médicales supplémentaires à récolter : (i) l'indication, (ii) le délai entre le début des symptômes et la réalisation du scanner thoracique, (iii) le diagnostic radiologique et (iv) le résultat du test PCR. En outre, 2 informations complémentaires relatives à l'établissement ayant réalisé l'examen ont également été demandées : (v) le nom de l'établissement et (vi) son identifiant.

Un travail de conception a été mené afin de modéliser les opérations d'anonymisation des données, le « transport » de ces dernières ainsi que leur hébergement. La sélection des données à retenir a principalement porté sur les métadonnées présentes dans les images composant les séries de scanner thoracique.

Concernant FIDAC, les données collectées sont : (i) des données médicales définies par la SFR, (ii) le compte-rendu radiologique produit par le radiologue et (iii) l'imagerie médicale au standard DICOM [18].

La finalité est de mettre à disposition un jeu de données conséquent et adapté pour la recherche en IA sur l'identification automatique de la COVID. En s'appuyant sur les experts du domaine que sont la SFR et le CERF, les données médicales sont jugées prioritaires ainsi que l'imagerie alors que les données techniques sont jugées secondaires. Par ailleurs, la conservation du format DICOM a également été jugée prioritaire car elle permet d'exploiter toute la dynamique de l'image acquise. Pour résumer, les données suivantes ont été ciblées :

— Les 6 données définies par les radiologues (sans identification directe des patients) et mentionnées dans le premier paragraphe de cette sous-section ;

— 1 donnée textuelle sous la forme du Compte Rendu Radiologique (ne devant pas contenir d'entête ni de paragraphe d'identification du patient) ;

[6] *Data Protection Officer (DPO)*

— 1 série d'images au standard DICOM contenant 1 donnée image et plus d'une centaine de données associées (métadonnées ou tags DICOM).

La partie conséquente du travail d'analyse des données à conserver ou non, a donc principalement porté sur les métadonnées DICOM. Ce standard encapsule l'image acquise dans un fichier contenant en outre un ensemble de métadonnées d'identification (patient, médecin), de réalisation de l'examen (date et heure, dosimétrie), de dynamique et caractéristiques de l'image acquises (résolution, mot-machine alloués), de description du matériel (marque, modèle, composants) et d'un ensemble de descripteurs permettant l'interopérabilité avec les systèmes d'information hospitaliers et radiologiques. Ces métadonnées sont nombreuses, de l'ordre de centaines, et certaines sont obligatoires pour conserver la conformité à ce standard[7] [19].

Le standard DICOM prévoit ces opérations de déidentification et propose un cadre [20] qui définit les éléments obligatoires de manière la plus minimaliste possible. Suite à l'application de ce profil anonymisé, il en résulte un sous-ensemble de 93 métadonnées à analyser en dehors de l'image elle-même.

5.2 Qualification du degré d'importance des données

À partir de ce travail d'identification et de réduction des données à collecter, nous avons passé en revue chacune de ces données afin de qualifier leur niveau d'importance. Le résultat de cette revue est synthétisé dans la TABLE 1.

Les critères retenus sont les suivants :

— Information principale pour l'objectif : l'absence de la donnée dégrade fortement la pertinence du projet ou le remet en cause ;

— Information secondaire pour l'objectif : l'absence de la donnée diminue la finesse des analyses mais sans remettre en cause l'objectif principal ;

— Information inutile pour l'objectif : l'absence de la donnée n'impacte pas les objectifs principaux ou secondaires définis ;

— Information techniquement requise pour conformité au standard DICOM : la donnée est nécessaire pour exploiter l'image au standard DICOM.

	Données médicales	Compte-rendu	Image
Information principale	4	0	25
Information secondaire	2	1	23
Information inutile	0	0	20
Information techniquement requise	0	0	26

TABLE 1 – Qualification de l'importance des données

Les 20 informations évaluées comme inutiles ont été soit supprimées soit mises à la valeur par défaut en fonction des exigences du standard DICOM. Par exemple la description de l'examen a été supprimée alors que sa date et heure de réalisation ont été vidées.

5.3 Données techniquement requises

Les informations requises techniquement ont nécessité une analyse complémentaire pour déterminer si elles pouvaient contribuer à réidentifier le patient. Pour cela, nous les avons passées en revue pour évaluer s'il était nécessaire de retraiter leurs valeurs. Le résultat de cette évaluation est présenté dans la Table 2.

Par exemple, le type de modalité (ici un scanner) induit la valeur CT[8] pour la donnée *Image Type*. Cette valeur étant constante par construction du jeu de données, aucun retraitement n'est donc nécessaire. Ou encore, les données relatives au patient (son nom et son identifiant) sont automatiquement inscrites dans le fichier image. Étant contraint de disposer de nom unique de patients pour une bonne comptabilité DICOM, nous avons ré-encodé ces valeurs.

Le point d'attention a porté sur les données de type *Instance UID*. Le standard DICOM [21] a défini l'UID selon le schéma d'identification basé sur l'identification objet de l'OSI comme défini par le standard ISO 8824. Chaque identifiant est unique et enregistré selon l'ISO 9834-1 afin d'assurer son unicité. Chaque UID est ainsi composé de 2 parties : une racine provenant de l'organisation émettrice et un suffixe :

UID = <organisation émettrice>.<suffixe> (1)

Un type « *Instance UID* » est un UID mais utilisé pour chacune des instances d'un élément DICOM. Dès lors, par construction chacune des images d'une série d'un scanner possède un identifiant unique à travers le monde. Ce mécanisme permet d'assurer la traçabilité et de garantir que 2 images distinctes ne soient pas associées par erreur à un même patient. En raison de sa construction, il est possible de retrouver beaucoup d'informations comme le fabricant de la modalité mais également la période au cours de laquelle les images ont été réalisées.

Pour évacuer toute possibilité de déduire ces diverses informations, ces identifiants ont été régénérés par séquence aléatoire lors de leur export à partir des établissements contributeurs vers les serveurs NEHS. Un même préfixe d'UID a été utilisé afin de généraliser cette valeur.

6 Vérification de l'efficacité de l'anonymisation

La réception des données anonymisées s'effectue à ce stade dans un environnement certifié Hébergeur de Données de Santé (HDS) requis par la législation française pour toute entité hébergeant des données de santé. Cette certification s'appuie principalement sur les normes ISO 27001 [22] et ISO 27018 [23].

Au cours de la collecte, nous procédons à des opérations de contrôle qualité des données (e.g. détection de valeurs aberrantes, manquantes) et de l'anonymisation. D'une part,

[7] Ces métadonnées permettent par exemple de garantir la bonne interprétation des données avec les appareils compatibles (console de diagnostic ou de revue) et de réaliser des mesures (distances, volumes, angles) correctes.

[8] *Computed Tomography*

©AFIA2022

nous avons mis en place une procédure portant sur les métadonnées contenues dans les images DICOM et d'autre, nous procédons à une vérification portant sur les compte-rendus radiologiques.

6.1 Vérification des métadonnées

Comme dans tout contrôle de qualité des données, les statistiques descriptives sont utilisées afin d'appréhender et comprendre le jeu de données.

Typiquement, la distribution de l'âge par décennie a fait apparaître rapidement une rareté d'individus aux classes d'âges extrêmes (18-19 ans et plus de 100 ans) comme illustré dans la FIGURE 2 réalisé au cours de la collecte. Pour minimiser le risque de réidentification pour ces classes extrêmes, nous avons évalué la possibilité de les regrouper avec les classes suivantes ou précédentes auprès des radiologues. Ces derniers ont validé que cette baisse de finesse n'avait pas d'impact majeur sur l'interprétation des images.

Tag	Donnée	Action de retraitement
0002:0001	File Meta Information Version	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0002:0002	Media Storage SOP Class UID	aucune : valeur identique pour tout le jeu de données
0002:0003	Media Storage SOP Instance UID	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0002:0010	Transfer Syntax UID	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0002:0012	Implementation Class UID	aucune : valeur générique pour ce type d'image
0002:0013	Implementation Version Name	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0008:0005	Specific Character Set	aucune : valeur courante sans être exclusive à une modalité
0008:0008	Image Type	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0008:0016	SOP Class UID	aucune : valeur identique pour tout le jeu de données
0008:0018	SOP Instance UID	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0008:0050	Accession Number	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0008:0060	Modality	aucune : valeur identique pour tout le jeu de données
0010:0010	Patient's Name	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0010:0020	Patient ID	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0010:0021	Issuer of Patient ID	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0018:0015	Body Part Examined	aucune : valeur normalisée
0018:9345	CTDIvol	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0020:000D	Study Instance UID	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0020:000E	Series Instance UID	valeur régénérée lors de l'anonymisation
0028:0002	Samples per Pixel	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0028:1050	Window Center	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0028:1051	Window Width	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0028:1052	Rescale Intercept	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0028:1053	Rescale Slope	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0028:1054	Rescale Type	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité
0028:1055	Window Center & Width Explanation	aucune : valeur non spécifique ne permettant pas d'identifier la modalité

TABLE 2 – RETRAITEMENT DES DONNEES REQUISES TECHNIQUEMENT

Nous avons également évalué le volume de de données transféré par établissement pouvant donner lieu à un risque de réidentification. Il existe une forte disparité dans les contributions et la base de données comporte plusieurs établissements ayant transférés moins de 50 patients. Cette information ayant été évaluée comme secondaire, nous avons décidé de la généraliser et de ne retenir que la région d'appartenance comme illustré en FIGURE 3. Toutefois, à la fin de la collecte, certaines régions comportaient encore un nombre faible de patients (moins d'une centaine), nous les avons également regroupées dans une catégorie *Autre*.

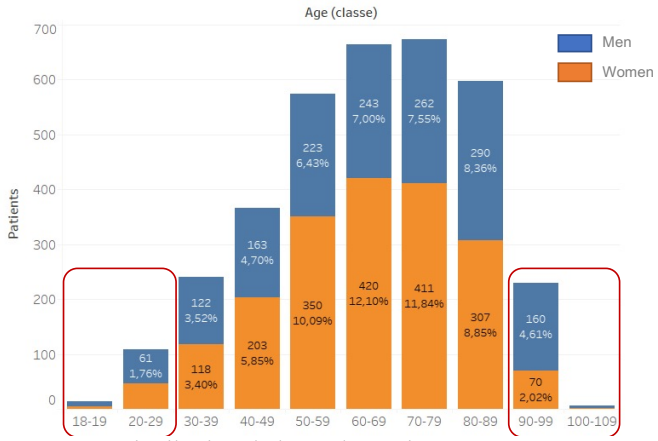


FIGURE 2 – Distribution de l'âge des patients par genre et décennie

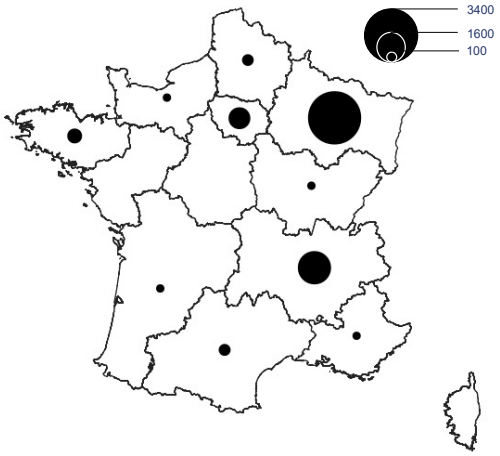


FIGURE 3 – Répartition des patients par région

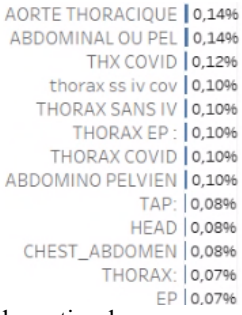


FIGURE 4 – Extrait de parties du corps recensée (tag 0018:0015) et leur proportion dans la base

D'autres analyses statistiques sont menées comme des Classifications Ascendantes Hiérarchiques, ou des mesures de corrélation afin de tenter d'identifier des croisements de données pouvant faire apparaître des moyens d'inférences pour réidentifier des patients. De ces travaux, nous avons identifié que pour les établissements ayant transmis peu de cas, il pouvait y avoir un risque (faible) de réidentification par une personne en contact avec les établissements concernés. Puisque nous avons supprimé l'information directe du nom de l'établissement, nous aurions pu croire avoir écarter ce risque. Néanmoins, nos travaux ont montré plusieurs corrélations fortes entre le nom de l'établissement et d'autres informations comme par exemple le modèle de scanners employés ou encore les libellés des parties du corps. En effet, comme l'illustre la FIGURE 4, certains noms sont très peu utilisés et présents uniquement dans un seul cas, malgré la standardisation DICOM.

6.2 Vérification des compte-rendus radiologues

Un compte-rendu radiologique (CRR) contient par nature beaucoup d'informations à caractère personnel de santé et donc sensibles. Les contributeurs avaient pour consigne d'extraire le corps du compte-rendu car cette partie ne contient que les informations médicales et sans données personnelles.

Afin de garantir l'absence de ces éléments, une vérification automatique à la soumission s'assure de l'absence de termes introduisant le nommage d'une personne (e.g. Monsieur, Mme, Dr, Confrère). En cas de détection de ces éléments, le contributeur est alors alerté et cette soumission refusée.

Afin de s'assurer qu'aucune autre donnée à caractère personnel ne se trouve présente, des contrôles aléatoires suivant une stratégie d'échantillonnage par établissement et médecin sont réalisés par des personnels soumis à un engagement de confidentialité. La procédure prévoit une vérification quotidienne de 5% des compte-rendus de la veille, avec un minimum de 5 CRR pour attester de l'anonymisation de ces derniers.

Après plusieurs semaines, 404 CRR ont été collectés dont 140 ont été vérifiés. Parmi ces 140, 33 cas (23,6%) ont été remontés comme contenant les informations suivantes :

- Modèle et marque du scanner utilisé ;
- Date du précédent examen ;
- Nom de l'établissement de l'examen ;
- Âge du patient.

Puisqu'à l'occasion du travail sur les métadonnées, nous avons déterminé un risque de réidentification sur ces données et qu'il n'est pas possible de retraiter l'ensemble des documents, nous avons décidé de supprimer définitivement ces derniers.

6.3. Synthèse des actions correctives

Tag	Donnée	Action corrective
0008,0070	Fabricant	Suppression
0008,1090	Modèle	Suppression
0010,1010	Âge du patient	Regroupement en tranche d'âges élargies sur les extrêmes
0018,0015	Partie du corps examinée	Regroupement en 4 catégories
0018,1020	Version logicielle	Suppression
NA	Établissement	Regroupement en grandes régions
NA	Rapport Radiologique	Suppression

TABLE 3 – Actions correctives réalisées pour baisser le risque de réidentification

©AFIA2022

Suite à l'évaluation des risques de réidentification, nous avons entrepris au cours de la collecte de supprimer certaines données ou bien de diminuer leur finesse en les regroupant (cf. TABLE 3). Dès lors, une opération de réencodage a été menée sur les données collectées, et les outils d'anonymisation mis à disposition des établissements contributeurs ont été mis à jour.

7 Mise à disposition du jeu de données pour la communauté IA

Le jeu de données anonymisé que nous avons créé a été mis à la disposition de la communauté de recherche en IA sous forme d'un accès indirect depuis la plateforme AI4Europe[9].

En effet, dans le cadre du projet H2020 AI4EU, un pilote industriel en santé a été conduit par Nehs avec ses partenaires académiques afin d'évaluer la capacité de la plateforme à mobiliser les acteurs européens de l'IA autour de problématiques fortes lié à la santé et démontrer le potentiel de la plateforme dans sa capacité à mettre en œuvre des solutions IA pour le monde industriel. Ainsi, ce jeu de données a fait l'objet d'une présentation et d'une mise à disposition.

La base de données FIDAC est ainsi accessible à travers la plateforme AI4Europe [24] et ouverte aux projets d'IA. Afin d'en assurer la surveillance, les acteurs souhaitant exploiter ces données doivent s'identifier et accepter une licence d'utilisation des données à titre non-exclusif qui leur donne le droit d'accéder, d'utiliser et d'exploiter la base de données et les données qu'elle contient conformément à leur destination.

Les retours de ces acteurs sur les données et leurs analysent contribuent à maintenir un niveau de veille sur ces dernières et nous pouvons alerter les licenciés de tout problèmes ultérieurs.

De cette mise à disposition, Thales et NEHS Digital ont exploité la base FIDAC dans le cadre du projet d'aide au diagnostic COVID-19 par IA appliquée sur des scanners tomographiques thoraciques (CT SCAN) financé par l'Agence de l'Innovation de Défense. L'IA permet d'apporter une aide à la décision pour le triage des cas covid / non covid en effectuant un 1er diagnostic probable.

Nous avons réalisé également un prototype de recherche pour anonymiser automatiquement les compte-rendus radiologiques qui systématise certains des principes mentionnés ci-dessus. En ce sens, nous avons développé le projet *medical Imaging Report Anonymiser* (mIRA). Ce projet au statut de PoC propose une API REST permettant de soumettre un compte-rendu et de recevoir sa version anonymisée. Ce dernier est quant à lui disponible à travers la plateforme AI4Europe [25].

8 Discussion

Le travail de conception sur les projets de données est une étape clef depuis l'avènement du RGPD. Dans le contexte d'un traitement en vue d'anonymiser les données, cette phase en devient majeure : l'effort de minimisation des données simplifie drastiquement ces opérations d'anonymisation ultérieure car cela diminue fortement les corrélations potentielles entre les différentes variables.

Pour mener à bien ce travail, il convient de définir clairement les objectifs de l'exploitation future de ce jeu de données à anonymiser. En outre, nous pensons que cette démarche permet de mieux exploiter les outils d'anonymisation existants en motivant les choix et paramétrages de ces algorithmes en fonction de la finalité d'exploitation plutôt que par une décision *a posteriori*.

Cette démarche peut sembler de prime abord rentrer en opposition avec les méthodes d'apprentissage automatique. En effet, diminuer de fait les données d'entrées pourrait laisser à penser que l'on va appauvrir les espaces des possibles et perdre en performance. Toutefois, une grande phase réalisée au cours des projets d'*apprentissage automatique* consiste à améliorer la qualité les données d'entraînement, de réaliser des opérations d'analyse d'impact des variables, de sélection de variables, d'échantillonnage ou encore de construction de variables synthétiques. Ce sont typiquement les opérations que nous avons menées lors de l'évaluation de l'efficacité de l'anonymisation.

Nous avons vu que les analyses de l'efficacité de l'anonymisation peuvent mettre en exergue des faiblesses permettant de réidentifier les individus et donc amener à réaliser des actions correctives sur le jeu de données. En conséquence, tant que les données ne sont pas libérées, il nous paraît primordial que ces données anonymisées mais non encore vérifiées disposent du même niveau de sécurité que si ces données n'étaient pas anonymisées. Dans notre cas, nous avons continué à utiliser l'environnement labellisé Hébergement de Données de Santé (HDS) jusqu'à la libération des données.

Une fois les données libérées, elles sont réputées anonymisées jusqu'à ce qu'elles ne le soient plus. Cela peut arriver par l'apparition de nouvelles techniques d'apprentissage, mais également par l'apparition ultérieure d'autres données qui, mises en lien avec le jeu initial, permet de faire émerger des schémas de réidentification. L'apparition de ces données complémentaires peut faire suite à des mises à disposition légales ou bien via des fuites suite à des violations de données. Ces pourquoi maîtriser la traçabilité des acteurs exploitant les jeux de données est nécessaire.

9 Conclusion et perspectives

Anonymiser des données sensibles n'est pas une opération triviale tant elle peut être lourde de conséquences. L'investissement en temps et en moyen peut paraître conséquent mais finalement les opérations dédiées s'intègrent bien aux étapes de conduite d'un projet basé sur la donnée. En effet, la phase de conception permet d'intégrer l'identification et la réduction des données à collecter alors que la phase de mise en qualité des données peut être utilisée pour s'assurer de l'efficacité de l'anonymisation.

L'étape de conception est importante et permet de faciliter les prises de décisions en cas de risque de réidentification. Toutefois, lorsque la finalité est générique comme dans notre cas (mettre à disposition des données pour la recherche en IA), il peut être difficile d'arbitrer quelles données conserver et avec quelle finesse.

Ce projet nous a permis de confirmer qu'il est primordial de

[9] https://www.ai4europe.eu/node/107

prévoir un espace sécurisé pendant la phase de collecte et tant que l'efficacité de l'anonymisation n'a pas été éprouvée sur le jeu de données à publier. Cela permet le cas échéant de mettre en place des actions de retraitement ou de suppression avant d'effectivement libérer les données.

La poursuite de nos travaux vise à appliquer cette méthodologie à d'autres jeux de données de santé afin d'en éprouver la capacité de généralisation.

10 Remerciements

Nous remercions nos partenaires que sont la SFR et le CERF pour leur volonté et dynamisme à contribuer à aider la recherche et la prise en soin des malades. Un grand merci également aux radiologues, DSI et personnels des établissements qui ont participé activement à la constitution de la base FIDAC.

11 Références

[1] J.-P. Laboureix, «Les comptes de la sécurité sociale 2020-2021,» 2021.

[2] CNIL, «La Plateforme des données de santé (Health Data Hub),» 09 02 2021. [En ligne]. Available: https://www.cnil.fr/fr/la-plateforme-des-donnees-de-sante-health-data-hub. [Accès le 03 03 2022].

[3] M. Wang, C. Xia, L. Huang, S. Xu, C. Qin, J. Liu, Y. Cao, P. Yu, T. Zhu, H. Zhu, C. Wu, R. Zhang, X. Chen, J. Wang, G. Du, C. Zhang, S. Wang, K. Chen, Z. Liu, L. Xia et W. Wang, «Deep learning-based triage and analysis of lesion burden for COVID-19: a retrospective study with external validation,» *Lancet Digit Health,* vol. 2(10), pp. e506-e515, Oct. 2020.

[4] L.-P. Sondeck, «Anonymisation des données, une nécessité à l'ère du RGPD,» *Sécurité des systèmes d'information,* 10 Nov. 2019.

[5] F. Ben Fredj, «Méthode et outil d'anonymisation des données sensibles,» Conservatoire national des arts et metiers - CNAM; Université de Sfax (Tunisie). Faculté des Sciences économiques et de gestion, 2017.

[6] L. H. Cox, «Suppression methodology and statistical disclosure analysis,» *Journal of the American Statistical Association,* vol. 75(370), p. 377–385, 1980.

[7] P. Samarati, «Protecting respondents identities in microdata release,» *IEEE transactions on Knowledge and Data Engineering,* vol. 13(6), pp. 1010-1027, 2001.

[8] J. Domingo-Ferrer et V. Torra, «A quantitative comparison of disclosure control methods for microdata,» *Confidentiality, disclosure and data access: theory and practical applications for statistical agencies,* pp. 111-134, 2001.

[9] X. Xiao et Y. Tao, «Anatomy: Simple and effective privacy preservation,» chez *Proceedings of the 32nd international conference on Very large data bases*, Seoul (Korea), 2006.

[10] T. Dalenius et S. P. Reiss, «Data-Swapping: A Technique for Disclosure Control,» *Journal of Statistical Planning and Inference,* vol. 6(1), pp. 73-85, 1982.

[11] C. Dwork, F. McSherry, K. Nissim et A. Smith, «Calibrating Noise to Sensitivity,» *Private Data Analysis Journal of Privacy and Confidentiality,* vol. 7(3), 2016.

[12] T. S. Brisimi, R. Chen, T. Mela, A. Olshevsky, I. C. Paschalidis et W. Shi, «Federated learning of predictive models from federated Electronic Health Records,» *International Journal of Medical Informatics,* vol. 112, pp. 59-67, 2018.

[13] S. E. Rossi, J. J. Erasmus et M. Volp, «Crazy-Paving Pattern at Thin-Section CT of the Lungs: Radiologic-Pathologic Overview,» *RadioGraphics Vol. 23, No. 6,* 2003.

[14] Parlement européen et du conseil, «Règlement 2016/679 du parlement Européen et du Conseil,» *Journal officiel de l'Union européenne,* 27 04 2016.

[15] CNIL, «L'anonymisation des données, un traitement clé pour l'open data,» 17 10 2019. [En ligne]. Available: https://www.cnil.fr/fr/lanonymisation-des-donnees-un-traitement-cle-pour-lopen-data. [Accès le 10 10 2021].

[16] CNIL, «Fiche n°1 : Identifier les données à caractère personnel,» chez *Guide RGPD du développeur, v1.0.1*, LaboCNIL, 2020, pp. 5-6.

[17] Article 29 Data Protection Working Party, «Opinion 05/2014 on Anonymisation Techniques,» European Commission, 2014.

[18] NEMA, «DICOM,» The Medical Imaging Technology Association, [En ligne]. Available: https://www.dicomstandard.org. [Accès le 11 10 2021].

[19] Innnolitics, LLC, «DICOM Standard Browser,» 2016. [En ligne]. Available: https://dicom.innolitics.com/ciods. [Accès le 11 10 2021].

[20] DICOM Standards Committee, «DICOM PS3.15 2022a - Security and System Management Profiles,» DICOM, [En ligne]. Available: http://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/html/part15.html. [Accès le 11 10 2021].

[21] DICOM Standards Committee, «Unique Identifiers (UIDs),» [En ligne]. Available: https://dicom.nema.org/dicom/2013/output/chtml/part05/chapter_9.html.

[22] ISO/IEC JTC 1/SC 27, ISO/IEC 27001:2013, 2013, p. 23.

[23] ISO/IEC JTC 1/SC 27, ISO/IEC 27018:2019, 2019, p. 23.

[24] NEHS Digital, «Covid-19 chest CT-scan Dataset,» 12 2021. [En ligne]. Available: https://www.ai4europe.eu/research/ai-catalog/covid-19-chest-ct-scan-dataset-0.

[25] J. Clech et G. Martial, «mIRA - medical Imaging Report Anonymiser,» 11 2021. [En ligne]. Available: https://www.ai4europe.eu/research/ai-catalog/mira-medical-imaging-report-anonymiser.

©AFIA2022

Isomorphismes entre instances et sous-instances STRIPS

Martin C. Cooper, Arnaud Lequen, Frédéric Maris

IRIT, Université de Toulouse, France

{Martin.Cooper, Arnaud.Lequen, Frederic.Maris}@irit.fr

Résumé

Dans le domaine de la planification automatique, décider si deux instances encodées en STRIPS sont isomorphes est la manière la plus élémentaire de comparer deux instances. C'est aussi un cas particulier du problème où l'on se donne deux instances P et P', et l'on cherche un isomorphisme entre P et une sous-instance de P'. Dans cet article, nous nous proposons d'étudier la complexité de ces deux problèmes. On montre que le premier est GI-complet, tandis que le second est NP-complet. Malgré cela, nous proposons un algorithme qui permet de construire un tel isomorphisme, lorsqu'il existe. De même, nous montrons expérimentalement que, sur nos jeux de tests, un pré-traitement basé sur des méthodes de propagation de contraintes permet d'améliorer significativement l'efficacité du solver SAT utilisé par notre algorithme.

Mots-clés

Planification automatique, isomorphisme, complexité, propagation de contraintes

Abstract

Determining whether two STRIPS planning instances are isomorphic is the simplest form of comparison between planning instances. It is also a particular case of the problem concerned with finding an isomorphism between a planning instance P and a sub-instance of another instance P'. In this paper, we study the complexity of both problems. We show that the former is GI-complete, and we prove the latter to be NP-complete. Nonethelss, we propose an algorithm to build an isomorphism, when possible. We report experimental trials on benchmark problems which demonstrate that applying constraint propagation in preprocessing can greatly improve the efficiency of a SAT solver.

Keywords

Planning, isomorphism, complexity, constraint propagation

1 Introduction

Les modèles de planification STRIPS [8] encodent implicitement de grands espaces d'états, souvent impossible à représenter explicitement, mais qui ont cependant une structure claire et régulière. Il est donc raisonnable de penser que deux instances de planification différentes puissent avoir une partie de leurs structures respectives en commun. Cependant, cette similarité n'est pas immédiate à identifier. En effet, pour déterminer si une instance P est une sous-instance d'une autre instance P', il faut associer chaque fluent et chaque action de P à son homologue dans P', tout en respectant une propriété de morphisme. Cela requiert l'exploration de l'espace des fonctions de P vers P', de taille exponentielle en les représentations de ces instances. Il reste que trouver un tel morphisme permet de transférer à une instance certaines informations dont l'on dispose sur l'autre. Par exemple, tout plan-solution de P peut être transformé en un plan-solution pour P' efficacement.

En programmation par contraintes, il est monnaie courante de stocker hors-ligne toutes les solutions d'une instance CSP ou SAT en une forme compilée [1]. Une carte de compilation indique quelles opérations peuvent être effectuées en temps polynomial lors de l'exécution en ligne [7]. Or, il est bien connu qu'une instance de planification STRIPS à horizon fixe peut être compilée en une instance SAT, grâce à l'encodage SATPLAN [10]. Ainsi, pour une instance donnée, tous les plans peuvent être stockés en une forme compilée, du moins en théorie – en pratique, la forme compilée est de taille trop importante pour être gardée en mémoire. Les instances de planification les plus favorables à cette approche par compilation sont celles pour lesquelles le nombre de plans-solutions est faible, ou, au contraire, pour lesquelles l'ordre des actions est peu contraint. Dans le cas où l'on a déjà calculé une forme compilée C' représentant tous les plans-solutions pour P', et que l'on a un problème P' similaire à P, on peut se demander si l'on peut synthétiser un plan pour P à partir de C'. Si P est isomorphe à un sous-problème de P', il suffit alors d'appliquer une suite d'opérations de conditionnement à C' pour obtenir une forme compilée C représentant toutes les solutions de P. C'est dans cette optique-là que l'on cherche à étudier des isomorphismes entre sous-problèmes. Un cas simple, mais crucial, survient lorsque P n'admet aucune solution. Alors, un isomorphisme entre P et un sous-problème de P' est une preuve que P' n'admet aucune solution.

Dans cet article, nous commençons par l'étude du problème SI, qui traite de la synthèse d'un isomorphisme entre deux instances STRIPS de tailles identiques. Notre preuve de la GI-complétude du problème nous permet d'affirmer l'existence d'un algorithme quasi-polynomial pour SI [2]. Nous nous penchons ensuite sur le problème SSI, qui cherche à synthétiser un isomorphisme entre une instance STRIPS et une sous-instance d'une autre instance STRIPS. Nous appe-

©AFIA2022

lons une telle fonction un *isomorphisme de sous-instance*. Après avoir montré que ce problème est NP-complet, nous proposons un algorithme permettant de déterminer l'existence d'un isomorphisme de sous-instance, ou qui détecte qu'aucun tel morphisme n'existe. Notre algorithme est basé sur une réduction à SAT, renforcée par des techniques de propagation de contraintes, qui nous permettent d'éliminer des associations non-cohérentes entre éléments de P et P'.
Nous avons, jusque-là, considéré que les instances de planification P et P' possédaient des états initiaux et finaux identiques, à isomorphisme près. Même lorsque cette condition est relaxée, un isomorphisme entre P et une sous-instance de P' peut tout de même être utile. Par exemple, si π est un plan-solution pour P, son image dans P' peut alors être convertie en une nouvelle action qui peut être ajoutée à P' afin de faciliter sa résolution. Nous proposons alors cette version plus faible d'isomorphisme de sous-instance, que nous appelons *isomorphisme homogène de sous-instance*. Le problème correspondant est noté SSI-H.
Précédemment, d'autres travaux ont étudié la complexité de nombreux problèmes associés à la synthèse de plans-solutions pour des instances STRIPS [4], ou se sont penchés sur la complexité de domaines particuliers de planification [9]. Plus rarement, on peut aussi faire état de travaux portant sur la modification d'instances de planification, à l'image du problème traitant de l'adaptation d'une instance afin de rendre faisable un plan donné en entrée [11].
Notre article est organisé comme suit : la Partie 2 présente des notations générales, ainsi que des concepts et constructions que nous utilisons au long de l'article. Dans la Partie 3 et dans la Partie 4, nous présentons nos résultats théoriques pour SI et SSI, respectivement. Dans la Partie 5, nous présentons notre algorithme pour SSI. Enfin, la Partie 6 résume nos résultats expérimentaux, suivis d'une discussion. Par soucis de concision, les démonstrations et de nombreux éléments techniques ont été abrégés, mais peuvent être retrouvés dans une version étendue de cet article [6].

2 Préliminaires

2.1 Planification automatique

Une instance de planification STRIPS est un 4-uplet $P = \langle F, I, O, G\rangle$ tel que F est un ensemble d'éléments appelés *fluents* (des variables propositionnelles dont la valeur peut changer avec le temps), I et G sont des ensembles de littéraux de F, appelés respectivement l'*état initial* et le *but*, et O est un ensemble d'*actions*. Une action est de la forme $o = \langle \mathsf{pre}(o), \mathsf{eff}(o)\rangle$, où $\mathsf{pre}(o)$ et $\mathsf{eff}(o)$ sont la *préconditions* et l'*effet* de o, des ensembles de littéraux de F.
On note $\mathsf{pre}^+(o) = \{f \in F \mid f \in \mathsf{pre}(o)\}$ les fluents positifs de $\mathsf{pre}(o)$, et $\mathsf{pre}^-(o) = \{f \in F \mid \neg f \in \mathsf{pre}(o)\}$ les fluents négatifs. De même, on note $\mathsf{eff}^+(o) = \{f \in F \mid f \in \mathsf{eff}(o)\}$ et $\mathsf{eff}^-(o) = \{f \in F \mid \neg f \in \mathsf{eff}(o)\}$.
Par abus de notation, on note $\mathsf{pre} : O \to 2^F \cup 2^{\neg F}$ la fonction $o \mapsto \mathsf{pre}(o)$, et on utilise des notations similaires pour $\mathsf{pre}^+, \mathsf{pre}^-, \mathsf{eff}, \mathsf{eff}^+$, and eff^-. Dans cet article, on notera $\mathcal{C} = \{\mathsf{pre}^+, \mathsf{pre}^-, \mathsf{eff}^+, \mathsf{eff}^-\}$, et, pour un ensemble quelconque S de littéraux de F, $\neg S = \{\neg l \mid l \in S\}$.
Un état s est une assignation de chaque fluent de F à une valeur de vérité. Nous associerions ici s avec l'*ensemble* des littéraux de F vrais dans s. Etant donnée une instance $P = \langle F, I, O, G\rangle$, un plan $o_1, \ldots, o_k$ de O est une suite d'états $s_0, \ldots, s_k$ satisfaisant, pour $i \in [\![1; k]\!]$, $s_i = (s_{i-1} \setminus \mathsf{eff}^-(o_i)) \cup \mathsf{eff}^+(o_i)$, et $\mathsf{pre}^+(o_i) \subseteq s_{i-1}$, $\mathsf{pre}^-(o_i) \cap s_{i-1} = \varnothing$. Un plan-solution est alors un plan tel que $s_0 = I$ et $G \subseteq s_k$.

2.2 La classe de complexité GI

Dans cette section, nous présentons la classe de complexité GI, pour laquelle SI est complet, comme nous le montrerons dans une section ultérieure. GI est construite autour du problème d'isomorphisme de graphes, qui consiste à trouver une bijection $u : V \to V'$ entre les sommets de deux graphes $\mathcal{G}(V, E)$ et $\mathcal{G}'(V', E')$, telle que les images des sommets reliés entre eux par une arrête dans $\mathcal{G}$ sont aussi reliés dans $\mathcal{G}'$, et réciproquement. Plus formellement :

$$\{x, y\} \in E \text{ ssi } \{u(x), u(y)\} \in E' \tag{1}$$

Définition 1. *La classe de complexité GI est la classe des problèmes pour lesquels il existe une réduction de Turing en temps polynomial au problème d'isomorphisme de graphes.*

La classe de complexité GI contient un grand nombre de problèmes traitant de l'existence d'un isomorphisme entre deux structures non-triviales encodées de manière explicite. De tels problèmes sont souvent complets pour GI, comme par exemple les problèmes d'isomorphisme entre graphes colorés, entre hypergraphes, entre automates [15]...
En l'état des connaissances actuelles, le consensus est que GI est une classe intermédiaire entre P et NP. Plus précisément, le problème d'isomorphisme de graphes peut être résolu en temps quasi-polynomial [2]. Il est donc très peu vraisemblable que le problème soit NP-difficile, malgré le fait qu'aucun algorithme polynomial n'est encore connu.

3 Problème d'isomorphisme STRIPS

Dans cette partie, nous nous intéressons au problème d'isomorphisme entre deux instances STRIPS. Après avoir défini la forme d'isomorphisme STRIPS que nous proposons, nous présentons nos résultats de complexité.

Définition 2 (Isomorphisme entre instances STRIPS)**.** *Soient $P = \langle F, I, O, G\rangle$ et $P' = \langle F', I', O', G'\rangle$ deux instances STRIPS. Un isomorphisme entre P et P' est une paire (υ, ν) de bijections $\upsilon : F \to F'$ et $\nu : O \to O'$ t.q.*

$$\forall o \in O,\ \nu(o) = \langle \upsilon(\mathsf{pre}(o)), \upsilon(\mathsf{eff}(o))\rangle \tag{2}$$
$$\upsilon(I) = I' \tag{3}$$
$$\upsilon(G) = G' \tag{4}$$

Où, pour deux ensembles disjoints $F_1, F_2 \subseteq F$ de fluents,

$$\upsilon(F_1 \cup \neg F_2) = \upsilon(F_1) \cup \neg\upsilon(F_2)$$

Une conséquence immédiate de cette définition est qu'un tel isomorphisme conserve l'espace des plans : toute suite

d'actions $o_1, \ldots, o_n \in O$ est un plan pour P si, et seulement si, la suite associée $\nu(o_1), \ldots, \nu(o_n)$ est un plan pour P'. Cette propriété de morphisme est assurée par l'équation (2). De la même façon, tous les plans-solutions sont conservés, et ce grâce aux conditions imposées par les équations (3) et (4). On en vient alors au problème SI, que l'on définit formellement afin d'établir sa complexité :

Problème 1. *Problème d'Isomorphisme STRIPS SI*
Entrée *Deux instances STRIPS P et P'*
Sortie *Un isomorphisme (υ, ν) entre P et P', s'il en existe un*

Proposition 1. *SI est GI-complet*

Démonstration. Voir [6] □

Par soucis de concision, la preuve peut se retrouver dans la version étendue de cet article. Ce résultat de GI-complétude tient encore si l'on n'impose pas que les états initiaux et buts respectifs de P et P' soient en bijections. Ainsi, cela signifie que la majeure partie de la difficulté de SI réside en la complexité d'associer correctement les structures internes respectives des espaces d'états de chaque instance, et que des propriétés supplémentaires sur certains états (comme être un état final ou initial) n'influencent pas significativement la complexité du problème.

4 Problème d'isomorphisme de sous-instance STRIPS

Dans cette partie, nous présentons les problèmes SSI-H et SSI, qui traitent de la synthèse (de deux formes différentes) d'isomorphismes entre une instance de planification P et d'une sous-isntance d'une autre instance STRIPS P'. Dans cette section, on identifie la complexité de ces deux problèmes, en prouvant leur NP-complétude. On utilise ce résultat pour proposer, dans la partie subséquente, un algorithme pour SSI et SSI-H. Cet algorithme est basé sur une réduction vers SAT, enrichi par une étape de pré-traitement s'appuyant sur de la propagation de contraintes.
On commence par introduire la notion d'*isomorphisme homogène de sous-instances*, qui est une forme d'isomorphisme entre P et une sous-instance de P' qui ne conserve cependant pas l'état initial ni le but. Il s'agit donc d'associer l'espace d'états complet du problème P à une partie de l'espace d'états de P', sans pour autant tenir compte des états initiaux ou finaux de ces instances.

Définition 3 (Isomorphisme homogène de sous-instance)**.** *Soient deux instances STRIPS $P = \langle F, I, O, G\rangle$ et $P' = \langle F', I', O', G'\rangle$. Un* isomorphisme homogène de sous-instances *de P à P' est un couple (υ, ν) de fonctions injectives $\upsilon : F \to F'$ et $\nu : O \to O'$ qui respectent la condition (2) de la Définition 2.*

Problème 2. *Isomorphisme homogène de sous-instance STRIPS SSI-H*
Entrée *Deux instances STRIPS P et P'*
Sortie *Un isomorphisme homogène de sous-instances (υ, ν) entre P et P', s'il en existe un*

Un isomorphisme homogène de sous-instances entre P et P' peut s'avérer utile, par exemple, dans le cas où l'on a réussi à compiler l'ensemble des plans pour P' et que l'on souhaite extraire un plan pour P. La définition suivante d'isomorphisme de sous-instance suivante, plus forte que dans le cas homogène, prend en compte les états initiaux et les buts. Cette notion nous permet de ne conserver que les plans-*solutions* d'un problème à l'autre.

Définition 4 (Isomorphisme de sous-instance)**.** *Un* isomorphisme de sous-instance *entre P et P' est un isomorphisme de sous-instance homogène qui respecte de surcroît les conditions (3) et (4) de la Définition 2.*

Problème 3. *Isomorphisme de sous-instance STRIPS SSI*
Entrée *Deux instances STRIPS P et P'*
Sortie *Un isomorphisme de sous-instance (υ, ν) entre P et P', s'il en existe un*

La principale différence entre SI et SSI est que, pour SSI, la condition sur la bijectivité de υ et ν est relaxée. L'injectivité des deux fonctions est cependant toujours requise, afin d'empêcher les fluents et actions d'être fusionnés ensemble par la fonction. Les autres conditions restent inchangées.
Le résultat principal de cette partie est présenté ci-dessous. La preuve se base sur une réduction à partir du problème d'isomorphisme de sous-graphes, dont la NP-complétude est un résultat bien établi [5].

Proposition 2. *SSI et SSI-H sont NP-complets*

Démonstration. Voir [6] □

5 Un algorithme pour SSI

Dans cette partie, nous présentons notre algorithme pour le problème SSI, dont le pseudo-code est fourni dans l'Algorithme 1. Cet algorithme repose sur la compilation du problème en une formule propositionnelle, qui est ensuite passée à un solveur SAT. La procédure est renforcée par un pré-traitement, basé sur la propagation de contraintes, qui nous permet d'éliminer des associations incohérentes entre les fluents et actions respectifs de chaque instance.
Pour deux instances STRIPS P et P', l'algorithme retourne un isomorphisme de sous-instance (υ, ν), lorsqu'il en existe un. L'Algorithme 1 comporte deux étapes principales. La première étape, qui s'étend de la ligne 2 à la ligne 8, consiste à éliminer autant d'associations inconsistantes que possible entre les fluents (resp. actions) du problèmes P et les fluents (resp. actions) du problème P', dès lors que l'on a détecté une incohérence d'ordre syntaxique qui a été éventuellement propagée (comme l'on présente plus bas). La deuxième étape, qui débute à la ligne 9, consiste en une phase de recherche, ce qui passe par l'encodage du problème en une formule en FNC, qui est ensuite passée à un solveur SAT.

©AFIA2022

Algorithme 1 trouver_isomorphisme_sous-instance

Entrée : Deux instances STRIPS P et P'
Sortie : Un isomorphisme de sous-instance entre P et P' s'il en existe un

1: Initialiser_domaines(F, O)
/* Elimination des associations impossibles */
2: $Q := F \cup O$
3: **tant que** $Q \neq \varnothing$ **faire**
4: $v := Q$.Pop()
5: $r :=$ Réviser(v)
6: **si** r **alors**
7: **si** $\mathcal{D}(v) = \varnothing$ **alors retourner** UNSAT
8: **sinon** Q.Ajouter($\{v' \mid v'$ lié à $v\}$)
/* Phase de recherche avec SAT */
9: $\varphi :=$ Encoder_en_FNC$(P, P', \mathcal{D})$
10: **retourner** Interpréter(Solveur.Trouver_modèle(φ))

5.1 Élimination des associations invalides

On appelle *association* entre fluents un couple $(f, f') \in F \times F'$ tel que f' est un candidat pour la valeur de $v(f)$. De même, on appelle association entre actions un couple $(o, o') \in O \times O'$ tel que o' est un candidat pour la valeur de $v(o)$. Compte tenu de la taille des problèmes considérés, il est crucial de détecter aussi tôt que possible les associations n'appartenant à aucun isomorphisme de sous-instance valide, afin de réduire la taille de l'espace de recherche.

Afin d'éliminer autant d'associations inconsistantes que possible, nous utilisons une technique basée sur la propagation de contraintes, telle que couramment étudiée dans la littérature de programmation par contraintes. L'idée générale est de maintenir, pour chaque fluent $f \in F$ de P, un *domaine* $\mathcal{D}(f) \subseteq F'$ de fluents de P', qui représente les candidats plausibles pour la valeur de $v(f)$. De manière analogue, chaque action $o \in O$ se voit assigner un domaine $\mathcal{D}(o) \subseteq O'$. Par la suite, on appelle *variable* tout fluent ou action. La procédure que l'on présente ci-dessous a pour objectif de réduire les domaines des différentes variables, dans l'optique d'alléger la charge passée au solveur SAT.

La première étape consiste en l'initialisation des domaines. Pour chaque fluent $f \in F$, on a $\mathcal{D}(f) = F'$. Les domaines des actions sont, pour leur part, initialisés en fonction de leur *profil d'action*. Pour chaque action $o \in O \cup O'$, on définit le vecteur $\mathsf{profile}(o) \in \mathbb{N}^6$, que l'on appelle le *profil* de o. Ce vecteur est une abstraction numérique de quelques caractéristiques de l'action, pensée de sorte à ce que si $\mathsf{profile}(o) \neq \mathsf{profile}(o')$, alors les deux actions $o \in O$ et $o' \in O'$ ne peuvent être associés.

Dans la pratique, $\mathsf{profile}(o)$ compte le nombre de fluents positifs et négatifs dans les préconditions et effets de o, ainsi que dans le nombre de fluents qui sont des *additions strictes* ou des *suppressions strictes*. Un fluent f est une *addition stricte* pour l'action o si $f \in \mathsf{pre}^-(o) \wedge f \in \mathsf{eff}^+(o)$, et est une *suppression stricte* si $f \in \mathsf{pre}^+(o) \wedge f \in \mathsf{eff}^-(o)$. Enfin, on initialise le domaine de chaque action $o \in O$:

$$\mathcal{D}(o) = \{o' \in O' \mid \mathsf{profile}(o') = \mathsf{profile}(o)\}$$

La seconde étape consiste à propager les contraintes supplémentaires posées par les restrictions fraîchement identifiés du domaine. La technique que l'on propose est basée sur l'idée de cohérence d'arc, omniprésente dans le domaine de la programmation par contraintes. Elle consiste à éliminer du domaine des fluents (resp. actions) les fluents-candidats (resp. actions-candidates) qui ne sont pas supportés par le domaine d'une action (resp. fluent). Cela permet de faire la jonction entre les contraintes posées par les fluents et les contraintes posées par les actions.

Plus précisément, soit un fluent $f \in F$. Lorsqu'une action $o \in O$ est tel que f apparaît (positivement ou négativement) dans ses préconditions ou ses effets, alors on dit que o *dépend* de f. On note alors $d(f)$ l'ensemble des actions qui dépendent de f. On utilise des notations similaires pour $d(f')$ lorsque $f' \in F'$. Plaçons-nous maintenant dans le cas où $v(f) = f'$. Une conséquence de l'équation (2) de la Définition 2 est que chaque action de $d(f)$ doit avoir son image par ν dans $d(f')$. Sinon, on aurait que f apparaît dans $\mathsf{pre}(o)$ ou $\mathsf{eff}(o)$, mais $v(f)$ n'apparaîtrait ni dans $v(\mathsf{pre}(o))$, ni dans $v(\mathsf{eff}(o))$. Ainsi, si pour une action donnée $o \in d(f)$, aucun candidat pour son image n'est dans $d(f')$ (*i.e.*, $\mathcal{D}(o) \cap d(f') = \varnothing$), alors on a que f' ne peut pas être choisi pour l'image de f.

Dans la suite, on précise l'argument tout juste énoncé, en identifiant $\mathsf{pre}^+(o)$ et $\mathsf{pre}^+(o'), \ldots, \mathsf{eff}^-(o)$ et $\mathsf{eff}^-(o')$. On obtient alors les contraintes suivantes pour $\mathcal{D}(f)$, dans lesquelles on note $\mathcal{C} = \{\mathsf{pre}^+, \mathsf{pre}^-, \mathsf{eff}^+, \mathsf{eff}^-\}$:

$$\mathcal{D}(f) \subseteq \left\{ f' \;\middle|\; \begin{array}{l} \forall o \in O, \forall \mathcal{S} \in \mathcal{C} \text{ s.t. } f \in \mathcal{S}(o), \\ \exists o' \in \mathcal{D}(o) \text{ s.t. } f' \in \mathcal{S}(o') \end{array} \right\} \quad (5)$$

Le même exercice peut être fait pour les actions. Soit $o \in O$ une action quelconque, et considérons un candidat pour son image $o' \in O'$. Afin de satisfaire la propriété de morphisme, dans le cas où l'on a effectivement $\nu(o) = o'$, on doit trouver dans $\mathsf{pre}^+(o')$ un fluent qui appartient à $\mathcal{D}(f)$, et ce pour chaque fluent $f \in \mathsf{pre}^+(o')$. Plus généralement, et plus formellement, cela impose les conditions suivantes :

$$\mathcal{D}(o) \subseteq \{o' \mid \forall \mathcal{S} \in \mathcal{C}, \forall f \in \mathcal{S}(o), \exists f' \in \mathcal{D}(f) \cap \mathcal{S}(o')\} \quad (6)$$

Algorithmiquement, on s'assure de la satisfaction de ces contraintes en utilisant une version adapté de AC3 [13, 14]. On retrouve en particulier la sous-routine de révision de la cohérence des domaines des variables.

Réviser une variable v consiste à vérifier que l'ensemble des éléments de son domaine sont conformes aux conditions nécessaires évoquées précédemment, c'est-à-dire l'équation (5) si v est un fluent, ou (6) si v est une action. La boucle principale, dépeinte dans l'Algorithme 1, effectue donc une révision itérative de tous les fluents et actions, en maintenant une file Q des variables à réviser (ligne 1). Cette file est initialisée avec l'ensemble des variables, afin que chacune soit révisée au moins une fois.

Si, lors de la révision d'une variable v, le domaine de v est modifié par la procédure, alors toutes les variables qui sont liées à v sont ajoutées à la file des variables à réviser (lignes 5 à 9). On dit que v' est liée à la variable v

si v est un fluent et $v' \in d(v)$, ou inversement. Si le domaine d'une variable est vide, alors on est assuré qu'aucun isomorphisme de sous-instance n'existe, et l'algorithme se termine immédiatement (lignes 6 et 7). Sinon, la boucle se termine lorsque la file des variables à réviser est vide.
Cette procédure allège donc la charge restant à la phase de recherche, que l'on présente dans la partie suivante.

5.2 Encodage en une instance SAT

Dans cette partie, nous présentons notre construction de la formule propositionnelle φ évoquée plus tôt, dont les modèles permettent de trouver un isomorphisme de sous-instance. φ est construit sur l'ensemble de variable *Var*(φ), que l'on définit comme suit :

$$\mathit{Var}(\varphi) = \left\{ f_i^j \;\middle|\; i \in F, j \in F' \right\} \cup \{ o_r^s \mid r \in O, s \in O' \}$$

Une variable propositionnelle de la forme f_i^j représente l'association d'un fluent $i \in F$ à un fluent $j \in F'$. De même, o_r^s représente l'association de $r \in O$ à $s \in O'$.
φ encode une instance de SSI passée en entrée à l'Algorithme 1. La formule consiste en la conjonction des formules suivantes, qui nous assurent chacune une propriété différente sur un modèle.
La formule présentée dans l'équation (7) nous assure de l'unicité de l'image de chaque fluent. On obtient la même propriété sur les images des actions en remplaçant les variables de la forme f_i^j par des variables o_i^j, et en adaptant les domaines de i et j en conséquence.

$$\bigwedge_{i \in F} \left(\bigvee_{j \in \mathcal{D}(i)} f_i^j \;\wedge \bigwedge_{\substack{j,k \in \mathcal{D}(i) \\ j \neq k}} (\neg f_i^j \vee \neg f_i^k) \right) \tag{7}$$

Afin d'assurer l'injectivité de υ et ν, on ajoute l'équation (8) pour les fluents, qui est aussi adaptée comme précédemment dans le cas des actions.

$$\bigwedge_{i \in F'} \bigwedge_{\substack{j,k \in F \\ j \neq k}} \neg f_j^i \vee \neg f_k^i \tag{8}$$

La propriété de morphisme est assurée par les formules (9) et (10), pour chaque $\mathcal{S} \in \mathcal{C} = \{\mathsf{pre}^+, \mathsf{pre}^-, \mathsf{eff}^+, \mathsf{eff}^-\}$. Plus précisément, (9) assure que, pour tout $\mathcal{S} \in \mathcal{C}$ et pour $o \in O$ quelconque, on a $\upsilon(\mathcal{S}(o)) \subseteq \mathcal{S}(\nu(o))$. Réciproquement, (10) nous assure que $\mathcal{S}(\nu(o)) \subseteq \upsilon(\mathcal{S}(o))$.

$$\bigwedge_{\substack{r \in O \\ s \in O'}} \left(o_r^s \longrightarrow \bigwedge_{i \in \mathcal{S}(r)} \bigvee_{j \in \mathcal{S}(s)} f_i^j \right) \tag{9}$$

$$\bigwedge_{\substack{r \in O \\ s \in O'}} \left(o_r^s \longrightarrow \bigwedge_{j \in \mathcal{S}(s)} \bigvee_{i \in \mathcal{S}(r)} f_i^j \right) \tag{10}$$

Finalement, il ne reste plus qu'à conserver l'état initial et le but (i.e., nous assurer du respect des équations (3) et (4)). On note alors I^+ (resp. I^-) l'ensemble des fluents positifs (resp. négatifs) dans I, et on utilise des notations similaires pour G, I' et G'. Pour chaque $\mathcal{T} \in \{I^+, I^-, G^+, G^-\}$, ainsi que pour l'ensemble $\mathcal{T}' \in \{I'^+, I'^-, G'^+, G'^-\}$ correspondant, on ajoute alors les formules suivantes :

$$\bigwedge_{i \in \mathcal{T}} \bigvee_{j \in \mathcal{T}'} f_i^j \quad \wedge \quad \bigwedge_{j \in \mathcal{T}'} \bigvee_{i \in \mathcal{T}} f_i^j \tag{11}$$

Les formules définies par (7), (8), et (11) sont immédiatement en FNC, et la taille de leur conjonction est un $\mathcal{O}(|F| \cdot |F'|^2 + |O| \cdot |O'|^2)$, avec l'hypothèse que $|F| \leq |F'|$ si $|O| \leq |O'|$ (sinon, la conclusion est immédiate). Par ailleurs, les formules définies par (9) et 10) peuvent être immédiatement converties en FNC en dupliquant les implications dans chaque clause. Elle ont alors une taille $\mathcal{O}(|O| \cdot |O'| \cdot |F| \cdot |F'|)$.
L'étape de pré-traitement présentée dans la Partie 5.1 nous permet de simplifier φ. En, effet, si l'on sait que le fluent $i \in F$ (resp. l'action $r \in O$) ne peut pas être assigné au fluent $j \in F'$ (resp. $s \in O'$), alors f_i^j (resp. o_r^s) est nécessairement faux dans tout modèle de φ. Ainsi, nos formules étant en FNC, toutes les occurrences positives de f_i^j peuvent être supprimées dans les clauses de φ, tandis que les clauses où f_i^j apparaît négativement peuvent être simplifiées.
Pour adapter l'algorithme précédent à SSI-H, il suffit de supprimer les formules de (11), et de conserver le reste des formules et de l'algorithme.

6 Évaluation empirique

L'Algorithme 1 a fait l'objet d'une implémentation en Python 3.10, ce qui nous a permis de le tester sur des instances de SSI et de SSI-H. L'analyse syntaxique a été confiée au module dédié de TouISTPlan [3], ce qui nous permet de convertir des instances de planification PDDL en une représentation STRIPS. Comme solveur SAT, nous avons eu recours à Maple LCM [12], gagnant du *main track* de la compétition SAT 2017. L'ensemble des ressources nécessaires à la reproduction des expériences présentées ici peut être trouvé sur la page web dédiée [1].
Les expériences ont été effectuées sur une machine fonctionnant sous Rocky Linux 8.5, dont le processeur était un Intel Xeon E5-2667 v3 processor, en utilisant au plus 8Go de mémoire vive et 4 threads par test.
Notre jeu de test est tiré de huit ensembles utilisés dans l'*International Planning Competition* : Blocks, Gripper, Hanoi, Rovers, Satellite, Sokoban, et TSP. Pour chacun de ces domaines, nous avons créé ce que l'on a nommé des *instances de morphismes STRIPS*, qui sont des paires d'instances du même domaine. Nous avons effectué cette opération pour chaque paire possible d'instances de planification, et ce pour chaque domaine pris en compte. Ainsi, une instance de morphisme STRIPS est à la fois une instance de SSI et une instance de SSI-H. Nous avons donc pu évaluer notre implémentation pour chacun de ces deux problèmes, sur le même jeu de tests.

1. https://github.com/arnaudlequen/PDDLIsomorphismFinder

©AFIA2022

Domaine	SSI-H		
	CP	NoCP	Simp. Moy.
blocks	172	96	76.1%
gripper	210	189	74.9%
hanoi	74	75	0.2%
rovers	19	6	97.4%
satellite	34	22	79.1%
sokoban	204	0	98.6%
tsp	376	374	0.7%

Domaine	SSI		
	CP	NoCP	Simp. Moy.
blocks	166	93	76.2%
gripper	90	84	75.1%
hanoi	85	82	0.2%
rovers	16	6	97.3%
satellite	38	23	78.4%
sokoban	205	4	98.6%
tsp	265	266	1.0%

TABLE 1 – Nombre d'instances de SSI-H et SSI pour lesquelles notre algorithme termine en moins de 600 secondes. Pour chaque problème, les deux premières colonnes présentent le nombre d'instance de morphisme STRIPS qui ont pu être résolues avec et sans, respectivement, l'étape de pré-traitement basée sur une propagation des contraintes. La dernière colonne montre le pourcentage moyen de clauses qui ont pu être éliminées dans l'encodage en FNC φ, grâce à l'étape d'élimination des associations.

L'objectif de ces évaluations expérimentales est double. D'une part, il s'agit de montrer que, malgré la difficulté théorique du problème, il est en pratique possible d'identifier un isomorphisme (homogène) de sous-instances en temps raisonnable, et ce pour des problèmes de tailles non-triviales. D'autre part, il s'agit de tester l'efficacité de notre technique de pré-traitement présentée en Partie 5.1, afin de montrer que le coût supplémentaire ne surpasse pas l'avantage qu'il donne à l'algorithme de recherche.

La couverture absolue de notre implémentation sur notre jeu de tests est présentée dans la Table 1 pour SSI et SSI-H. Le tableau montre le nombre d'instances du jeu de tests pour lesquelles notre implémentation termine avec les contraintes spatiales et temporelles allouées.

On remarque tout d'abord que les problèmes SSI-H et SSI sont souvent comparables en terme de difficulté, à quelques domaines près qui font figure d'exceptions. Parmi ces exceptions, on compte par exemple TSP et Gripper, pour lesquels relaxer la condition sur l'état initial et le but permet de résoudre, respectivement, 40% et 133% plus d'instances. Pour ces deux domaines, cela peut s'expliquer par les contraintes supplémentaires imposées par SSI. En effet, une de leurs conséquences immédiates est que toutes les paires d'instances différentes de TSP (ou de Gripper) sont des instances négatives de SSI, qui posent davantage de difficultés au solveur SAT que des instances positives.

De plus, les bénéfices de l'étape de pré-traitement dépassent presque toujours le coût de l'opération. En effet, l'immense majorité des instances que notre algorithme peut résoudre sans pré-traitement peuvent aussi être résolues une fois le pré-traitement activé. A plus forte raison, on peut surtout constater que le pré-traitement améliore grandement les performances générales de notre algorithme, tant et si bien que certains domaines, précédemment hors de portée pour notre algorithme, deviennent faisables. Parmi de tels cas extrêmes, on peut citer le domaine Sokoban, pour lequel notre algorithme est impuissant sans l'étape préalable d'élimination des associations inconsistantes. En effet, des 204 instances résolues par notre implémentation, aucune n'est résolue une fois le pré-traitement désactivé. Dans le cas général, cependant, on observe une augmentation du nombre d'instances résolues qui, sans pour autant changer d'ordre de grandeur, reste significatif. Par exemple, pour le domaine Satellite, dans le cas de SSI, 34 instances sont résolues lorsque la propagation de contraintes est activée, alors que seulement 22 peuvent être décidées sans pré-traitement.

Plus spécifiquement, pour presque toutes les instances de test, le pré-traitement permet une réduction non-négligeable de la taille de l'encodage propositionnel. C'est ce qui est montré dans les colonnes intitulées "Simp. Moy." dans la Table 1, qui représentent la proportion moyenne de clauses simplifiées grâce à l'étape d'élimination des associations inconsistantes. Les plus grands pourcentages de clauses simplifiées sont trouvés dans les domaines qui contiennent peu de symétries. Par exemple, pour le domaine Rovers, les fluents représentent des entités qui sont souvent de types différents, et qui sont donc affectés de manières très différentes par les actions. Cela peut s'illustrer par des actions de la forme navigate(rover, x, y), qui ont un profil qui leur est propre, et qui sont peu nombreuses. Par conséquent, leurs domaines respectifs sont de tailles très réduites, ce qui est très favorable à notre algorithme.

Au contraire, les domaines contenant un grand nombre de symétries ne profitent que très peu de l'élimination d'associations. C'est le cas du domaine Hanoi, pour lequel toutes les actions ont le même profil : à l'exception des informations données par l'état initial et le but, tous les disques sont *a priori* interchangeables, ce qui ne permet pas à notre pré-traitement d'obtenir des résultats significatifs. Les seuls fragments d'informations à mêmes de guider la phase de recherche se retrouvent dans l'état initial, ce que nous pensons être un argument permettant d'expliquer la couverture légèrement supérieur de SSI, comparé à SSI-H.

Pour certaines instances de notre jeu de test, le pré-traitement est suffisant pour conclure qu'il n'existe aucun isomorphisme (homogène) de sous-instances. Cela se produit lorsqu'une variable voit son domaine réduit à l'ensemble vide. Dans ce cas, l'algorithme peut alors faire l'économie de la phase de recherche entière. Ainsi, notre algorithme est plus efficace lorsqu'il s'agit de détecter qu'il n'existe aucun isomorphisme (homogène) de sous-instances. C'est ainsi que notre étape d'élimination des associations inconsistantes nous permet d'augmenter

Domaine	SSI-H			
	CP	Comp.	Résol.	Temps total
blocks	0.5	93.3	76.8	170.3
gripper	0.2	23.5	9.8	33.4
hanoi	0.3	43.9	78.0	122.0
rovers	1.8	168.9	2.2	171.4
satellite	0.4	116.4	48.8	165.4
sokoban	1.7	222.7	2.3	225.2
tsp	0.2	50.7	46.7	97.5

Domaine	SSI			
	CP	Comp.	Résol.	Temps total
blocks	0.4	83.3	94.6	178.1
gripper	0.1	11.2	35.2	46.5
hanoi	0.3	70.9	47.8	118.9
rovers	1.7	180.7	2.7	183.5
satellite	0.4	85.0	10.3	95.4
sokoban	1.7	220.6	1.4	222.3
tsp	0.1	14.6	26.6	41.2

TABLE 2 – Temps moyen, en secondes, passé dans chacune des trois étapes principales de l'algorithme : pré-traitement (CP), compilation vers SAT, et résolution, respectivement. La dernière colonne résume le temps total moyen utilisé par l'algorithme. Nous ne présentons ici que les résultats pour les instances qui ont pu être décidées avec succès (positivement ou négativement) : les résultats pour SSI-H et SSI sont donc non-comparables.

Domaine	SSI-H				
	Somme max.			$\lvert P\rvert$ max.	
	$\lvert P\rvert$	$\lvert P'\rvert$	Somme	$\lvert P\rvert$	$\lvert P'\rvert$
blocks	57	4642	4699	534	534
gripper	510	510	1020	510	510
hanoi	13	3328	3341	391	391
rovers	276	2667	2943	920	920
satellite	147	2066	2213	608	920
sokoban	2212	2286	4498	2212	2286
tsp	182	930	1112	462	462

Domaine	SSI-H				
	Somme max.			$\lvert P\rvert$ max.	
	$\lvert P\rvert$	$\lvert P'\rvert$	Somme	$\lvert P\rvert$	$\lvert P'\rvert$
blocks	57	4642	4699	534	534
gripper	510	510	1020	510	510
hanoi	13	6953	6966	391	513
rovers	276	2667	2943	920	920
satellite	147	2610	2757	608	920
sokoban	2212	2286	4498	2212	2286
tsp	90	930	1020	380	380

TABLE 3 – Tailles des plus grandes instances pouvant être résolues par notre implémentation, avec les contraintes spatiales et temporelles imposées, pour SSI-H et pour SSI. Dans les trois premières colonnes, on considère la somme des tailles des instances de planifications qui constituent le problème de morphisme STRIPS. Dans les colonnes suivantes, on considère la taille de P, plus petite instance parmi les deux formant l'instance de morphisme STRIPS.

grandement notre couverture des instances de morphismes STRIPS qui sont négatives, tandis que notre performances sur les instances positives est plus modeste, quoique significatif. Ces résultats sont compilés dans la Figure 1.

La Table 2 montre que le temps que prend l'étape de pré-traitement est négligeable devant le reste de l'algorithme. Plus précisément, que ce soit dans les domaines où elle élimine un grand nombre d'associations, ou dans les domaines où son efficacité est plus limitée, la propagation de contraintes prend rarement plus de quelques secondes. C'est ainsi que les instances où le pré-traitement permet de conclure sont résolues quasi-immédiatement.

Dans la Table 3, nous présentons quelques résultats concernant les tailles absolues des problèmes que nous avons été en mesure de résoudre. A chaque instance de planification STRIPS $P = \langle F, I, O, G\rangle$, on associe une taille $|P| = |F| + |O|$. Dans la mesure où une instance de morphisme STRIPS a deux dimensions principales, que l'on représente par les tailles respectives des instances de planification qui la constituent, on présente deux manières différentes de mesurer la taille d'une instance de SSI.

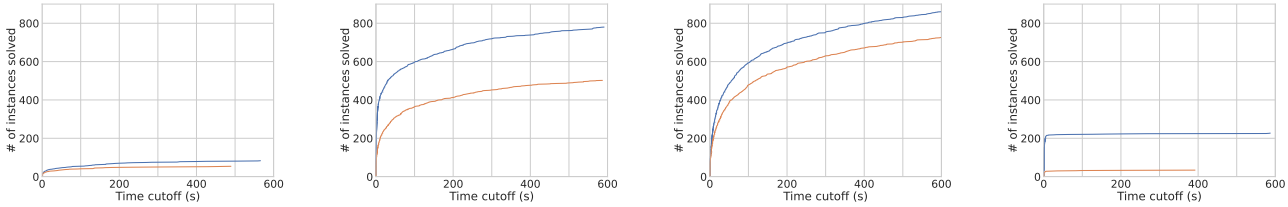
Dans les trois premières colonnes de la Table 3, pour une instance de morphisme STRIPS donnée, on considère la somme des tailles des deux instances de planification constituant l'instance, et on présente l'instance maximisant cette somme. Cependant, avec cette mesure, P' est souvent de taille disproportionnée par rapport à P. Ce déséquilibre peut être expliqué par le fait que l'encodage en une formule propositionnelle est de temps et de taille $\mathcal{O}(|O| \cdot |O'| \cdot |F| \cdot |F'|)$, comme mentionné précédemment. Dans les deux dernières colonnes, on considère l'ordre lexicographique sur les couples $(|P|, |P'|)$. On représente, pour chaque problème, l'instance maximisant cette métrique.

7 Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes tout d'abord intéressés au problème SI, qui traite de la synthèse d'un isomorphisme entre deux instances STRIPS, et nous avons montré sa GI-complétude. Ensuite, nous avons introduit la notion d'isomorphisme de sous-instance STRIPS, ainsi que les problèmes associés SSI et SSI-H. En sus de prouver la NP-complétude de ces deux problèmes, nous avons proposé un algorithme permettant de les résoudre, basé sur des techniques de propagation de contraintes, ainsi que sur une compilation vers SAT.

Notre évaluation expérimentale de cet algorithme a permis de montrer que des techniques classiques de propagation de contraintes, utilisées en pré-traitement, permettent d'améliorer grandement les performances d'un solveur SAT. Cela dit, bien que l'étape de pré-traitement en elle-même n'est que très peu coûteuse, tous les domaines de notre jeu de test n'en ont pas tiré le même parti.

©AFIA2022



(a) Instances SSI positives (b) Instances SSI négatives (c) Instances SSI-H positives (d) Instances SSI-H négatives

FIGURE 1 – Nombre d'instances SSI et SSI-H que notre implémentation peut résoudre, en fonction du temps laissé à l'algorithme. La courbe bleue (resp. orange) correspond au cas où le pré-traitement est activé (resp. désactivé).

De manière plus générale, notre travail fait office d'illustration d'un problème ouvert plus large, qui consiste à identifier quelles caractéristiques de problèmes de NP les rendent plus enclins à bénéficier de cette approche hybride entre programmation par contraintes et résolution SAT.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les relecteurs anonymes de cet article, dont les commentaires nous ont permis d'améliorer la forme et le fond de ce papier.

Références

[1] Jérôme Amilhastre, Hélène Fargier, and Pierre Marquis. Consistency restoration and explanations in dynamic csps application to configuration. *Artif. Intell.*, 135(1-2) :199–234, 2002.

[2] László Babai. Group, graphs, algorithms : the graph isomorphism problem. In *Proceedings of the International Congress of Mathematicians*, pages 3319–3336. World Scientific, 2018.

[3] Djamila Baroudi, Maël Valais, and Frédéric Maris. Touistplan.

[4] Tom Bylander. The computational complexity of propositional strips planning. *Artificial Intelligence*, 69(1-2) :165–204, 1994.

[5] Stephen A. Cook. The complexity of theorem-proving procedures. In Michael A. Harrison, Ranan B. Banerji, and Jeffrey D. Ullman, editors, *3rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 151–158. ACM, 1971.

[6] Martin C. Cooper, Arnaud Lequen, and Frédéric Maris. Isomorphisms between STRIPS problems and sub-problems. In *28th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2022) (To appear)*, 2022.

[7] Adnan Darwiche and Pierre Marquis. A knowledge compilation map. *J. Artif. Intell. Res.*, 17 :229–264, 2002.

[8] Richard Fikes and Nils J. Nilsson. STRIPS : A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artif. Intell.*, 2(3/4) :189–208, 1971.

[9] Malte Helmert. Complexity results for standard benchmark domains in planning. *Artificial Intelligence*, 143(2) :219–262, 2003.

[10] Henry A. Kautz and Bart Selman. Planning as satisfiability. In Bernd Neumann, editor, *ECAI 92*, pages 359–363. John Wiley and Sons, 1992.

[11] Songtuan Lin and Pascal Bercher. Change the world - how hard can that be ? On the computational complexity of fixing planning models. In Zhi-Hua Zhou, editor, *IJCAI-21*, pages 4152–4159, 8 2021.

[12] Mao Luo, Chu-Min Li, Fan Xiao, Felip Manyà, and Zhipeng Lü. An effective learnt clause minimization approach for cdcl sat solvers. In *IJCAI-17*, pages 703–711, 2017.

[13] Alan K Mackworth. Consistency in networks of relations. *Artificial intelligence*, 8(1) :99–118, 1977.

[14] Francesca Rossi, Peter Van Beek, and Toby Walsh. *Handbook of Constraint Programming*. Elsevier, 2006.

[15] Viktor N Zemlyachenko, Nickolay M Korneenko, and Regina I Tyshkevich. Graph isomorphism problem. *Journal of Soviet Mathematics*, 29(4) :1426–1481, 1985.

L'Humain dans l'Apprentissage Automatique Interactif : aperçu de l'état de l'art

Kevin Delcourt, Jean-Paul Arcangeli, Sylvie Trouilhet, Françoise Adreit

Université de Toulouse, IRIT, UT3, UT2J, Toulouse, France

{Prenom.Nom}@irit.fr

Résumé

Les systèmes d'Apprentissage Automatique Interactif, ou IML (Interactive Machine Learning), font coopérer un utilisateur humain et une machine apprenante afin d'accomplir les tâches souhaitées par l'humain. Nous proposons dans cet article un aperçu de l'état de l'art de l'intégration de l'humain dans ces systèmes. Pour cela nous réalisons une étude de la littérature récente sur les solutions d'apprentissage automatique avec l'humain dans la boucle, et identifions les moyens mis en oeuvre pour prendre en compte et assister l'humain.

Mots-clés

Apprentissage Automatique, Apprentissage Interactif, Humain dans la boucle, Apprentissage Supervisé, Apprentissage par Renforcement, Interaction Humain-IA, Système Multi-Agent

Abstract

Interactive Machine Learning (IML) systems involve the cooperation of a human user and a machine learner in order to accomplish the tasks desired by the human. We propose in this paper an overview of the state of the art of human integration in these systems. To do so, we conduct a survey of recent literature on machine learning solutions with the human in the loop, and identify the means implemented to take into account and assist the human.

Keywords

Machine Learning, Interactive Learning, Human-in-the-loop, Supervised Learning, Reinforcement Learning, Human-AI Interaction, Multi-Agent System

1 Contexte

Dans le cas de problèmes complexes pour lesquels la programmation d'une solution n'est pas faisable à des coûts raisonnables, l'apprentissage automatique est la méthode de référence pour construire une solution. Pour cela, il est nécessaire de faire participer un expert en apprentissage au processus de développement de ces solutions. Or, d'après Amershi et al. [3], la demande en applications d'apprentissage automatique est bien supérieure à l'offre en compétences dans ce domaine.

Pour pallier ce manque, plusieurs approches proposent de permettre à des utilisateurs humains souvent sans connaissances en apprentissage automatique de répondre par eux-mêmes à leurs besoins. Ces approches sont regroupées sous le terme d'Apprentissage Automatique Interactif, ou IML (*Interactive Machine Learning*). Elles permettent par ailleurs d'alléger le travail d'experts en apprentissage.

1.1 Apprentissage Automatique Interactif

Définition. Fails et Olsen Jr [16] définissent l'IML comme le domaine de l'apprentissage automatique dans lequel tout ou une partie des données exploitées par l'apprentissage provient des interactions avec un utilisateur humain du système : un humain, le plus souvent dépourvu de compétences en apprentissage automatique, interagit avec un système d'IML pour produire une solution répondant à ses besoins.

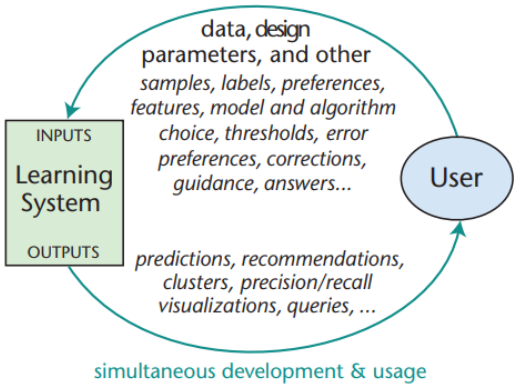


FIGURE 1 – Processus d'un système d'IML, extraite de [3]

Processus itératif. Le fonctionnement généralisé d'un système d'IML, décrit dans la figure 1, est itératif : l'humain fournit les divers paramètres, préférences ou plus généralement toute donnée demandée par l'apprenant (*i.e.* la machine) pour son fonctionnement. Ce dernier présente en retour le résultat de son apprentissage à l'humain, par exemple des recommandations ou des prédictions. L'humain doit alors déterminer si les résultats présentés par l'apprenant sont satisfaisants par rapport à l'objectif à atteindre. Le processus se répète jusqu'à ce que l'humain soit satisfait.

©AFIA2022

Applications. Les applications d'IML permettent par exemple de produire un classifieur d'images [7] ou de texte [24], d'entraîner un robot à réaliser des tâches de manutention [8] ou de proposer des recommandations sur la base des actions de l'utilisateur [1].

1.2 Composition Logicielle Opportuniste

Nous avons été amenés à nous intéresser à l'IML par le biais de notre problématique de fond : la composition logicielle opportuniste dans le cadre de l'intelligence ambiante.

Intelligence Ambiante. L'intelligence ambiante a pour objectif d'offrir à un utilisateur humain un environnement physique et logiciel personnalisé et adapté à sa situation et à ses besoins [25]. Les principales difficultés à surmonter proviennent de la dynamique, de l'ouverture et de l'imprévisibilité des systèmes ambiants, induites par la mobilité des appareils et des utilisateurs. Le nombre de composants présents dans l'environnement est une autre source de complexité. Pour proposer des applications utiles et utilisables, les solutions doivent donc être capables de prendre en compte le contexte opérationnel et ses changements, notamment les préférences et les besoins de l'utilisateur ainsi que leurs évolutions.

Composition Opportuniste. Notre projet de recherche vise à concevoir et à développer une solution qui intègre l'utilisateur humain dans la boucle et fait émerger de nouvelles fonctionnalités dans un environnement ambiant. Il s'agit de construire, pour un humain, les bonnes applications au bon moment sans qu'il doive explicitement les demander. Notre solution utilise un apprentissage par renforcement [28], distribué au sein d'un système multi-agent (SMA), qui tire parti de retours de l'utilisateur pour construire une connaissance sur ses choix préférentiels en fonction des composants présents dans l'environnement.

Prototype. Un modèle de composition opportuniste a été conçu et un prototype logiciel a été développé [32, 22]. Une démonstration de ce dernier sur la base d'un cas d'utilisation est présentée dans [12]. Le fonctionnement itératif du moteur de composition opportuniste OCE (*Opportunistic Composition Engine*) est décrit dans la figure 2 : OCE sonde l'environnement de l'humain ; son SMA assemble ensuite une application qui est proposée à l'humain pour validation ; enfin, l'interface de visualisation de l'assemblage, ICE (*Interactive Control Environment*) [22], permet à l'humain d'accepter, de modifier ou de rejeter la proposition d'OCE. Cette action constitue le retour d'information qui est la source d'apprentissage pour les agents du SMA d'OCE.

1.3 Problématique

Notre solution de composition logicielle opportuniste est un exemple de système d'Apprentissage Automatique Interactif. Nous y retrouvons en effet un processus itératif avec, dans la boucle, un humain et une machine apprenante. L'humain occupe ici une place essentielle : en interaction avec le système apprenant, il est la principale source de l'apprentissage et c'est pour lui que l'apprenant opère.

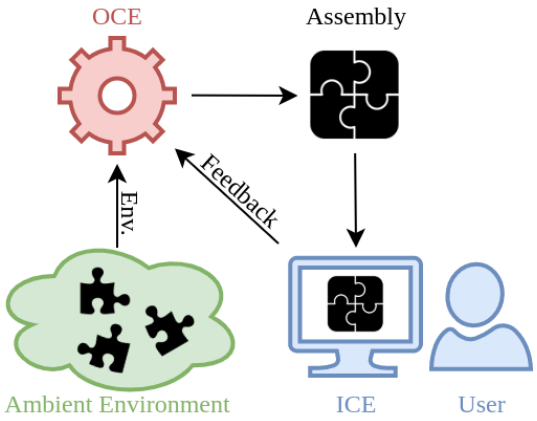


FIGURE 2 – Composition Logicielle Opportuniste

Alors qu'une bonne intégration de l'humain est indispensable à une solution d'IML de qualité [3], la question de la place de l'humain dans notre système n'a pas été approfondie jusqu'à présent.

Plusieurs questions se posent quant à l'intégration de l'humain dans la composition logicielle opportuniste :

- Comment informer l'utilisateur de manière appropriée par rapport à ses capacités sur les applications que fait émerger le moteur de composition ?
- Comment faire contribuer l'utilisateur au système de manière à améliorer l'apprentissage ?
- Comment faire en sorte que ces interactions ne sollicitent pas trop l'utilisateur ?

Des réponses partielles existent dans OCE, comme les options de visualisation de ICE. Notre objectif est de proposer d'autres éléments de réponse. Pour cela, les questions de recherche définies dans la section suivante vont guider notre lecture des contributions récentes du domaine de l'IML.

1.4 Questions de recherche

Nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

QR1-Humain. Quels sont le rôle et les responsabilités de l'utilisateur dans la boucle ?

- **QR11-Tâches.** Quelles tâches l'humain doit-il accomplir ? Pour accomplir ces tâches, quelle est la part de compétences en apprentissage automatique ?
- **QR12-Charge.** Quelle charge est imposée à l'humain ? Quel niveau d'engagement ou d'implication est attendu ?

QR2-Apprenant. Comment l'humain est-il pris en compte par la machine apprenante ?

- **QR21-Information.** Quelles sont les informations fournies par l'humain ? Comment et quand sont-elles considérées dans le processus ?
- **QR22-Assistance.** Comment le système accompagne-t-il et assiste-t-il l'humain ?

La section 2 présente notre lecture de la littérature récente par rapport à ces questions. La section 3 synthétise et analyse les réponses à ces questions.

2 Relations entre humain et machine apprenante

Afin de répondre aux questions de recherche élicitées dans la section 1.4, nous avons identifié des contributions scientifiques pertinentes dans la littérature récente du domaine l'IML. Sur la base de 32 articles traitant de différents sujets relatifs à des applications d'IML avec l'humain dans la boucle, nous avons sélectionné 12 contributions pertinentes par rapport à la question de la co-construction humain-machine d'applications. D'autres travaux d'état de l'art sur l'IML ou des domaines connexes ont été publiés [9, 10, 14, 20, 23, 33] mais ils ne ciblent pas la place de l'humain dans la boucle.

Dans cette section, nous présentons les contributions sélectionnées. Nous résumons chacune d'entre elles puis répondons aux quatre questions de recherche. Nous présentons d'abord les travaux d'apprentissage supervisé interactif, qui est à notre connaissance le plus étudié dans la littérature, puis les travaux d'apprentissage par renforcement interactif, plus proches de notre problématique. Nous terminons par les contributions traitant d'autres types d'apprentissage.

2.1 Apprentissage Supervisé

Les travaux sélectionnés sur l'apprentissage supervisé interactif concernent la production par l'humain de classifieurs d'image, de texte, ou de mouvements. La première contribution présentée concerne une approche particulière d'IML, la deuxième une étude, et les suivantes des outils.

2.1.1 Enseignement Automatique Interactif

Défini par Ramos et al. [24], l'Enseignement Automatique Interactif (*Interactive Machine Teaching*) est une approche d'IML dans laquelle l'humain joue le rôle d'un professeur, et doit enseigner une tâche à la machine. La notion d'enseignement regroupe ici le choix des informations à la source de l'apprentissage, et l'évaluation des performances de l'apprenant. L'hypothèse de fond est que l'humain acquiert plus facilement des compétences en pédagogie qu'en apprentissage automatique, ces compétences étant plus répandues dans le grand public [30].

Simard et al. [27] font un parallèle entre l'Enseignement Automatique Interactif et la programmation en général. Les deux activités partagent par exemple le fait de produire un artefact (un modèle appris ou un programme) répondant aux besoins d'un ou plusieurs humains. Cette comparaison amène les auteurs à penser que, à l'instar de la programmation qui a bénéficié d'outils et de langages de haut niveau, l'IML a besoin de ses propres outils et abstractions pour faciliter le travail des humains.

Les concepts et processus étudiés dans le cadre de l'Enseignement Automatique Interactif sont applicables à tout paradigme d'apprentissage. Néanmoins, les auteurs présentent une application de démonstration, appelée PICL [24] (anciennement MATE [30]), qui applique les principes de l'Apprentissage Automatique Interactif à l'apprentissage supervisé en permettant à des utilisateurs d'enseigner des tâches de classification de texte. Nous répondons aux questions de recherche pour cette application.

QR11-Tâches. L'humain, jouant ici le rôle d'un enseignant, doit planifier un curriculum, puis le mettre à jour en fonction des résultats de l'apprenant. Un curriculum désigne les données (exemples, étiquettes) exploitées par l'apprenant. Les compétences demandées sont plus de l'ordre de la pédagogie que de l'apprentissage automatique.

QR12-Charge. Demander à l'humain de déterminer quels sont les exemples les plus pertinents ou quels concepts enseigner l'implique fortement dans le processus. De plus, il doit être capable de comprendre si les résultats de l'apprenant sont satisfaisants ou non.

QR21-Information. Les labels et les concepts fournis par l'humain sont la source de l'apprentissage supervisé.

QR22-Assistance. L'interface des outils présentés [24] assistent l'humain en lui permettant de visualiser efficacement les résultats de l'apprenant. Une étude du comportement d'experts en apprentissage supervisé [30] a également permis d'identifier de bonnes pratiques d'enseignement automatique, implantées sous la forme de notifications.

2.1.2 Étude sur la confiance dans l'IML

L'étude menée par Honeycutt et al. [19] porte sur la question de la confiance de l'humain dans les applications d'apprentissage automatique. Elle se base sur des résultats en psychologie [29] qui montrent que la confiance d'un individu envers un groupe décisionnel humain augmente si un avis émis par l'individu, est pris en compte par le groupe. Inversement, l'individu aura moins confiance si son avis est ignoré. L'objectif de l'étude est de retrouver ces résultats en remplaçant le groupe décisionnel humain par un apprenant automatique, ici une application d'apprentissage supervisé de reconnaissance de visages dans des images.

L'expérimentation menée en ligne a mesuré la confiance d'utilisateurs humains envers cette application avec ou sans interaction d'une part, et avec une performance croissante, constante ou décroissante de l'apprenant d'autre part. Concrètement, la moitié des participants devait corriger les erreurs de l'apprenant, et la fréquence de ces erreurs était croissante pour un tiers, constante pour un autre tiers et décroissante pour le dernier.

Les résultats montrent qu'en général le groupe en interaction a moins confiance dans le système que le groupe qui n'est pas en interaction. L'explication avancée par les auteurs est que le groupe en interaction a passé plus de temps focalisé sur les erreurs du système pour les corriger.

Nous répondons aux questions de recherche pour l'application de reconnaissance de visages exploitée dans le cadre de l'expérimentation.

QR11-Tâches. Les compétences attendues pour les utilisateurs sont uniquement relatives à la tâche concernée : la reconnaissance de visage.

QR12-Charge. En dehors de la tâche de vérification des sorties de l'apprenant, l'utilisateur est faiblement impliqué.

QR21-Information. L'application simulée prend en compte les retours des utilisateurs sur ses erreurs afin d'affiner son modèle.

©AFIA2022

QR22-Assistance. Les utilisateurs sont volontairement peu accompagnés afin de pouvoir mesurer leur appréciation subjective de la performance de l'application, qui est une mesure proportionnelle à la confiance ressentie [31].

2.1.3 Classication d'image, son et postures

Carney et al. [7] présentent l'outil Teachable Machine de Google [1] permettant à des utilisateurs finaux de construire un classifieur d'images, de sons, ou de postures du corps humain. L'outil s'adresse à des utilisateurs novices en ML, avec possiblement des compétences en codage, puisque les modèles peuvent être exportés dans le langage JavaScript.
Afin de faciliter la tâche des utilisateurs, un transfert d'apprentissage a été mis en place : l'entraînement d'un nouveau modèle par l'humain est fait sur la base d'un modèle de base polyvalent, entraîné en amont par les développeurs de l'application.

QR11-Tâches. Ici l'humain a la charge de sélectionner les concepts à enseigner, et de recueillir les différents exemples (*i.e.* les images) associés. Il doit observer et juger lui-même les résultats de l'apprenant, donc fournir les données de test.

QR12-Charge. Il intervient à chaque étape de la production du modèle appris, du choix des données d'entraînement à l'évaluation de l'apprenant. Cela l'implique fortement.

QR21-Information. Les entrées fournies par l'humain, sous la forme d'images étiquetées, permettent de personnaliser le modèle de base fourni par l'application en fonction des besoins. Il est également possible de modifier les paramètres avancés de l'apprenant.

QR22-Assistance. L'interface guide l'utilisateur dans les différentes étapes de production du modèle. De plus, elle cache dans un premier temps les réglages avancés de l'apprenant, afin que l'investissement pour produire un modèle soit le plus faible possible.

2.1.4 Reconnaissance de formes

Fails et Olsen Jr [16] proposent à un humain de produire un système de reconnaissance de formes, au moyen d'une application d'IML appelée Crayons. Via une interface, l'humain colorie (*i.e.* étiquette) des portions de l'image qu'il souhaite que l'apprenant classifie. Ce dernier propose ensuite une classification de l'ensemble de l'image à l'humain, qui peut affiner son étiquetage pour corriger les éventuelles erreurs de Crayons.
Les auteurs discutent les différentes exigences liées à l'IML, en particulier le fait que l'apprentissage doit se faire le plus rapidement possible pour ne pas décourager l'humain. Par rapport à ces exigences, ils identifient les arbres de décision comme étant la meilleure approche, étant donné un temps d'apprentissage plus court malgré de moins bonnes performances que d'autres méthodes comme les réseaux de neurones. Notons cependant que cette conclusion n'est peut-être plus d'actualité étant donné l'ancienneté de cet article (2003).

QR11-Tâches. L'humain doit savoir déterminer sur l'image les classes à identifier (par exemple la peau) et en colorier une partie.

1. https://teachablemachine.withgoogle.com/

QR12-Charge. L'humain n'a pas à colorier avec exactitude les zones à classifier, ce qui évite donc de le surcharger mentalement. Il doit cependant affiner cet étiquetage jusqu'à ce que les résultats lui conviennent.

QR21-Information. L'image fournie par l'humain et les étiquettes qu'il appose en coloriant sont la source de l'apprentissage supervisé.

QR22-Assistance. L'étiquetage par coloriage permet de simplifier la tâche de l'humain. En dehors de cela, l'humain n'est pas particulièrement accompagné.

2.1.5 Classification d'images médicales

Berg et al. [5] présentent Ilastik, un outil d'Apprentissage Automatique Interactif pour la classification d'images dans le domaine médical. Ilastik permet à un expert du domaine médical de produire un classifieur d'images, de manière similaire à Crayons (section 2.1.4). Il est cependant plus complet, prenant en compte des données jusqu'à 5 dimensions (3 pour l'espace, 1 pour le temps, et 1 pour la multiplicité des points de vue). L'outil propose également à l'humain un choix parmi sept modes de classification d'images, qui impliquent différentes interactions avec l'humain. Par exemple, la manière d'étiqueter les exemples fournis par l'humain change en fonction de l'algorithme choisi (coloriage, clic sur des formes à détecter, etc.).

QR11-Tâches. Outre des compétences dans le domaine médical, l'humain doit savoir choisir, en fonction de son objectif, quel mode de classification utiliser. Il doit ensuite fournir et annoter des exemples représentatifs.

QR12-Charge. La multitude des modes de classification proposés, qui impliquent chacun des actions différentes de la part de l'humain, font que ce dernier doit être fortement investi dans l'application afin de la maîtriser.

QR21-Information. Les exemples annotés fournis par l'utilisateur sont la seule source d'entraînement.

QR22-Assistance. Si ce n'est la documentation disponible en ligne, l'humain est peu accompagné pour accomplir sa tâche. Une bibliothèque de modèles pré-entraînés est proposée, sans pouvoir toutefois modifier ces modèles pour les adapter à une tâche particulière.

2.1.6 Détection de l'activité

Flutura et al. [17] ont développé Drinkwatch, une application embarquée dans une montre connectée permettant à des humains de suivre leur consommation de boissons. Pour cela, l'application apprend les habitudes de consommation de l'humain via les capteurs de la montre.

QR11-Tâches. Tout le long de son activité, l'humain est sollicité pour valider ou invalider certaines activités détectées par la montre, c'est-à-dire qu'il collabore pour détecter les faux positifs. Il doit également signaler quand une activité n'a pas été détectée, c'est-à-dire les faux négatifs.

QR12-Charge. L'humain est sollicité uniquement quand l'application a un degré de confiance faible dans son classement, afin d'éviter de surcharger l'humain. Il reste cependant impliqué étant donné qu'il doit être vigilant aux faux négatifs et positifs de l'application.

QR21-Information. L'apprentissage se base sur les mouvements détectés par la montre et les retours de l'humain.

QR22-Assistance. Outre le fait que l'application sollicite le moins possible l'humain, des notifications sonores signalent la détection d'une activité par Drinkwatch afin de faciliter le travail de l'utilisateur.

2.2 Apprentissage par Renforcement

Les différents projets de recherche sélectionnés ici proposent des approches indépendantes de tout domaine d'application : tous permettent à un humain d'entraîner un agent (robot virtuel ou réel) à effectuer une tâche.

2.2.1 Apprendre d'humains inattentifs

Kessler Faulkner et Thomaz [21] s'intéressent au problème de l'inattention des utilisateurs humains. Pour cela, ils considèrent un cas d'utilisation où un humain doit enseigner des actions à un robot. L'humain observe le robot agir et peut récompenser positivement les actions du robot qui lui conviennent. Le robot a alors le choix entre l'exploitation d'actions qu'il sait satisfaisantes pour l'humain, et l'exploration de nouvelles actions à la récompense incertaine.
Ainsi, en faisant l'hypothèse que l'agent apprenant sache détecter l'absence d'attention de l'humain, les auteurs proposent que l'agent favorise l'exploitation quand l'humain est inattentif, et l'exploration dans le cas contraire. Plutôt que de demander l'attention de l'humain, ce qui peut conduire à une expérience utilisateur négative, le robot tire parti au maximum de l'attention disponible.

QR11-Tâches. L'humain doit surveiller les actions de l'apprenant et récompenser via une interface simple celles qui lui conviennent.

QR12-Charge. Bien que la surveillance de l'apprenant a tendance à fortement mobiliser l'humain, le fait qu'une baisse d'attention n'ait pas de conséquence néfaste pour l'apprenant est bénéfique pour l'expérience utilisateur.

QR21-Information. Les récompenses données par l'utilisateur sont celles de l'apprentissage par renforcement que l'apprenant cherche à maximiser.

QR22-Assistance. Ici, l'humain n'est pas accompagné.

2.2.2 Apprendre malgré des retours erronés

Akrour et al. [2] présentent une approche de l'apprentissage par renforcement interactif nommée programmation par feedback. Toujours dans un contexte d'humain récompensant les actions d'un apprenant, une particularité de cette approche est que l'apprenant estime le taux d'erreur de l'humain, c'est-à-dire une estimation de la probabilité que le retour donné par l'humain soit faux. Ainsi les avis de l'humain qui semblent être à l'opposé d'avis précédents sont ignorés.

QR11-Tâches. Après chaque séquence d'actions de l'apprenant, l'humain doit comparer la dernière séquence avec la meilleure séquence parmi les précédentes, et choisir celle qui correspond le mieux à la tâche à réaliser. Il doit donc uniquement savoir évaluer le comportement de l'apprenant dans sa globalité.

QR12-Charge. L'humain doit étudier chaque séquence d'actions de l'apprenant, ce qui demande une implication forte.

QR21-Information. Les comparaisons produites par l'humain permettent à l'apprenant d'estimer une fonction de récompense qu'il essaye de maximiser par ses actions.

QR22-Assistance. Ici, l'humain est peu accompagné dans son évaluation des séquences d'actions.

2.2.3 Apprentissage profond par renforcement

Christiano et al. [11] ont conçu un algorithme d'apprentissage profond par renforcement à partir de retours humains. Pour modeler un réseau de neurones sur la base des retours de l'humain, l'apprenant soumet à l'humain de courtes séquences d'actions à comparer. Cette comparaison est la source d'apprentissage d'une fonction de récompense que l'algorithme cherche en permanence à optimiser.
Les auteurs ont expérimenté leur solution sur plusieurs cas d'utilisation via la plateforme OpenAI Gym [6]. Dans les cas où les fonctions de récompenses sont connues, la solution a pu être comparée avec un algorithme d'apprentissage par renforcement classique et dans certains cas elle atteint de meilleurs résultats. Nous notons cependant qu'un seul utilisateur humain a participé aux expérimentations, ce qui limite la portée des conclusions.

QR11-Tâches. Ici l'utilisateur doit comparer deux séquences d'actions et décider de la meilleure par rapport à son objectif.

QR12-Charge. Le fonctionnement asynchrone apprenant-humain fait que moins de 1% des actions de l'apprenant sont jugées par l'humain. La charge qui lui incombe est donc réduite.

QR21-Information. Les retours de l'humain permettent de mettre à jour la fonction de récompense de l'algorithme.

QR22-Assistance. L'interface offre des raccourcis clavier facilitant l'interaction de l'humain.

2.3 Autres travaux

2.3.1 Apprentissage interactif pour l'optimisation

Holzinger et al. [18] présentent une expérimentation comparant des approches d'apprentissage avec et sans assistance humaine dans le cadre de résolution de problèmes du voyageur de commerce.
Sur la base d'un système multi-agent de colonie de fourmis (*Ant Colony Optimization*) [13], deux solutions, faisant participer ou non l'humain ; sont comparées. Dans l'étude présentée, l'ajout de l'humain en assistance du système multi-agent améliore les résultats de l'algorithme d'optimisation.

QR11-Tâches. L'utilisateur agit ici de manière implicite sur l'apprentissage : l'interface utilisée prend la forme d'un jeu. On lui demande donc simplement de jouer sans l'informer du système multi-agent qu'il influence.

QR12-Charge. Il est faiblement impliqué, car il n'est pas informé de l'apprentissage, ni de ses résultats.

QR21-Information. Les actions de l'humain dans le jeu ont pour effet d'aider le système multi-agent.

©AFIA2022

QR22-Assistance. Ici, l'humain n'est pas accompagné mais il n'a pas à l'être puisque sa contribution n'est pas explicite : il n'est pas informé de l'algorithme en arrière-plan.

2.3.2 Recommandation de lecture

Schnabel et al. [26] font une étude de plusieurs interfaces pour une même application de recommandation d'articles à lire. Ils s'intéressent à la visibilité qu'a un utilisateur sur l'effet de son action (*i.e.* sélectionner ou non un article à lire) sur l'apprentissage et les actions futures de l'apprenant (*i.e.* les futures recommandations). L'objectif est de mesurer l'impact de cette visibilité sur l'efficacité des utilisateurs mesurée en nombre de bonnes recommandations acceptées par l'humain en un temps donné. L'étude s'intéresse également à l'expérience utilisateur ressentie.
Pour répondre aux questions de recherche nous nous intéressons à la version de l'application préférée des utilisateurs lors de l'étude. Dans cette dernière les conséquences de la sélection d'un article à lire sont mises en valeur pour l'humain avant même que l'action soit effectuée. C'est-à-dire qu'au survol d'un article par la souris, les modifications que son ajout apporterait à la liste de des recommandations sont affichées en surbrillance.

QR11-Tâches. L'utilisateur doit sélectionner des articles à lire parmi des recommandations. Il doit juger de la pertinence de ces articles en fonction de ses goûts.

QR12-Charge. Le niveau d'implication de l'humain est faible compte tenu de la tâche à effectuer. Dans le cadre de l'expérimentation, une contrainte de temps a été instaurée, qui ajoute une certaine charge mentale aux humains.

QR21-Information. Les actions de l'utilisateur, d'ajouter un article à leur liste de lecture sont la base de la personnalisation du système de recommandation.

QR22-Assistance. La pré-visualisation de l'impact des actions de l'humain est une assistance qui a été fortement appréciée lors de l'étude. Elle a permis au groupe concerné d'être plus efficace dans le choix d'articles.

2.3.3 Lignes directrices pour tout type d'application

Amershi et al. [4] proposent 18 lignes directrices pour la conception des modalités d'interaction des applications d'Apprentissage Automatique Interactif. L'objectif est d'aider les concepteurs à éviter les expériences utilisateurs négatives dues à une interface mal conçue.
Afin de produire ces lignes directrices, les auteurs sont partis d'une étude de la littérature des 20 dernières années sur le sujet. Cette étude a fait ressortir 168 recommandations spécifiques, qui ont été regroupées, filtrées et raffinées pour arriver à 18 propositions. Ce processus de raffinage a consisté en une étude auprès de praticiens et d'experts en IHM, qui ont apprécié la pertinence de ces lignes directrices dans diverses applications d'Apprentissage Automatique Interactif disponibles dans le commerce.
Ces lignes directrices générales constituent une aide pertinente aux professionnels de l'IHM. On y retrouve par exemple le fait d'expliquer clairement les conséquences des actions de l'humain sur l'apprenant, ou inversement d'expliquer comment une décision a été prise par la machine.

QR22-Assistance. Les lignes directrices aident à mettre au point un accompagnement qui allège l'utilisateur.
Étant donné l'aspect généraliste de ces recommandations, nous ne pouvons pas répondre aux autres questions de recherche pour cette contribution.

3 Analyse et conclusion

3.1 Réponses aux questions de recherche

La table 1 synthétise les niveaux de réponses aux quatre questions élicitées section 1.4. Pour chacune, nous discutons des éléments importants ou originaux trouvés dans la littérature.

Contribution	QR11	QR12	QR21	QR22
Ramos et al. [24]	+	-	+	++
Honeycutt et al. [19]	++	++	-	-
Carney et al. [7]	+	+	++	+
Fails et Olsen Jr [16]	+	+	-	-
Berg et al. [5]	-	-	++	-
Flutura et al. [17]	+	+	+	+
Kessler et al. [21]	++	+	+	-
Akrour et al. [2]	+	-	-	-
Christiano et al. [11]	+	+	-	+
Holzinger et al. [18]	++	++	-	-
Schnabel et al. [26]	+	+	+	++
Amershi et al. [4]	N/A	N/A	N/A	++

TABLE 1 – Synthèse des niveaux de réponses aux différentes questions de recherche. L'échelle "-" à "++" indique le niveau de réponse à une question. N/A = Non Applicable.

QR11-Tâches. Les applications d'IML sont variées, par conséquent les tâches demandées à l'humain le sont aussi : enseigner, superviser, reconnaître une image, choisir parmi une liste de propositions... La colonne QR11 indique en quoi ces tâches sont propres au métier et non à l'apprentissage automatique.
De manière générale, peu de compétences en apprentissage sont requises dans les contributions présentées (+ ou ++).
Malgré tout, les contributions notées + demandent à l'humain de manipuler des concepts propres à l'apprentissage automatique, par exemple des étiquettes dans l'apprentissage supervisé [24, 7, 16, 17] et des séquences d'actions dans l'apprentissage par renforcement [2, 11].
Enfin, Ilastik [5] demande à l'humain une familiarité avec différents algorithmes de reconnaissance d'images. Cette tâche relève fortement du domaine de l'apprentissage.

QR12-Charge. La colonne QR12 donne une évaluation de la charge et de l'implication demandées à l'humain : elle est modérée (notée +) dans la moitié des applications. Les applications où l'humain est le moins surchargé sont celles où la tâche demandée à l'utilisateur est la plus simple : pointer les erreurs d'un apprenant [19] ou alimenter indirectement l'apprentissage [18].

QR21-Information. L'apprenant exploite de diverses manières les informations fournies par l'humain. La colonne QR21 indique le niveau de complexité de l'interven-

tion de l'humain. Les contributions notées - ne proposent qu'une seule manière pour l'humain d'interagir, comme par exemple l'avis sur les actions de l'apprenant dans [11].

À l'inverse, les contributions notées ++ proposent des interactions plus riches donnant plus de possibilités pour l'humain d'influer sur l'apprentissage machine. Il est par exemple possible dans [7] d'agir plus en profondeur dans le paramétrage de l'apprenant, ce qui nécessite plus de compétences en apprentissage de la part de l'humain. Certaines sources d'interaction implicites, comme le survol de la souris [26] ou la détection de l'attention [21] permettent également à l'humain d'agir plus indirectement sur l'apprenant.

QR22-Assistance. La colonne QR22 donne le niveau d'assistance qu'apporte l'application d'IML à l'humain : il est faible pour la majorité des applications. À l'exception des travaux de Honeycutt et al. [19] (assistance volontairement minimale) et de Holzinger et al. [18] (assistance non nécessaire), une meilleure assistance pourrait être profitable.

3.2 Positionnement et contributions

Pour terminer, nous discutons quelques principes particulièrement intéressants pour la conception d'interactions humain-IA en général. Ils constituent également pour nous des futures pistes de réflexion pour la composition logicielle opportuniste.

Utiliser des lignes directrices. Les lignes directrices proposées par Amershi et al. [4], bien que générales, permettent d'identifier des pistes pour faciliter le travail de l'humain. Par exemple, le fait de permettre à l'humain de pré-visualiser les conséquences de ses actions [26].

Entraîner l'apprenant avec des experts en apprentissage. Une approche également intéressante est d'observer des utilisateurs experts en apprentissage afin d'en tirer des recommandations, implantées par la suite sous forme de notifications [30]. Cela participe à former les humains inexpérimentés aux particularités d'une application avec un apprenant dans la boucle.

Opérer des transferts de connaissances. Il est aussi possible de permettre aux humains de partager leurs modèles, comme ce qui est présenté dans [5]. Récupérer un modèle existant répondant à une tâche proche de celle que l'on souhaite résoudre, puis le spécialiser (ce que proposent Carney et al. [7]) semble constituer un moyen intéressant de tirer parti d'un grand nombre d'utilisateurs. Ce principe pourrait permettre de prendre en compte l'apparition de composants jusque là inconnus dans l'environnement ambiant, ainsi que la personnalisation face à un nouvel utilisateur.

Prendre en compte les changements d'objectifs, de préférences de l'humain. Dans la majeure partie des contributions, l'humain interagit avec un apprenant automatique pour une tâche clairement définie et la possibilité qu'elle change avec le temps n'est pas envisagée.

Par exemple, dans les approches proposées dans [2] et [21], un changement d'objectif de l'humain entraînera des données possiblement contradictoires pour l'apprentissage, qui seront traitées comme des erreurs.

Dans les approches basées sur la construction de classifieurs d'images ou de texte [5, 7, 24, 16], l'humain doit construire un nouveau modèle si son objectif change, éventuellement en modifiant les données d'entraînement d'un modèle existant. Les solutions d'IML pourraient pourtant être sensibles à la dynamique pour continuer à travailler correctement en cas de changements.

Utiliser la participation implicite comme source d'apprentissage. La participation implicite [15], telle que la prise en compte des mouvements de la souris [21], peut enrichir l'apprentissage sans surcharger l'humain ou le contraindre à acquérir de nouvelles compétences (par exemple en pédagogie pour [24]).

Références

[1] M. Aamir and M. Bhusry. Recommendation system : state of the art approach. *International Journal of Computer Applications*, 120(12), 2015.

[2] R. Akrour, M. Schoenauer, M. Sebag, and J.-C. Souplet. Programming by feedback. In *Int. Conf. on Machine Learning*, volume 32, pages 1503–1511. JMLR. org, 2014.

[3] S. Amershi, M. Cakmak, W. B. Knox, and T. Kulesza. Power to the people : The role of humans in interactive machine learning. *Ai Magazine*, 35(4) :105–120, 2014.

[4] S. Amershi, D. Weld, M. Vorvoreanu, A. Fourney, B. Nushi, P. Collisson, J. Suh, S. Iqbal, P. N. Bennett, and K. Inkpen. Guidelines for human-AI interaction. In *Proc. of the 2019 CHI conf. on human factors in computing systems*, pages 1–13, 2019.

[5] S. Berg, D. Kutra, T. Kroeger, C. N. Straehle, B. X. Kausler, C. Haubold, M. Schiegg, J. Ales, T. Beier, and M. Rudy. Ilastik : interactive machine learning for (bio) image analysis. *Nature Methods*, 16(12) : 1226–1232, 2019.

[6] G. Brockman, V. Cheung, L. Pettersson, J. Schneider, J. Schulman, J. Tang, and W. Zaremba. OpenAI Gym. *arXiv preprint arXiv :1606.01540*, 2016.

[7] M. Carney, B. Webster, I. Alvarado, K. Phillips, N. Howell, J. Griffith, J. Jongejan, A. Pitaru, and A. Chen. Teachable machine : Approachable Web-based tool for exploring machine learning classification. In *Extended abstracts of the 2020 CHI Conf. on human factors in computing systems*, pages 1–8, 2020.

[8] C. Celemin and J. Ruiz-del Solar. An interactive framework for learning continuous actions policies based on corrective feedback. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 95(1) :77–97, 2019.

[9] A. Chatzimparmpas, R. M. Martins, I. Jusufi, and A. Kerren. A survey of surveys on the use of visualization for interpreting machine learning models. *Information Visualization*, 19(3) :207–233, 2020.

©AFIA2022

[10] A. Chatzimparmpas, R. M. Martins, I. Jusufi, K. Kucher, F. Rossi, and A. Kerren. The state of the art in enhancing trust in machine learning models with the use of visualizations. In *Computer Graphics Forum*, volume 39, pages 713–756. Wiley Online Library, 2020.

[11] P. Christiano, J. Leike, T. B. Brown, M. Martic, S. Legg, and D. Amodei. Deep reinforcement learning from human preferences. *arXiv preprint arXiv :1706.03741*, 2017.

[12] K. Delcourt, F. Adreit, J.-P. Arcangeli, K. Hacid, S. Trouilhet, and W. Younes. Automatic and Intelligent Composition of Pervasive Applications - Demonstration. In *19th IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2021)*, Kassel (virtual), Germany, March 2021.

[13] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle. Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4) :28–39, 2006.

[14] J. J. Dudley and P. O. Kristensson. A review of user interface design for interactive machine learning. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 8(2) :1–37, 2018.

[15] C. Evers, R. Kniewel, K. Geihs, and L. Schmidt. The user in the loop : Enabling user participation for self-adaptive applications. *Future Generation Computer Systems*, 34 :110–123, May 2014.

[16] J. A. Fails and D. R. Olsen Jr. Interactive machine learning. In *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Intelligent user interfaces*, pages 39–45, 2003.

[17] S. Flutura, A. Seiderer, I. Aslan, C.-T. Dang, R. Schwarz, D. Schiller, and E. André. Drinkwatch : A mobile wellbeing application based on interactive and cooperative machine learning. In *Proceedings of the 2018 Int. Conf. on Digital Health*, pages 65–74, 2018.

[18] A. Holzinger, M. Plass, M. Kickmeier-Rust, K. Holzinger, G. C. Crişan, C.-M. Pintea, and V. Palade. Interactive machine learning : experimental evidence for the human in the algorithmic loop. *Applied Intelligence*, 49(7) :2401–2414, 2019.

[19] D. Honeycutt, M. Nourani, and E. Ragan. Soliciting human-in-the-loop user feedback for interactive machine learning reduces user trust and impressions of model accuracy. In *Proceedings of the AAAI Conf. on Human Computation and Crowdsourcing*, volume 8, pages 63–72, 2020.

[20] L. Jiang, S. Liu, and C. Chen. Recent research advances on interactive machine learning. *Journal of Visualization*, 22(2) :401–417, 2019.

[21] T. A. Kessler Faulkner and A. Thomaz. Interactive Reinforcement Learning from Imperfect Teachers. In *Companion of the 2021 ACM/IEEE Int. Conf. on Human-Robot Interaction*, pages 577–579, 2021.

[22] M. Koussaifi. *Modélisation centrée utilisateur pour la configuration logicielle en environnement ambiant*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2020.

[23] G. Li, R. Gomez, K. Nakamura, and B. He. Human-centered reinforcement learning : A survey. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(4) : 337–349, 2019.

[24] G. Ramos, C. Meek, P. Simard, J. Suh, and S. Ghorashi. Interactive machine teaching : a human-centered approach to building machine-learned models. *Human–Computer Interaction*, 35(5-6) :413–451, 2020.

[25] F. Sadri. Ambient intelligence : A survey. *ACM Computing Surveys*, 43(4) :1–66, 2011.

[26] T. Schnabel, S. Amershi, P. N. Bennett, P. Bailey, and T. Joachims. The Impact of More Transparent Interfaces on Behavior in Personalized Recommendation. In *Proceedings of the 43rd Int. ACM SIGIR Conf. on Research and Development in Information Retrieval*, pages 991–1000, 2020.

[27] P. Y. Simard, S. Amershi, D. M. Chickering, A. E. Pelton, S. Ghorashi, C. Meek, G. Ramos, J. Suh, J. Verwey, and M. Wang. Machine teaching : A new paradigm for building machine learning systems. *arXiv preprint arXiv :1707.06742*, 2017.

[28] R. Sutton and A. Barto. *Reinforcement learning : An introduction*. MIT press, 2018.

[29] K. Van den Bos, R. Vermunt, and H. A. Wilke. The consistency rule and the voice effect : The influence of expectations on procedural fairness judgements and performance. *European Journal of Social Psychology*, 26(3) :411–428, 1996.

[30] E. Wall, S. Ghorashi, and G. Ramos. Using expert patterns in assisted interactive machine learning : A study in machine teaching. In *IFIP Conf. on Human-Computer Interaction*, pages 578–599. Springer, 2019.

[31] M. Yin, J. Wortman Vaughan, and H. Wallach. Understanding the effect of accuracy on trust in machine learning models. In *Proceedings of the 2019 chi conference on human factors in computing systems*, pages 1–12, 2019.

[32] W. Younes. *Un système multi-agent pour la composition logicielle opportuniste en environnement ambiant et dynamique*. These de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, June 2021.

[33] R. Zhang, F. Torabi, G. Warnell, and P. Stone. Recent advances in leveraging human guidance for sequential decision-making tasks. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 35(2) :1–39, 2021.

Variables de Séquence pour les problèmes de tournée de véhicules

A. Delecluse[1,2], P. Schaus[1], P. Van Hentenryck[3]

[1] ICTEAM, UCLouvain, Belgique
[2] TRAIL, Belgique
[3] Georgia Institute of Technology, USA

6 mai 2022

Résumé

Nous proposons une variable ciblant les problèmes de tournées de véhicules : la variable de séquence. La représentation de son domaine permet une recherche sur base d'insertions dans une route partiellement formée, ainsi que l'implémentation d'algorithmes simples, mais puissants, permettant de respecter des temps de transition entre les visites ou des capacités dans un véhicule. Nos expériences démontrent que cette variable est suffisamment flexible pour modéliser des problèmes d'itinéraires très contraints, tout en les résolvant de manière efficace.

Mots-clés

Variable de séquence, Voyageur de commerce, livraison, transport de patients, programmation par contraintes.

1 Introduction

Les problèmes de tournées de véhicules (PTV) [19] apparaissent fréquemment dans la distribution de biens dans la chaîne logistique. De par l'augmentation de l'urbanisation et des défis écologiques, il est également attendu que les offres de transport flexibles, telles que le transport à la demande, soient davantage développées à l'avenir. Cela soulève de nouveaux enjeux pour l'optimisation, en particulier le développement d'outils génériques et réutilisables pour les nombreux contextes et variants du PTV.
La programmation par contraintes (PPC) est une des approches les plus flexibles pour la modélisation de PTV. L'approche standard consiste en un modèle de successeurs, introduisant une variable par lieu visité qui représente la visite suivante dans le parcours d'un véhicule. En dépit de sa simplicité, ce modèle souffre de deux limitations majeures : l'impossibilité de représenter des visites optionnelles sans ajouts de valeurs spéciales ainsi que le rajout d'une visite au milieu d'un itinéraire partiellement formé. Le but de la variable de séquence est de pallier à ces deux limitations :

1. Elle peut facilement modéliser l'exclusion de visites, similairement à une variable d'ensemble.
2. Inspirée de l'idée du graphe d'insertion [3], elle permet l'ajout d'une visite au milieu d'un itinéraire partiellement formé, permettant l'emploi d'algorithmes de recherche d'insertions en profondeur [3, 8] pour pouvoir réinsérer de manière optimale un ensemble de visites relaxées dans une recherche en large voisinage (RLV).

Nous commençons par un survol de travaux antérieurs sur approches avec séquences, avant de détailler notre variable, quelques contraintes applicables sur son domaine et son emploi sur 3 variants de PTV.

2 Travaux antérieurs

Dans [18], les auteurs ont introduit une variable de séquence pour des problèmes d'horaires et de PTV. La représentation du domaine de cette variable étend directement celle du sous-ensemble lié pour des variables d'ensemble [7], de part une partition des visites en requises, possibles et exclues, ainsi qu'une séquence partielle et un ensemble d'insertion
Bien que non publié, IBM ILOG CP Optimizer [11] dispose également de variables de séquences pour décider l'ordre de visites, davantage axé sur la planification mais néanmoins utilisé pour des problèmes de tournées de vehicules. Leurs fonctionalités et contraintes sont brièvement décrites [9, 10] sans pour autant donner leur implémentation exacte. Selon leur Interface de Programmation [5, 6], elles se basent sur une structure tête-queue, maintenant séparément l'agrandissement de la tête et de la queue pour rajouter des variables d'intervalle au début ou à la fin de la séquence, respectivement. Cette implémentation semble similaire à celle de Google OR-Tools [15] et ses propres variables de séquences [16]. Elle a été employée pour résoudre le problème du transport de patients dans [4] et [12].

3 Variable de séquence

Nous introduisons les notations sur les séquences avant de formaliser le domaine de notre variable et décrire comment l'implémenter dans un solutionneur de PPC. Notre variable se base essentiellement sur celle de [18] mais en y enlevant le set requis. Par conséquent, une visite possible doit être directement planifiée à un endroit précis dans une séquence partiellement formée, et ne peut pas être simplement requise. Cette modification, en dépit de sa simplicité, permet de simplifier grandement le raisonnement fait par les contraintes, leur complexité temporelle ainsi que l'implémentation d'heuristiques, tout en perdant relativement peu

Le premier auteur est un doctorant

©AFIA2022

de flexibilité en pratique. La variable que nous proposons peut être vue comme une généralisation de l'idée du *graphe d'insertion* [3], plus générique et encapsulée par l'implémentation interne du domaine de la variable de séquence.

3.1 Notations

Les notations sont largement issues de [18] mais réintroduites par souci de clarté. Chaque lieu pouvant être visité est qualifié de *nœud*, et leur ensemble est décrit par $\mathcal{X}$. Une séquence sur $\mathcal{X}$ est notée $\overrightarrow{S}$ et l'ensemble de toutes les séquences de $\mathcal{X}$ par $\overrightarrow{\mathcal{P}}(\mathcal{X})$. La notation $p \overset{\overrightarrow{S}}{\prec} q$ signifie que le nœud p précède q dans $\overrightarrow{S}$, et $p \xrightarrow{\overrightarrow{S}} q$ que p précède directement q dans $\overrightarrow{S}$. Elles seront simplement écrites $p \prec q$ et $p \rightarrow q$ lorsque le contexte le permet.

Une séquence peut être agrandie par l'utilisation d'un opérateur $insertion(\overrightarrow{S}, p, q)$, avec $q \notin S, p \in S$, qui résulte en l'insertion de q juste après p dans la séquence. Plus formellement, assumons $\overrightarrow{S} = \overrightarrow{S}_1 \cdot p \cdot \overrightarrow{S}_2$. La super-séquence résultante de l'opération est $\overrightarrow{S}' = \overrightarrow{S}_1 \cdot p \cdot q \cdot \overrightarrow{S}_2$. Cette opération est également notée $\overrightarrow{S} \underset{(q,p)}{\Longrightarrow} \overrightarrow{S}'$.

Étant donné I, un ensemble de tuples (q, p), correspondant chacun à une insertion potentielle dans $\overrightarrow{S}$, $\overrightarrow{S} \underset{I}{\Longrightarrow} \overrightarrow{S}'$ signifie que $\overrightarrow{S}'$ peut être obtenue en appliquant une insertion de I sur $\overrightarrow{S} : \exists (p, q) \in I \mid \overrightarrow{S} \underset{(p,q)}{\Longrightarrow} \overrightarrow{S}'$.

Plus généralement, la *dérivation en zéro étape ou plus* est définie par $\overrightarrow{S} \overset{*}{\underset{I}{\Longrightarrow}} \overrightarrow{S}' \equiv \overrightarrow{S} = \overrightarrow{S}' \vee \left(\exists (p, q) \in I \mid \overrightarrow{S} \underset{(p,q)}{\Longrightarrow} \overrightarrow{S}'' \wedge \overrightarrow{S}'' \overset{*}{\underset{I \setminus \{(p,q)\}}{\Longrightarrow}} \overrightarrow{S}' \right)$. Notons que I peut contenir des tuples qui ne correspondent pas à une insertion possible dans, $\overrightarrow{S}$ mais à la place dans une insertion possible dans une super séquence de $\overrightarrow{S}$.

3.2 Domaine

Définition 1. *Le domaine d'une variable de séquence Sq est représenté par $\langle \overrightarrow{S}, I, P, E \rangle$, avec $\overrightarrow{S}$ un ensemble de nœuds ordonnancés correspondant à la séquence et formant un tour partiel, des points d'insertions $I \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{X}$ et deux sous-ensembles de nœuds $P, E \subseteq \mathcal{X}$ pour les nœuds potentiellement insérés et exclus de la séquence, respectivement. Le domaine de Sq, également noté $D(Sq)$, est défini comme $\langle \overrightarrow{S}, I, P, E \rangle \equiv \left\{ \overrightarrow{S}' \in \overrightarrow{\mathcal{P}}(P \cup S) \mid \overrightarrow{S} \overset{*}{\underset{I}{\Longrightarrow}} \overrightarrow{S}' \right\}$ et capture tous les dérivations possibles valides du tour partiel $\overrightarrow{S}$ en utilisant les insertions de I.*

À son initialisation, la séquence est composée d'un tour partiel de deux nœuds, $\alpha \cdot \omega$, pour le début α et la fin ω du parcours, et aucune insertion n'est permise après ω pour garantir que ω demeure le dernier nœud visité. P est donc égal à $\mathcal{X} \setminus \{\alpha, \omega\}$, $E = \phi$ et l'ensemble d'insertions est $I = \{(p, q) \in P \times \mathcal{X} \mid p \neq \omega\}$. Imposer un nœud de début et de fin dans la séquence permet une modélisation facile des problèmes où le trajet d'un véhicule doit finir à son point de départ ou à un autre endroit (α se trouve au même endroit que ω ou non) et évite à l'interface de programmation de faire face au cas spécial de séquences vides, requérant l'ajout d'un symbole fictif comme dans [18].

Nous maintenons une cohérence assez faible sur le domaine, facile à calculer et capturant les invariants suivants :

$$S \cup P \cup E = X \wedge S \cap P = S \cap E = P \cap E = \phi \quad (1)$$

$$\forall (p, q) \in I : q \in P \wedge p \notin E \quad (2)$$

$$\forall q \in P : \exists p \in S \cup P \mid (p, q) \in I \quad (3)$$

(1) Les nœuds de la séquence partielle S, de l'ensemble possible P et de l'ensemble exclu E forment une partition de $\mathcal{X}$; (2) les insertions valides sont constituées de nœuds possibles placés après des nœuds non exclus (qui ne sont pas forcément encore présents dans la séquence partielle) ; (3) un nœud possible peut toujours être inséré après un autre mœud. Cette cohérence ne détecte pas si tous les arcs de I sont déconnectés de $\overrightarrow{S}$ et devraient être exclus.

3.3 Implémentation et structures de données

L'implémentation du domaine $\langle \overrightarrow{S}, I, P, E \rangle$ doit être réversible pour des solutionneurs à trace comme MiniCP [14], et ses mises à jours et itérations aussi efficaces que possible.

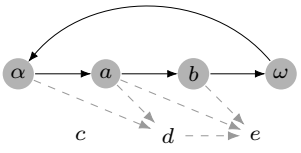
Le partitionnement entre les ensembles S, P, E est implémenté par un seul ensemble réversible [17], permettant la suppression et restauration en temps constant. Les points d'insertions I sont quant à eux partitionnés en un ensemble $I^x = \{p \in (S \cup P) : (p, x) \in I\}$ par nœud $x \in \mathcal{X}$, chacun composé des prédécesseurs valides du nœud x. Ils sont également implémentés par des ensembles réversibles. Les successeurs des nœuds sont quant eux accessibles et modifiables en tant constant via un tableau d'entiers réversibles. Les invariants maintenus par ces structures de données sont décrits dans les équations (4) à (7) et sont équivalents aux invariants (1) à (3). La Figure 1 illustre le domaine.

$$S \cup P \cup E = X \wedge S \cap P = S \cap E = P \cap E = \phi \quad (4)$$

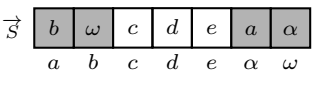
$$p \in E \implies I^p = \phi \wedge \forall x : p \notin I^x \quad (5)$$

$$p \in S \implies I^p = \phi \quad (6)$$

$$I^x = \phi \implies x \in S \vee x \in E \quad (7)$$



node x	I^x	$\lvert I^x \cap S \rvert$	$\lvert I^x \cap P \rvert$
a	ϕ	0	0
b	ϕ	0	0
c	ϕ	0	0
d	$\{\alpha, a\}$	2	0
e	$\{a, b, d\}$	2	1



$$P = \{d, e\}, E = \{c\}$$

FIGURE 1 – Variable de séquence, avec son ordonnancement $\overrightarrow{S} = \{\alpha, a, b, \omega\}$ et ses insertions potentielles (pointillées) pour les nœuds $x \in P$. Se trouve une table montrant les insertions des nœuds, les successeurs de la séquence (uniquement valide pour les nœuds $\in S$) ainsi que l'appartenance des nœuds à P et E.

4 Contraintes globales

Nous énumérons simplement quelques contraintes essentielles au PTV sans pour autant donner leur implémentation exacte, afin de conserver une taille raisonnable pour ce résumé. Les lecteurs souhaitant plus de détails peuvent se référer directement à l'implémentation [1] ou dans le futur à la version longue du papier, qui est en attente de relecture pour une autre conférence. Les contraintes globales que nous avons définies sont des contraintes de

Dépendance s'assurant qu'un ensemble de nœuds soient tous présents ou absents d'une séquence ;

Précédence veillant à ce qu'un ordonnancement précis de nœuds soit respecté dans la séquence ;

Disjointe garantissant qu'un nœud ne soit visité que par une seule séquence parmi un ensemble ;

Cumulative respectant une capacité maximale disponible, très similaire à l'approche de [18].

TempsDeTransition. Permet d'ajouter une dimension temporelle aux PTV. Elle est appliquée sur une séquence, une matrice de distance $tr \in R^{n \times n}$, une distance de parcours l et associe à chaque nœud $x \in \mathcal{X}$ une fenêtre de temps $début_x$ durant laquelle la visite du nœud doit se produire ainsi qu'une durée $durée_x$ pour y effectuer une action :

$$\texttt{TempsDeTransition}(Sq, [début], [durée], [[tr]], l) \equiv \left\{ \overrightarrow{S} \in D(Sq) \;\middle|\; \begin{pmatrix} \forall i,j \in \overrightarrow{S}, i \overset{\overrightarrow{S}}{\prec} j \implies \\ début_i + durée_i + tr_{i,j} \leq début_j \\ l = \sum_{i,j \in \overrightarrow{S} \mid i \to j} tr_{i,j} \end{pmatrix} \right\} \tag{8}$$

Nous considérons qu'il est possible d'atteindre un nœud avant le début de sa fenêtre de temps sans y commencer la tâche associée, expliquant l'emploi d'inégalités dans (8).

Filtrage Le pseudo-code pour le filtrage est présenté dans l'Algorithme 2. Nous commençons par mettre à jour les fenêtres de temps *début* des nœuds visités actuellement (ligne 2). Par la suite, nous calculons la longueur actuelle de la séquence et enlevons les insertions invalides : un prédécesseur qui ne permet pas d'atteindre le nœud dans sa fenêtre de temps (ligne 8), de rejoindre le successeur actuel dans la séquence (ligne 13) ou qui excéderait la longueur maximale permise (ligne 17). La complexité de ce filtrage est $\mathcal{O}(|P| \cdot |S|)$. En pratique, le filtrage s'exécute plus rapidement, car $I^x \cap S$ est récupéré en $\Theta(\min(|S|, |I^x|))$ dans notre implémentation. Comme nous ne raisonnons pas sur un ensemble de nœuds requis comme dans [18], nous nous débarrassons du problème NP-complet consistant à vérifier si un chemin valide visitant tous les nœuds requis existe.

Algorithme 1 : `TempsDeTransition`($Sq = \langle \overrightarrow{S} I, P, E \rangle, [début], [durée], [[tr]], l$)

```
1  for i ∈ S⃗ do
2  |  mise à jour de la fenêtre de temps début_i
3  longueur ← distance actuelle de la séquence
4  min(l) ← longueur
5  for x ∈ P do
6  |  for p ∈ I^x ∩ S do
7  |  |  arr_x ← min(début_p) + durée_p + tr_{p,x}
8  |  |  if arrivée_x > max(début_x) then
9  |  |  |  enlève p de I^x
10 |  |  else
11 |  |  |  q ← succ(Sq, p)
12 |  |  |  arr_q ← max(arr_x, min(début_x)) +
   |  |  |    durée_x + tr_{x,q}
13 |  |  |  if arr_q > max(début_q) then
14 |  |  |  |  enlève p de I^x
15 |  |  |  else
16 |  |  |  |  détour ← tr_{p,x} + tr_{x,q} − tr_{p,q}
17 |  |  |  |  if detour + longueur > l then
18 |  |  |  |  |  enlève p de I^x
```

5 Expériences

Notre variable permet de modéliser des problèmes de collecte et livraison (PCL), problèmes de transport de patients (PTP), ou encore le voyageur de commerce avec fenêtre de temps (PVCFT). Chacun de ces problèmes est modélisé avec une Variable de Séquence par véhicule ainsi qu'une contrainte `TempsDeTransition` sur ces variables. Dans le cadre du PCL et du PTP, une contrainte `Cumulative` est employée pour respecter la capacité maximale des véhicules.

Nos résultats avec une recherche par large voisinage sont présentés dans la Table 1 pour le PCL, la Table 2 pour le PTP et la Table 3 pour le PVCFT. Pour le PCL, nos résultats sont compétitifs avec l'état de l'art [8], avec un léger avantage sur les plus petites instances. Nos variables sont par ailleurs toujours plus performantes que celles de CP Optimizer (modèle issu de [18]), qui ne parvient pas toujours à fournir de solution améliorante. Pour le PTP, nous arrivons à améliorer les meilleurs résultats publiés[4]. Enfin, pour le PVCFT, notre implémentation est à même de battre l'état de l'art et trouver de nouvelles meilleures solutions pour le problème sur 32 instances issues de la suite standard de tests [13]. Nous ne montrons toutefois que les 10 nouvelles solutions sur le jeu d'instances *AFG* [2].

classe a		LNS-FFPA		Séquence		CPO	
m	n	Moyenne	Meilleur	Moyenne	Meilleur	Moyenne	Meilleur
3	24	191.76	191.40	**190.89**	**190.21**	196.11	196.00
4	36	**291.71**	**291.71**	294.72	292.72	318.97	318.97
5	48	308.95	306.97	**307.09**	**304.38**	327.37	327.00
6	72	532.55	524.97	**531.84**	**519.76**	579.79	579.77
7	72	**554.57**	550.42	554.65	**548.72**	614.02	614.00
8	108	**752.29**	**742.08**	794.86	755.00	924.04	923.86
9	96	**622.19**	614.65	625.68	**611.15**	740.26	740.26
10	144	**950.16**	**929.31**	1011.42	962.21	/	/
11	120	**699.32**	**687.99**	718.58	709.49	861.74	861.73
13	144	**878.33**	**864.81**	901.71	874.56	1042.82	1042.82
Moyenne		**578.18**	**570.43**	593.14	576.82	t/o	t/o

TABLE 1 – Valeurs objectives pour le PCL, lorsqu'une solution initiale est fournie. L'état de l'art (LNS-FFPA) et un modèle employant les variables de CP Optimizer (CPO) sont indiqués. / signifie qu'aucune solution améliorante n'a été trouvée. Dix essais ont été faits par instance et modèle.

©AFIA2022

Instances					SCHED+MSS	Séquence
Difficulté	Nom	$\|H\|$	$\|V\|$	$\|R\|$	Sol	Sol
Facile	RAND-E-8	32	12	128	**128**	**128**
Facile	RAND-E-9	36	14	144	142	**143**
Facile	RAND-E-10	40	16	160	**157**	156
Moyenne	RAND-M-8	64	8	128	83	**91**
Moyenne	RAND-M-9	72	8	144	81	**93**
Moyenne	RAND-M-10	80	9	160	99	**113**
Difficile	RAND-H-8	128	8	128	75	**87**
Difficile	RAND-H-9	144	8	144	72	**84**
Difficile	RAND-H-10	160	8	160	72	**84**

TABLE 2 – Résultats expérimentaux pour le PTP. $|H|$, $|V|$, $|R|$ sont le nombre d'hôpitaux, véhicules et requêtes, respectivement. L'objectif est le nombre de patients servis (Sol). SCHED+MSS est le meilleur modèle référencé [4]

Instance	Précédent	Nouvel	Temps [s]
rbg132.2	8200	8194	37.76
rbg132	8470	8468	0.76
rbg201a	12 967	12 948	152.53
rbg233.2	14 549	14 523	24.20
rbg092a	7160	7158	2.70
rbg152.3	9797	9796	0.41
rbg193.2	12 167	12 159	242.54
rbg193	12 547	12 538	55.57
rbg233	15 031	14 994	264.70
rbg172a	10 961	10 956	113.83

TABLE 3 – Solutions au PVCFT sur les instances AFG [2].

6 Conclusion

Nous avons présenté une version simplifiée de la Variable de Séquence introduite précédemment [18], une approche flexible pour la modélisation et la résolution de PTV. Nous avons détaillé son domaine et expliqué les contraintes globales qui peuvent y être appliquées. Nos résultats expérimentaux sur trois PTV montrent que nous sommes compétitifs avec les travaux similaires sur des variables de séquences, tout en étant suffisamment efficace pour trouver de nouvelles solutions améliorantes à un problème très étudié tel que le PVCFT. Nos prochains travaux sur cette approche se focaliseront sur son application à d'autres PTV, à de la planification ainsi qu'à l'amélioration de nos algorithmes.

Références

[1] *MiniCP Sequences - Anonymous GitHub*, Sep 2021. `https://anonymous.4open.science/r/minicp-sequences-5EE3/README.md`, [Online ; accessed 26. Feb. 2022].

[2] Ascheuer, Norbert: *Hamiltonian path problems in the online optimization of flexible manufacturing systems*. Thèse de doctorat, 1996.

[3] Bent, Russell et Pascal Van Hentenryck: *A two-stage hybrid local search for the vehicle routing problem with time windows*. Transportation Science, 38(4) :515–530, 2004.

[4] Cappart, Quentin, Charles Thomas, Pierre Schaus et Louis Martin Rousseau: *A Constraint Programming Approach for Solving Patient Transportation Problems*. Dans Hooker, John (rédacteur) : *Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 490–506, Cham, 2018. Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-98334-9.

[5] Center, IBM Knowledge: *Interval variable sequencing in CP Optimizer*, Mar 2021. `https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.9.0?topic=concepts-interval-variable-sequencing-in-cp-optimizer`, [Online ; accessed 13. Jan. 2022].

[6] Center, IBM Knowledge: *Search API for scheduling in CP Optimizer*, Mar 2021. `https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.9.0?topic=c-search-api-scheduling-in-cp-optimizer#85`, [Online ; accessed 13. Jan. 2022].

[7] Gervet, Carmen: *Interval Propagation to Reason about Sets : Definition and Implementation of a Practical Language*. Constraints, 1 :191–244, mars 1997.

[8] Jain, Siddhartha et Pascal Van Hentenryck: *Large neighborhood search for dial-a-ride problems*. Dans *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 400–413. Springer, 2011.

[9] Laborie, Philippe et Jerome Rogerie: *Reasoning with Conditional Time-Intervals.* Dans *FLAIRS conference*, pages 555–560, 2008.

[10] Laborie, Philippe, Jerome Rogerie, Paul Shaw et Petr Vilím: *Reasoning with Conditional Time-Intervals. Part II : An Algebraical Model for Resources*. Dans *FLAIRS Conference*, 2009.

[11] Laborie, Philippe, Jérôme Rogerie, Paul Shaw et Petr Vilím: *IBM ILOG CP Optimizer for Scheduling*. Constraints, 23(2) :210–250, apr 2018, ISSN 1383-7133. `https://doi.org/10.1007/s10601-018-9281-x`.

[12] Liu, Chang, Dionne M. Aleman et J. Christopher Beck: *Modelling and Solving the Senior Transportation Problem*. Dans Hoeve, Willem Jan van (rédacteur) : *Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research*, pages 412–428, Cham, 2018. Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-93031-2.

[13] López-Ibáñez, Manuel: *Instances for the TSPTW*, Sep 2020. `https://lopez-ibanez.eu/tsptw-instances`, [Online ; accessed 15. Feb. 2022].

[14] Michel, L., P. Schaus et P. Van Hentenryck: *MiniCP : a lightweight solver for constraint programming*. Mathematical Programming Computation, 13(1) :133–184, 2021. `https://doi.org/10.1007/s12532-020-00190-7`.

[15] Perron, Laurent et Vincent Furnon: *OR-Tools*. `https://developers.google.com/optimization/`.

[16] Perron, Laurent et Vincent Furnon: *OR-Tools Sequence Var*. `https://developers.google.com/optimization/reference/constraint_solver/constraint_solver/SequenceVar`.

[17] Saint-Marcq, Vianney le Clément de, Pierre Schaus, Christine Solnon et Christophe Lecoutre: *Sparse-sets for domain implementation*. Dans *CP workshop on Techniques foR Implementing Constraint programming Systems (TRICS)*, pages 1–10, 2013.

[18] Thomas, Charles, Roger Kameugne et Pierre Schaus: *Insertion Sequence Variables for Hybrid Routing and Scheduling Problems*. Dans *International Conference on Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research*, pages 457–474. Springer, 2020.

[19] Toth, Paolo et Daniele Vigo: *The vehicle routing problem*. SIAM, 2002.

Une Simulation Multi-Agent Basée sur l'Affordance pour Contraindre l'Emergence

B. Doussin[1], N. Verstaevel[2], B. Gaudou[2], E. Kaddoum[3], F. Amblard[2]

[1] IRIT, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, UT3, Toulouse, France
[2] IRIT, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, UT3, UT1C, Toulouse, France
[3] IRIT, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, UT3, UT2J, Toulouse, France

benoit.doussin@irit.fr

Résumé

Dans ce papier nous décrivons un modèle dans lequel certaines contraintes ou interactions désirées sont directement décrites dans l'environnement. L'idée est de permettre à l'utilisateur de spécifier directement dans le modèle les interactions qu'il veut pouvoir observer à un niveau macroscopique en définissant deux rôles d'agents, les Enabler qui offrent certaines potentialités d'actions, et les Consumer qui peuvent les réaliser. Nous basons notre modèle sur le concept d'affordance et proposons une première implémentation sur le Campus de l'Université Paul Sabatier à Toulouse.

Mots-clés

Affordance, Simulation Multi-Agents, Emergence

Abstract

In this paper we describe a model in which some desired constraints or interactions are directly described in the environment. The idea is to allow the user to specify directly in the model the interactions that he wants to be able to observe at a macroscopic level by defining two agent roles, the Enabler, which offer certain action potentialities, and the Consumer who can achieve them. We base our model on the concept of Affordance and propose a first implementation on the Paul Sabatier Campus.

Keywords

Affordance, Multi-Agent Simulation, Emergence

1 Introduction

Les métropoles sont aujourd'hui marquées par un phénomène de croissance urbaine et de densification, conduisant à d'importants problèmes de congestion et de mobilité. L'aménagement urbain de nouveaux quartiers dans la ville nécessite donc une planification en amont des différents moyens d'accès, en particulier en terme de mode de transports publics ou partagés. Les outils d'analyse de la structure du tissu urbain et des différents réseaux de transport mais aussi de leur évolution [2] sont maintenant des outils indispensables aux urbanistes pour appréhender ces problèmes. Pour aller plus loin et être capable de tester l'évolution des comportements des habitants à différents choix d'aménagements, la modélisation et simulation à base d'agents [3] semble maintenant l'outil approprié [5].

L'approche de modélisation à base d'agents permet de représenter au niveau individuel un phénomène et de générer des phénomènes émergents au niveau macroscopique ou à des niveaux mésoscopiques. A titre d'exemple, la simulation des mobilités individuelles des utilisateurs d'un campus universitaires (étudiants, enseignants...) va faire émerger des patterns d'affluence dans les bâtiments d'enseignement ou de restauration, réguliers à l'échelle de la semaine. Ces patterns peuvent être considérés comme nécessaires à conserver, malgré l'évaluation de différents scénarios en termes de transports individuels, publics et partagés. Le problème principal de ces phénomènes émergents est qu'ils sont difficiles à anticiper, comprendre et contrôler [13]. C'est encore plus le cas au niveau mésoscopique : comment assurer que certaines contraintes fixées par le modélisateur sur des zones de l'environnement soient satisfaites, tout en conservant l'autonomie des agents individuels (niveau microscopique) dans leurs choix de comportement ? D'autre part, comment permettre au modélisateur d'exprimer de manière souple l'ensemble de ces contraintes à l'échelle mésoscopique ?

Nous proposons dans cet article un méta-modèle générique à base d'agents basé sur le concept d'affordance de Gibson [8] afin de permettre au modélisateur de contrôler l'apparition ou la conservation de certains patterns à l'échelle mésoscopique. En effet, pour Gibson, les affordances sont les actions possibles offertes par les objets perçus par un acteur à un moment et à un emplacement donné. Nous proposons donc de modéliser nos agents comme des entités proposant ou ayant besoin de services et cherchant à coopérer ensemble pour que chaque besoin d'interaction (chaque contrainte exprimée par le modélisateur sur une zone de l'environnement) soit satisfaite [4].

L'article est organisé comme suit. Après une présentation des travaux existants sur l'utilisation de l'affordance dans les modèles à base d'agents (Section 2), nous introduisons en Section 3 le méta-modèle conceptuel, basé sur l'affordance et une approche écologique de la perception visuelle. Nous proposons ensuite en Section 4 une première implé-

©AFIA2022

mentation du modèle sur un cas d'application concernant l'étude de la mobilité sur un campus universitaire ainsi que les résultats obtenus lors de son exploration (Section 5). Enfin nous discuterons les perspectives de ce travail en Section 6.

2 Etat de l'art

2.1 Modélisation et simulation à base d'agents

Il existe dans la littérature plusieurs définitions d'un Système Multi-Agents (SMA). Selon Ferber [7], un SMA est constitué d'un ensemble d'objets passifs, d'un environnement, dans lequel sont situés les objets, ainsi que d'un ensemble d'agents autonomes. Ferber précise également que chaque agent peut disposer d'objectifs et de compétences qui lui sont propres.

L'approche multi-agent a permis de voir naître plusieurs axes de recherches, dont notamment la modélisation et simulation à base d'agents [16]. Là où dans les approches de modélisation à base d'équations, la dynamique du système est décrite par des équations décrivant l'évolution d'entités agrégées (souvent des stocks de population ayant une caractéristique commune), l'approche de modélisation à base d'agents représente explicitement le comportement de chaque entité individuelle. La dynamique globale du système, observée à un niveau macroscopique est alors le résultat des interactions de l'ensemble de ces agents dont les comportements sont décrits à un niveau microscopique[6].

Les simulations multi-agents permettent de conserver l'hétérogénéité du système, évite d'avoir à passer par une vue agrégée et sont particulièrement bien adaptés pour représenter des phénomènes localisés et distribués. Cette approche est maintenant appliquée dans la plupart des domaines de recherche : de la planification urbaine [5] ou la représentation du trafic [12]. Un des problèmes récurrents de ce type de systèmes concerne la maitrise par le concepteur du système des changements d'échelles entre des comportements spécifiés à l'échelle individuelle, des contraintes mésoscopiques et des phénomènes émergents observés à l'échelle macroscopique. Nous proposons dans ce travail sur la notion d'affordance afin de représenter ces contraintes.

2.2 Affordance et approche écologique de la perception visuelle

Le concept d'Affordance à été initialement introduit par James Jerome Gibson [9] et vient s'inscrire dans ses travaux sur la théorie de la perception écologique. Les affordances représentent ce qu'un élément de l'environnement peut offrir en terme de potentialité d'action à un animal (incluant l'être humain).

> "The affordances of the environment are what it offers the animal, what it provides or furnishes, whether for good or ill" [8]

Gibson décrit ces affordances comme des relations innées et complémentaires. La notion de complémentarité est importante car un même objet ne permettra pas nécessairement les mêmes actions à deux agents n'ayant pas les mêmes caractéristiques. Par exemple, là où une chaise afforde un humain de s'asseoir, elle afforde une fourmi de grimper. Gibson suggère alors de considérer la niche écologique d'un animal comme un ensemble d'affordances. De plus, il avance que ces affordances sont des données invariantes de l'environnement et qu'elles peuvent être perçues directement par l'animal et ne sont donc pas le résultat d'une inférence. En d'autres termes, nous ne percevons pas simplement une pomme ou une pêche, nous percevons un objet que l'on pourrait manger. Et dans la mesure où les affordances sont directement perçues par l'animal, elles le guident et le contraignent dans ses décisions. C'est cette notion de contrainte qu'il est pertinent d'utiliser dans notre modèle, car elle nous permettrait de guider les agents vers les phénomènes souhaités.

2.3 L'affordance dans les simulations

Le concept d'affordance a été largement repris au cours des dernières années dans le but d'imiter les comportements humains, notamment dans le domaine de la robotique [14]. On le retrouve également appliqué aux modèles à base d'agents avec pour objectif de reproduire les processus cognitifs humains.

Kapadia et al. [10] appliquent ce concept dans un modèle de déplacements de piétons et definissent la notion d'"*Affordance fields*", qui représentent un choix de chemin potentiel pour les agents. Les affordance fields sont détectés après une phase de perception et l'agent sélectionnera le chemin le plus intéressant pour lui.

Les travaux de thèse d'Afoutni [1] considèrent l'affordance comme un tuple à 3 éléments <*actuator, passiveObject, act*>. L'actuator peut être un agriculteur, l'objet passif un tracteur et l'action labourer. L'action labourer est le résultat du système $\{actuator, passivObject\}$ et ne peut être réaliser seul. Dans ce travail, elle considère les actuators et les objets passifs comme des agents non-autonomes appelés $environnemental_entities$. Les affordances sont détectées par des agents abstraits appelés $place - agent$, qui demandent ensuite aux actuators d'exécuter les actions.

Enfin Klügl et Timpf [11] utilisent la notion d'affordance pour capturer de manière plus explicite le choix des partenaires d'interaction des agents. Ils prennent le parti de formaliser l'affordance comme un 4-tuples : $< a, e, act, p >$, où a est un agent souhaitant réaliser une action act, e un object de l'environnement et p une préférence, permettant de determiner quel est le partenaire le plus intéressant du point de vue de l'agent. Ils proposent aussi ce qu'ils appellent un "Affordance Schemata" permettant de faire émerger ces affordances. Un agent possède, pour chaque action qu'il peut être amené à vouloir réaliser, un schéma d'affordance de la forme : $< EType, condition, fpriority >$, où $EType$ est l'ensemble des types d'objets permettant l'action, e.g. les bancs ou les murets pour l'action s'asseoir, $condition$ exprime les contraintes selon lesquelles une affordance entre l'agent a et l'objet e peut exister et $fpriority$ détermine l'intérêt de l'agent à choisir cet objet.

3 Un Modèle conceptuel basé sur l'Affordance

Dans le but de réaliser un modèle permettant à l'utilisateur de spécifier les contraintes qu'il souhaite voir émerger, plusieurs notions doivent être introduites. Nous considérons que nos agents peuvent avoir deux rôles différents : le rôle d'*Enabler* et celui de *Consumer*. Dans le modèle, les *Enabler* sont des agents qui fournissent des potentialités d'actions aux *Consumer*. Ce sont sur ces *Enabler* que les utilisateurs vont être capables de projeter des contraintes. Les agents dotés du rôle de *Consumer* sont des agents capables de réaliser une action, mais sous l'influence des *Enabler* et een interaction avec eux. Par exemple, dans ce modèle, la chaise pourra être un *Enabler*, qui permettrait alors à la fourmi, le *Consumer*, de grimper. L'objectif est alors d'avoir un modèle permettant à l'utilisateur de spécifier, par exemple le nombre de fourmis qu'il voudrait voir monter sur cette chaise.

3.1 Description du Rôle *Enabler*

Les *Enabler* sont donc des agents qui $affordent$ aux agents *Consumer* un certain nombre d'actions mais les contraignent aussi dans leur choix d'action, car ils ne peuvent pas être amenés à réaliser une action que ne leur permettrait pas leur environnement. Pour ce faire, les *Consumer* doivent être capables de réfléchir directement sur les actions que leur permet leur environnement. Nous proposons donc dans ce modèle que les *Enabler* aient, pour chaque type de *Consumer*, un ensemble de potentialités d'action à lui offrir. Plus formellement, tout agent i ayant le rôle d'*Enabler*, dispose d'un ensemble de potentialités d'actions $Afford_i$ tel que :

$$Afford_i = \{Type : Act, \forall Type \in TYPE \text{ and } Act \subset ACTION\}$$

avec $TYPE$ est l'ensemble des types de *Consumer* et $ACTION$ l'ensemble des actions possibles On aurait alors par exemple : $Afford_{Chaise} = \{Humain : \{S'assoir\}, Fourmis : \{Grimper\}\}$.

C'est sur ces *Enabler* que l'utilisateur va aussi pouvoir préciser des contraintes qu'il voudra voir émerger à un niveau mésoscopique en spécifiant comment sont consommés les services proposés. Pour ce faire, nous introduisons une notion de besoin, qui permet de quantifier l'interêt d'un *Enabler*, i, à ce qu'une de ses potentialités d'action soit exécutée par un agent *Consumer* :

$$fBesoin : ENA \times ACTION \times TYPE \rightarrow \mathbb{R}$$

avec ENA l'ensemble des agents doté du rôle *Enabler*.

On pourrait imaginer que deux *Enabler*, fournissant un même service à un type de *Consumer*, aient chacun une préférence sur la manière dont sera exécuté une action. Ceci représente également le fait qu'un *Enabler* est doté d'une préférence pour interagir avec un type d'agents plus qu'un autre.

Cette fonction sera instanciée pour chaque type d'agents (cf. Section 4).

3.2 Description du Rôle *Consumer*

Les agent pourvus du rôle de *Consumer* sont les agents qui réalisent les actions affordées par les *Enabler*. Ils sont définis par un type (parmi tous les types disponibles définis par $TYPE$).

Nos agents seront dotés d'un cycle de perception-décision-action [17]. Dans notre modèle, la phase de perception sera focalisée sur la perception des potentialités d'actions provenant des *Enabler*. De plus, la phase de décision contiendra deux étapes principales : l'évaluation des potentialité d'actions disponibles selon leur désirabilité pour l'agent et la selection du couple action,*Enabler* le plus utile (cf. Figure 1.

- *Perception.* Nous considérons qu'un agent est influencé et contraint par son environnement dans les actions qu'il va effectuer : les agents dotés du rôle de *Consumer* ne peuvent effectuer que des actions perçues (donc affordées) de l'environnement. Dans cette première étape, nous considérons que les *Consumer*, quand ils perçoivent leur environnement, perçoivent en réalité un ensemble d'Affordances, i.e. un ensemble de potentialités d'action offertes par les *Enabler*.

$$Percues : CON \times ENA^n \rightarrow ACTIONS^m$$

où CON est l'ensemble des agents dotés du rôle *Consumer*.

Cette phase est très similaire à la perception directe initialement suggérée par Gibson [9]. C'est sur cet ensemble d'actions que va être amené le *Consumer* à réfléchir

- *Filtre par désirabilité.* Parmi ces actions possibles, toutes ne sont pas nécessairement intéressantes à réaliser pour l'agent à l'instant t. Il doit donc pour cela être capable de déterminer lesquelles lui sont $Desirables$. L'agent doit alors filter les affordances perçues pour n'en conserver qu'un sous-ensemble d'actions lui sont désirables. Il ne s'agit pas ici d'en choisir une seule, mais plutôt de faire abstraction des affordances n'ayant pas d'intéret pour lui.

$$Desirable : CON \times ACTION^i \rightarrow ACTION^j \text{ où } ACTION^j \subseteq ACTION^i$$

Pour être capable de déterminer quelles actions lui sont plus désirables que d'autres, un *Consumer* doit donc pouvoir exprimer un ordre de priorité entre les actions pour déterminer parmi celles qu'il perçoit lesquelles sont intéressantes ou non. Dans ce modèle nous proposons donc de quantifier le besoin qu'a un *Consumer* à réaliser une action donnée : nous considérons que chaque action possible est associée à une valeur de désirabilité.

$$fDesirabilite : CON \times ACTION \rightarrow \mathbb{R}$$

- *Sélection d'une action par utilité.* Parmi les actions que l'agent a pu déterminer comme désirables, il doit encore décider laquelle il souhaite réaliser et quel partenaire d'interaction choisir. Dans cette phase nous considérons donc que sa décision n'est pas nécessairement égoïste, c.-à-d. qu'elle ne dépend pas seulement de ses besoins mais aussi des besoins des *Enabler* qui lui permet de réaliser les actions qu'il a jugé désirables.

©AFIA2022

$$Utile : CON \times ACTION^j \times ENA^k \rightarrow ACTION \times ENA$$

Nous faisons l'hypothèse que l'on peut orienter les résultats de la simulation vers les phénomènes émergents souhaités en incitant les *Consumer* à choisir les partenaires d'interaction en fonction de leur besoin de réaliser une action mais en respectant aussi les $fBesoin$ des *Enabler*, résultant des contraintes imposées par l'utilisateur en entrée.

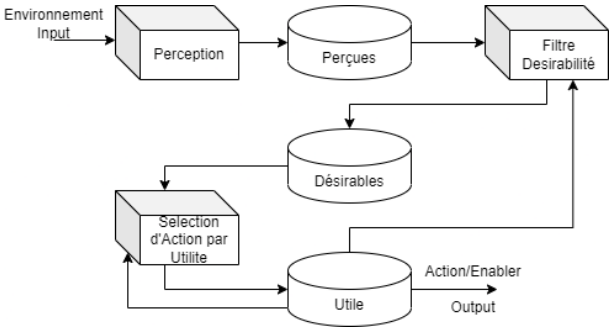


FIGURE 1 – Architecture PDU

Les trois étapes du cycle de perception et décision de l'agent sont résumés dans le schéma présenté sur la Figure 1.

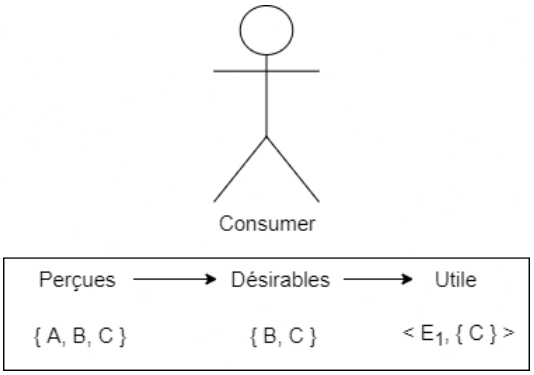


FIGURE 2 – Phases PDU

La Figure 2 représente une description d'un cas d'application simple. Un *Consumer* perçoit la possibilité de réaliser 3 actions différentes ($\{A, B, C\}$). Après les avoir filtré par leur désirabilité, l'agent détermine que seulement deux $\{B, C\}$ lui sont désirables. Finalement, même si l'action B lui serait plus désirable, il choisira finalement l'action C car la $fBesoin$ de l'*Enabler* est élevé.
Il est intéressant de noter qu'en ne considérant plus la fonction d'utilité, et en permettant à un *Consumer* de satisfaire son besoin le plus critique, on aurait alors des agents égoïstes. A contrario, si les *Consumer* ne choisissent plus en fonction de leur désirabilité, mais uniquement selon les besoins des *Enabler*, on aurait alors des agents altruistes.

4 Expérimentation

Nous proposons une implémentation de notre modèle sur un cas pratique : nous cherchons à étudier la mobilité sur une partie du campus de l'Université Paul Sabatier à Toulouse. Pour se faire les différents usagers du campus vont se déplacer de bâtiment en bâtiment en fonction de l'heure de la journée. Nous souhaitons reproduire l'occupation des différents bâtiments, contraintes que nous imposons à notre modèle.
Nous choisissons d'utiliser la plateforme GAMA [15] pour implémenter ce modèle, car elle permet de représenter de manière très riche l'environnement, et en particulier au moyen d'une bonne gestion des données géographiques.

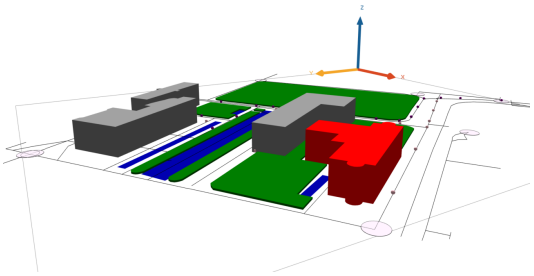


FIGURE 3 – Capture d'écran de la simulation faisant apparaitre l'environnement de la simulation avec les salles de cours (en gris), le restaurant en rouge et les générateurs de flux (cercles roses clairs).

4.1 Instanciation des agents *Enabler*

Dans notre implémentation du modèle, nous considérons plusieurs types d'agent ayant le rôle *Enabler*, chacun ayant différentes listes d'Affordances :

1. $Les\ salles\ de\ cours$: Ces objets, permettent aux Etudiants de venir $Etudier$, mais permettent aux Professeurs de venir $Travailler$. Nous en avons 3 dans la zone, représentés en gris dans la Figure 3. De plus, elles ont comme attributs une fréquentation Espérée et une fréquentation Maximale.
2. $Les\ restaurants$: Ils permettent à tous les *Consumer* de $Manger$. Il y a un restaurant, représenté en rouge (Figure 3). Il a lui aussi une fréquentation Espérée et Maximale.
3. $Les\ generateurs\ de\ Flux$: Ils représentent les entrées et sorties de la zone d'étude. Ils permettent de générer les agents arrivant dans la zone et permettent à ceux voulant la quitter de sortir. On considère donc qu'ils $Afford$ de $Partir$ à tous les agents *Consumer*. Il y a 6 générateurs de flux, tous situés sur les contours de la zone, placés sur les grands axes d'entrée et de sortie. Ils possèdent comme attribut le nombre d'agents qu'il doivent créer dans la zone à chaque pas de simulation (exprimé comme un nombre d'agents créés par heure).

La fréquentation escomptée, précisé en paramètre nous permet de définir la fonction $fBesoin$ des agents *Enabler*. Elle est définie comme la distance entre la fréquentation observée (F_{Obs}, calculée comme le nombre d'agents *Consu-*

mer dans le bâtiment considéré) et la fréquentation espérée F_{Esp} (si elle est supérieure à la fréquentation observée) et la fréquentation maximale (F_{Max}, que l'on normalisera. Ainsi on peut définir $fBesoin$ comme :

$$fBesoin = \begin{cases} \frac{Freq_{Esp} - Freq_{Obs}}{Freq_{Esp}} \text{ si } Freq_{Obs} < Freq_{Esp} \\ 1 - \frac{Freq_{Max} - Freq_{Obs}}{Freq_{Max} - Freq_{Esp}} \text{ sinon.} \end{cases}$$

4.2 Instanciation des agents *Consumer*

Dans l'application de notre modèle au problème de la mobilité sur le campus, nous proposons d'implémenter deux types d'agents ayant le rôle *Consumer* :

1. $Les\ Etudiants$: Présents sur la zone dans le but d'étudier
2. $Les\ Professeurs$: Présents pour travailler / enseigner

Distinguer les deux est intéressant ici car le besoin d'un *Enabler* en $Etudiant$ n'est pas nécessairement le même que celui en $Professeur$. Un bâtiment peut avoir besoin de 100 étudiants dans l'heure là ou il n'aura besoin que de 5 étudiants.
Initialement vide de tout agent *Consumer*, la zone simulée se remplit pas de simulation après pas de simulation par des agents *Consumer* arrivant par les générateurs de flux. Au cours de la simulation, les agents vont se déplacer de bâtiments en bâtiments en fonction des affordances perçues dans l'environnement.

5 Résultats

Dans ce premier cas d'application, nous cherchons à étudier l'impact du mode de calcul de l'utilité chez les agents *Consumer* sur la satisfaction des besoins des agents *Enabler*.
Nous avons donc lancé un plan d'expérience dans lequel nous faisons varier 2 paramètres : le taux d'agents égoïstes et la fréquentation de la zone. Le taux d'agents égoïstes va déterminer la probabilité d'un qu'agent *Consumer* nouvellement créé soit égoïste (il cherche alors seulement à maximiser ses gains personnels) ou altruiste (il prend alors ses décisions en fonction de son utilité personnelle mais également des besoins des *Enabler*). Le paramètre de fréquentation de la zone détermine le nombre d'agents *Consumer* créé au cours de la simulation. Par la suite, nous explorons les valeurs suivantes :

1. le taux d'agents égoïstes prend une valeur dans $\{0\%, 1\%, 10\%, 25\%, 50\%, 75\%, 100\%\}$. L'échantillonnage n'a pas été fait régulièrement entre 0% et 100%, car il est apparu que la zone la plus intéressante se situait pour des faibles pourcentages.
2. la fréquentation de la zone prend une valeur dans $\{0, 100, ..., 3800, 3900\}$ (toutes les valeurs entre 0 et 3900 avec un pas de 100). La fréquentation de la zone représente le nombre de *Consumer* passant dans cette zone au cours de la simulation.

En sortie des simulations, nous allons observer le taux de satisfaction des agents *Enabler*. Ce taux est calculé en sommant les $fBesoin$ des *Enabler* au cours de la simulation de manière cumulative. A la fin de chaque heure, on observe la fréquentation de l'*Enabler* au cours de l'heure afin de déterminer si la fréquentation observée a été respectée.
La simulation est lancé à 7 heures du matin. Elle se termine à 20 heures le même jour. Le pas de temps de 1 min.
La figure 4 illustre les résultats obtenus par une exploration exhaustive de l'espace des paramètres.
On constate tout d'abord que dans le cas où on a 0% d'agents *Consumer* égoïstes, plus l'affluence est forte, plus on réussit à se rapprocher d'une criticité nulle (c'est-à-dire que les contraintes des bâtiments sont toutes remplies), là où dans un modèle avec 100% d'agents égoïstes n'arrive pas à satisfaire les besoins des agents *Enabler*, quelque soit la valeur de la fréquentation de la zone. On peut pas ailleurs noter que plus la fréquentation de la zone augmente, plus les résultats tendent à se stabiliser, montrant l'impact limité de la dimension stochastique de la simualtion pour de fortes affluences, alors qu'il semble fort à de faibles influences.
En ce qui concerne les valeurs intermédiaires du taux d'agents égoïstes, on observe que pour des petites fréquentation, moins il y a d'agents égoïstes et plus les besoins des bâtiments sont satisfaits. Néanmoins pour des grandes valeurs de fréquentation, les besoins des agents *Enabler* tendent à ne pas être satisfaits. Les agents égoïstes auront tendances à augmenter la criticité du système car ils ne respecteront pas la $fBesoin$ des *Enabler*. En faisant augmenter la fréquentation, on augmente aussi la quantité d'agents non-utiles au système (et même contre-productifs), ce qui explique que la criticité augmente, malgré différentes proportions d'agents cherchant à être utiles au système.
Nous constatons que sur une zone particulièrement fréquentée, même si la majorité des *Consumer* cherchent à se rendre utiles, il y a une forte augmentation de la criticité. Cette augmentation est dûe au fait qu'une fois passée la fréquentation espérée, les agents cherchant aussi à être utile ne peuvent plus compenser les décisions prises par des agents égoïstes, ce qui mène à une augmentation de la criticité globale.

6 Conclusion et Perspectives

Dans cet article, nous proposons un modèle conceptuel dans lequel l'utilisateur est capable de spécifier les contraintes qu'il souhaite voir émerger à un niveau mésoscopique ou macroscopique. En définissant des rôles d'agents nous pouvons créer un modèle dans lequel le choix de partenaire d'interaction suit le besoin global du système pour mener la simulation vers les phénomènes souhaités. Ce papier est une première étape avec pour objectif de pouvoir ensuite rendre explicable les phénomènes émergeants, souhaités ou non. Etre capable d'ainsi directement décrire dans l'environnement les règles d'interactions semblent être plus naturel dans le cadre de l'emménagement urbain et doit permettre d'expliquer les dynamiques globales du système.
Un prochain travail sera d'appliquer un tel modèle sur une

©AFIA2022

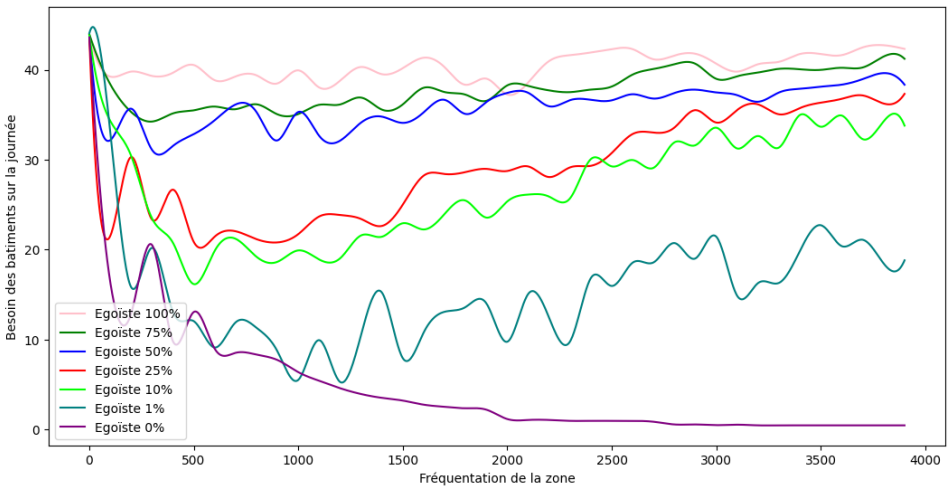


FIGURE 4 – Impact du taux d'agents égoïstes et de la fréquentation dans la zone sur la satisfaction des besoins des bâtiments

zone plus grande en regardant la cohérence des actions réalisées par nos agents. Il pourrait être aussi intéressant de regarder la pertinence d'avoir des *Consumer* possédant deux types différents.

Remerciements

Ces travaux ont été menés avec le soutien du Gouvernement Français dans le cadre du programme Territoire d'Innovation, une action du Grand Plan d'Investissement adossé à la 3eme vague du Programme d'investissement d'Avenir (PIA 3), de Toulouse Métropole et de l'opération neOCampus de l'Université Toulouse III Paul Sabatier.

Références

[1] Z. Afoutni, R. Courdier, and F. Guerrin. Représentation de l'action humaine basée sur l'affordance vue comme une propriété émergente du couple acteur/environnement. In R. Courdier and J. Jamont, editors, *Principe de Parcimonie - JFSMA 14 - Vingt-deuxièmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, Loriol-sur-Drôme, France, Octobre 8-10, 2014*, pages 129–138. Cepadues Editions, 2014.

[2] M. Barthelemy. *The structure and dynamics of cities*. Cambridge University Press, 2016.

[3] E. Bonabeau. Agent-based modeling : Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the national academy of sciences*, 99(suppl 3) :7280–7287, 2002.

[4] D. Capera, J.-P. Georgé, M.-P. Gleizes, and P. Glize. The amas theory for complex problem solving based on self-organizing cooperative agents. In *WET ICE 2003. Proceedings. Twelfth IEEE International Workshops on Enabling Technologies : Infrastructure for Collaborative Enterprises, 2003.*, pages 383–388. IEEE, 2003.

[5] A. T. Crooks, A. Patel, and S. Wise. Multi-agent systems for urban planning. In *Technologies for urban and spatial planning : virtual cities and territories*, pages 29–56. IGI Global, 2014.

[6] H. V. Dyke Parunak, R. Savit, and R. L. Riolo. Agent-based modeling vs. equation-based modeling : A case study and users' guide. In *International workshop on multi-agent systems and agent-based simulation*, pages 10–25. Springer, 1998.

[7] J. Ferber. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions, 1997.

[8] J. J. Gibson. The theory of affordances. *Hilldale, USA*, 1(2) :67–82, 1977.

[9] J. J. Gibson. *The ecological approach to visual perception : classic edition*. Psychology Press, 2014.

[10] M. Kapadia, S. Singh, W. Hewlett, and P. Faloutsos. Egocentric affordance fields in pedestrian steering. In *Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games - I3D '09*, page 215, Boston, Massachusetts, 2009. ACM Press.

[11] F. Klügl and S. Timpf. Towards More Explicit Interaction Modelling in Agent-Based Simulation Using Affordance Schemata. In S. Edelkamp, R. Möller, and E. Rueckert, editors, *KI 2021 : Advances in Artificial Intelligence*, volume 12873, pages 324–337. Springer International Publishing, Cham, 2021. Series Title : Lecture Notes in Computer Science.

[12] F. Ksontini. *Modèle d'agent fondé sur les affordances : application à la simulation de trafic routier*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013.

[13] R. Lamarche-Perrin, Y. Demazeau, and J.-M. Vincent. Observation macroscopique et émergence dans les sma de très grande taille. In *SMA SYSTÈMES MULTI-AGENTS JFSMA 11*, pages 53–62, 01 2011.

[14] E. Şahin, M. Cakmak, M. R. Doğar, E. Uğur, and G. Üçoluk. To afford or not to afford : A new formalization of affordances toward affordance-based robot control. *Adaptive Behavior*, 15(4) :447–472, 2007.

[15] P. Taillandier, B. Gaudou, A. Grignard, Q.-N. Huynh, N. Marilleau, P. Caillou, D. Philippon, and A. Drogoul. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica*, 23(2) :299–322, 2019.

[16] J.-P. Treuil, A. Drogoul, and J.-D. Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod, 2008.

[17] M. Wooldridge. *An introduction to multiagent systems*. John wiley & sons, 2009.

©AFIA2022

Des encodages PB pour la résolution de problèmes CSP

Thibault Falque[1,2], Romain Wallon[2]

[1] Exakis Nelite
[2] CRIL, Univ Artois & CNRS

{falque,wallon}@cril.univ-artois.fr

Résumé

Une approche possible pour résoudre un problème CSP est d'encoder ce problème sous la forme d'une formule CNF, et ensuite utiliser un solveur SAT pour la résoudre. Le principal avantage de cette technique est qu'elle permet de bénéficier de l'efficacité pratique des solveurs SAT modernes, fondés sur l'architecture CDCL. Cependant, le pouvoir d'inférence de ces solveurs est assez « faible », car limité par celui du système de preuve par résolution utilisé pendant l'analyse de conflit. Cette observation a conduit au développement de solveurs pseudo-booléen (PB), qui implantent le système de preuve plus puissant des plans-coupes, ainsi que de nombreuses autres techniques héritées des solveurs SAT. De plus, les solveurs PB sont capables de raisonner nativement sur des contraintes PB, c'est-à-dire, des équations ou inéquations linéaires en variables booléennes. Ces contraintes sont plus concises que les clauses, de sorte qu'une seule contrainte PB peut représenter un nombre exponentiel de clauses. Dans cet article, nous tirons parti à la fois de cette concision et du pouvoir d'inférence des solveurs PB pour résoudre des problèmes CSP. Pour ce faire, nous définissons des encodages PB pour différentes contraintes populaires, et confions leur résolution à des solveurs PB pour comparer leurs performances à celles d'autres solveurs CSP existants.

Mots-clés

programmation par contraintes, encodages SAT, solveurs PB

Abstract

One of the possible approaches for solving a CSP is to encode the input problem into a CNF formula, and then use a SAT solver to solve it. The main advantage of this technique is that it allows to benefit from the practical efficiency of modern SAT solvers, based on the CDCL architecture. However, the reasoning power of SAT solvers is somehow "weak", as it is limited by that of the resolution proof system they use internally. This observation led to the development of so called pseudo-Boolean (PB) solvers, that implement the stronger cutting planes proof system, along with many of the solving techniques inherited from SAT solvers. Additionally, PB solvers can natively reason on PB constraints, i.e., linear equalities or inequalities over Boolean variables. These constraints are more succinct than clauses, so that a single PB constraint can represent exponentially many clauses. In this paper, we leverage both this succinctness and the reasoning power of PB solvers to solve CSPs by designing PB encodings for different common constraints, and feeding them into PB solvers to compare their performance with that of existing CP solvers.

Keywords

constraint programming, PB solving, SAT encodings

1 Introduction

Le problème de satisfaction de contraintes (CSP) consiste à déterminer si un ensemble de contraintes est cohérent et, si tel est le cas, d'identifier une solution satisfaisant l'ensemble de ces contraintes. Afin de résoudre ce type de problèmes, plusieurs approches ont été proposées [18]. L'une de ces approches consiste à travailler nativement sur les contraintes du problème, à l'aide de structures de données efficaces permettant de représenter ces contraintes et la structure du problème, à l'image de solveurs tels que `Choco` [23], `Nacre` [11] ou encore `ACE` [1].

Une autre approche possible consiste à tirer parti de l'efficacité pratique des solveurs SAT modernes, fondés sur l'architecture CDCL [20, 21, 8] pour résoudre les problèmes CSP, qui sont eux-même NP-complets. Comme ces solveurs prennent en entrée une formule propositionnelle en forme normale conjonctive, il est nécessaire d'utiliser des *encodages* permettant de représenter les domaines des variables ainsi que les contraintes du problème initial sous forme de clauses. Dans ce cadre, de nombreuses solutions ont été proposées, comme celles décrites dans [26, 24, 10, 6, 3, 25, 1].

Malgré leur efficacité pratique, les solveurs SAT souffrent d'un problème majeur : le système de preuves par résolution, utilisé lors de l'analyse de conflit, présente un pouvoir d'inférence relativement faible, qui empêche de résoudre efficacement des problèmes en apparence simples, tel que celui du *pigeonhole principle* (ou *principe des tiroirs* en français) [13]. Plus généralement, les problèmes nécessitant de « savoir compter » sont souvent difficiles à résoudre pour ce type de solveurs. Cette observation a conduit au développement de solveurs dit pseudo-booléens (PB) [7, 16, 9], qui héritent de nombreuses fonctionnalités des solveurs SAT

1. `https://github.com/xcsp3team/ace`

©AFIA2022

tout en implantant le système de preuve des plans-coupes plus puissant que celui de la résolution [12, 14, 22].
Ces solveurs sont par ailleurs capables de gérer nativement des contraintes PB, c'est-à-dire, des équations ou inéquations linéaires en variables booléennes. Or, parmi les encodages SAT existants, nombreux sont ceux qui utilisent en pratique une représentation intermédiaire des contraintes sous la forme de contraintes PB, avant d'encoder ces même contraintes sous la forme de clauses. Cette étape est nécessaire à l'utilisation d'un solveur SAT, mais requiert l'introduction de variables additionnelles, et l'augmentation du nombre de contraintes à donner au solveur (une unique contrainte PB pouvant représenter un nombre exponentiel de clauses).
Dans cet article, nous présentons donc des encodages tirant parti à la fois de la concision des contraintes PB et du pouvoir d'inférence des solveurs PB. Ces encodages exploitent notamment des approches classiques de représentation des domaines, tels que le *direct-encoding*, le *log-encoding* ou encore l'*order-encoding* pour ensuite encoder sous la forme de contraintes PB différentes contraintes populaires. Pour cela, nous commençons par introduire quelques préliminaires relatifs à la résolution de problèmes CSP et PB, avant de présenter formellement nos encodages et de les évaluer empriquement sur différents jeux d'instances.

2 Préliminaires

2.1 Programmation par contraintes

Un *réseau de contraintes* (ou *CN* pour *Constraint Network*) se compose d'un ensemble fini de variables et d'un ensemble fini de contraintes. Chaque variable X peut prendre sa valeur dans un ensemble fini appelé *domaine* de X, et noté $\texttt{dom}(X)$. Chaque contrainte est définie par une relation sur un ensemble de variables. Une *solution* d'un CN est une affectation de valeurs à toutes les variables telle que toutes les contraintes soient satisfaites. Un CN est *cohérent* s'il admet au moins une solution, et le problème de décision correspondant, appelé *CSP* (pour *Constraint Satisfaction Problem*), consiste à déterminer si un CN est cohérent ou non.

2.2 Solveurs SAT et CSP

Une variable x est dite *booléenne* lorsque $\texttt{dom}(X) = \{0, 1\}$. Nous appelons *littéral* ℓ une variable booléenne x ou sa négation $\bar{x} = 1 - x$. Le littéral ℓ est dit *satisfait* lorsque ℓ est affecté à 1, et *falsifié* dans le cas contraire. Une *clause* est une disjonction de littéraux, qui impose la satisfaction d'au moins l'un de ses littéraux, et un problème est dit en *Forme Normale Conjonctive* (*CNF*, pour *Conjunctive Normal Form*) lorsqu'il est constitué d'une conjonction de clauses. Le *problème de cohérence propositionnel* (*SAT*) consiste à déterminer si une telle conjonction possède une solution.
Le problème SAT étant le problème NP-complet de référence [5], il est possible d'utiliser des solveurs SAT pour résoudre des problèmes CSP, en utilisant différents encodages. En particulier, pour représenter le domaine d'une variable CSP X, nous pouvons dans un premier temps utiliser le *direct-encoding* (voir par exemple [26]). Celui-ci consiste à utiliser une variable booléenne x_v pour chacune des valeurs $v \in \texttt{dom}(X)$. Dans ce cas, la valeur affectée à la variable X peut être obtenue en identifiant (l'unique) variable booléenne x_v satisfaite.
Cette représentation est particulièrement commode dans le cas d'un domaine où les valeurs sont énumérées et ne constituent pas un intervalle de valeurs. Dans ce dernier cas, une autre solution consiste à représenter la variable à l'aide du *log-encoding*, qui utilise la décomposition en base 2 de la variable X à l'aide de variables booléennes b_i représentant les bits de X (voir par exemple [26]). Cette représentation est définie par l'égalité suivante :

$$X = \min(\texttt{dom}(X)) + \sum_{i=0}^{\lceil \log_2(X) \rceil} 2^i b_i$$

Notons ici l'ajout de $\min(\texttt{dom}(X))$, qui vise à garantir que la décomposition en base 2 encode toujours une valeur valant au minimum 0.
Enfin, une dernière représentation possible est celle fondée sur l'*order-encoding* [25], qui utilise une variable booléenne $x_{\geq v}$ pour chacune des valeurs $v \in \texttt{dom}(X) \setminus \{\min(\texttt{dom}(X))\}$, qui est satisfaite si et seulement si $X \geq v$. Dans ce cas, la valeur affectée à X peut être obtenue en identifiant deux variables $x_{\geq v}$ et $x_{\geq v+1}$ telle que la première est satisfaite et la seconde est falsifiée, auquel cas la variable X est affectée à v.

2.3 Contraintes pseudo-booléennes (PB)

Une *contrainte pseudo-booléenne* (*PB*) est une contrainte de la forme $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \ \triangle \ \delta$, où n est un entier naturel, les *poids* (ou *coefficients*) α_i et le *degré* δ sont des entiers, les ℓ_i sont des littéraux et $\triangle \in \{<, \leq, =, \geq, >\}$.
Une contrainte PB est dite *normalisée* lorsque les coefficients et le degré de cette contrainte sont strictement positifs, et $\triangle$ est $\geq$. Toute contrainte PB peut être écrite sous la forme d'une conjonction de contraintes PB normalisées, ce qui peut être particulièrement commode dans le cas des encodages que nous présentons plus loin.
Une *contrainte de cardinalité PB* est une contrainte PB normalisée dont tous les coefficients sont égaux à 1, et une *clause* est une contrainte de cardinalité PB de degré 1. Cette définition coïncide avec la définition de clause en tant que disjonction de littéraux, et illustre le fait que les solveurs PB généralisent les solveurs SAT.

3 Encodages purement PB

Dans cette section, nous exploitons le *direct-encoding*, le *log-encoding* et l'*order-encoding* pour représenter le domaine des variables d'un CN, et utilisons cette représentation pour encoder sous forme de contraintes PB plusieurs contraintes CSP couramment utilisées, en considérant tout particulièrement celles reconnues par les *mini-solvers* de la compétition XCSP3, ainsi que des contraintes de comptage.

3.1 (Dés)activation de contraintes PB

Pour encoder un problème CSP (qu'il s'agisse du domaine de ses variables ou de ses contraintes) sous la forme de contraintes PB, il est souvent nécessaire de pouvoir activer (ou désactiver) une contrainte. Pour ce faire, il est commode d'utiliser un *sélecteur*, c'est-à-dire, une variable fraîche s dont la satisfaction entraîne celle de la contrainte considérée. Dans le cas des contraintes PB, un tel sélecteur s pourrait avoir la sémantique suivante (où $\Rightarrow$ représente l'implication matérielle) :

$$s \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \geq \delta$$

La forme particulière des contraintes PB fournit une manière simple et concise de représenter cette implication sous la forme d'une unique contrainte PB, donnée ci-dessous :

$$\delta \bar{s} + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \geq \delta$$

Rappelons que, dans le cas présenté ci-dessus, la satisfaction de la contrainte ne garantit pas la satisfaction de la variable s. Lorsque cette garantie est nécessaire, il faut ajouter l'implication réciproque :

$$s \Leftarrow \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \geq \delta$$

Cette implication peut elle aussi être représentée sous la forme d'une unique contrainte pseudo-booléenne, à savoir :

$$\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i - \delta + 1\right) s + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \bar{\ell_i} \geq \sum_{i=1}^{n} \alpha_i - \delta + 1$$

Dans la suite, nous noterons s un sélecteur pour lequel uniquement la première implication est définie, et $\mathcal{S}$ un sélecteur pour lequel les deux implications sont définies (si nécessaire, ces symboles pourront être indicés).
Pour illustrer l'utilisation des sélecteurs, considérons la contrainte de diséquation suivante :

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \neq \delta$$

Notons que cette contrainte ne peut pas être normalisée directement, comme l'opérateur $\neq$ n'est pas autorisé par les contraintes PB. En revanche, nous pouvons observer que cette contrainte est en fait équivalente à la disjonction :

$$\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \leq \delta - 1\right) \vee \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \geq \delta + 1\right)$$

Nous définissons alors deux nouveaux sélecteurs, $s_{\leq}$ et $s_{\geq}$, ayant respectivement les sémantiques suivantes :

$$s_{\leq} \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \leq \delta - 1$$

$$s_{\geq} \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i \geq \delta + 1$$

Il suffit alors d'ajouter la définition de ces deux sélecteurs, ainsi que la disjonction $s_{\leq} \vee s_{\geq}$, pour représenter la diséquation présentée plus haut.

3.2 Les variables et leurs domaines

Afin de nous assurer que les encodages introduits dans la section précédente représentent effectivement le domaine des variables du problème original, nous avons besoin d'ajouter un certain nombre de contraintes. Dans le cas du *direct-encoding*, il suffit d'ajouter la contrainte PB suivante, qui garantit que la variable X peut prendre exactement une valeur parmi celles de son domaine :

$$\sum_{v \in \mathtt{dom}(X)} x_v = 1$$

Il est alors possible de représenter la variable X à l'aide de l'égalité suivante :

$$X = \sum_{v \in \mathtt{dom}(X)} v x_v$$

Dans le cas du *log-encoding*, la représentation de la variable X étant donnée par l'égalité suivante :

$$X = \min(\mathtt{dom}(X)) + \sum_{i=0}^{\lceil \log_2(X) \rceil} 2^i b_i$$

la contrainte à ajouter pour s'assurer que le domaine de X soit bien respecté est donnée ci-dessous (rappelons que cet encodage est utilisé ici uniquement pour représenter des domaines correspondant à des intervalles) :

$$\sum_{i=0}^{\lceil \log_2(X) \rceil} 2^i b_i \leq \max(\mathtt{dom}(X)) - \min(\mathtt{dom}(X))$$

Enfin, dans le cas de l'*order-encoding*, les contraintes à ajouter sont exactement les mêmes clauses que dans l'article original introduisant cette approche [25]. Ainsi, pour toute valeur $v \in \mathtt{dom}(X) \setminus \{\min(\mathtt{dom}(X))\}$, l'implication matérielle suivante est ajoutée au solveur :

$$x_{\geq v} \Rightarrow x_{\geq v-1}$$

Lorsque le domaine de X n'est pas un intervalle, il est possible d'interdire une valeur v en ajoutant, en plus, l'implication :

$$x_{\geq v} \Rightarrow x_{\geq v+1}$$

Notons de plus qu'il est possible, en utilisant l'*order-encoding*, de représenter X grâce à l'égalité suivante :

$$X = \min(\mathtt{dom}(X)) + \sum_{v \in \mathtt{dom}(X) \setminus \{\min(\mathtt{dom}(X))\}} x_{\geq v}$$

©AFIA2022

Comme dans le cas du *log-encoding*, remarquons ici l'ajout de $\min(\texttt{dom}(X))$ pour se ramener à l'encodage d'un domaine dont le minimum est 0. Grâce à cette représentation, il est donc possible, sans perte de généralité, de représenter toute variable CSP X sous la forme d'une somme pondérée de variables booléennes, et plus généralement de littéraux, auxquels peut s'ajouter une constante μ :

$$X = \mu + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i$$

Notons par ailleurs que, pour encoder des contraintes CSP, il est souvent nécessaire de pouvoir déterminer si une variable est affectée à une valeur v donnée. Dans le cas du *direct-encoding*, il suffit de regarder la valeur affectée à x_v. Pour obtenir une telle variable avec l'*order-encoding*, observons dans un premier temps que la variable X est affectée à la valeur v si, et seulement si, la conjonction $x_{\geq v} \wedge \overline{x_{\geq v+1}}$ est satisfaite. Pour obtenir une variable x_v équivalente à celle utilisée dans le *direct-encoding*, il est possible de définir cette variable à l'aide de l'équivalence suivante :

$$x_v \Leftrightarrow x_{\geq v} \wedge \overline{x_{\geq v+1}}$$

qui peut être encodée sous la forme de contraintes PB, comme illustré dans la section précédente.
La situation est un peu plus complexe pour le *log-encoding*, car il est nécessaire de regarder l'affectation de *toutes* les variables booléennes utilisées dans la représentation de la variable pour connaître la valeur de la variable X. Nous proposons dans ce cas d'utiliser une forme paresseuse de *direct-encoding*, où la variable X est initialement encodée *via* le *log-encoding*, puis sous la forme du *direct-encoding* uniquement si la variable x_v a besoin d'être utilisée. Dans ce cas, la contrainte suivante assure la correspondance de la valeur affectée à X par dans les deux encodages :

$$\sum_{v \in \texttt{dom}(X)} v x_v = \min(\texttt{dom}(X)) + \sum_{i=0}^{\lceil \log_2(X) \rceil} 2^i b_i$$

Grâce à cette approche, il est toujours possible d'obtenir, pour toute variable CSP X et toute valeur $v \in \texttt{dom}(X)$ une unique variable x_v représentant l'affectation $X = v$.

3.3 Contrainte `cardinality`

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'un des principaux avantages des solveurs PB comparés aux solveurs SAT et leur capacité à « savoir compter » de manière relativement efficace. Pour bénéficier de cet avantage, nous proposons tout d'abord un encodage pour les contraintes `cardinality`.
Une première forme de cette contrainte consiste à imposer des bornes sur le nombre de variables parmi un ensemble $\{X_1, \ldots, X_N\}$ pouvant être affectées à une valeur v donnée. Notons m et M le nombre minimum et le nombre maximum de variables X_i pouvant être affectées à v, respectivement, et notons x_v^i la variable booléenne représentant l'affectation $X_i = v$. Clairement, le nombre de x_v^i pouvant être satisfaits doit être compris entre m et M. Ainsi, la contrainte `cardinality` peut être représentée par la contrainte

$$m \leq \sum_{i=1}^{N} x_v^i \leq M$$

qui peut facilement se décomposer en deux contraintes PB. Notons que ces contraintes peuvent à elles seules permettre de représenter un nombre exponentiel de clauses suivant les valeurs de m et M [2], sans ajouter de nouvelles variables, contrairement à ce que nécessiterait un encodage CNF de ces contraintes, par exemple.
Une seconde forme de contrainte `cardinality` vise à s'assurer qu'une variable C est affectée au nombre de variables X_i qui sont affectées à une valeur v donnée. Soit $\mu + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i$ la représentation PB de la variable C. Cette variable doit être égale au nombre de x_v^i satisfaits. Alors, en reprenant les mêmes notations que dans le cas précédent, cette seconde forme de contrainte de cardinalité peut être représentée à l'aide de l'égalité ci-dessous :

$$\sum_{i=1}^{N} x_v^i = \mu + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i$$

qui peut s'écrire sous la forme de la contrainte PB :

$$\sum_{i=1}^{N} x_v^i - \mu - \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ell_i = 0$$

Il existe par ailleurs des variantes des contraintes décrites dans cette section, où les valeurs ne sont pas des constantes mais des variables Z. Pour encoder de telles contraintes, il suffit de remplacer les variables booléennes x_v^i dans les contraintes PB définies ici par des variables x_Z^i, telles que :

$$x_Z^i \Leftrightarrow (X_i - Z = 0)$$

Notons que, en utilisant les décompositions de X_i et Z sous la forme de sommes pondérées de variables booléennes, il est possible de représenter cette contrainte à l'aide des sélecteurs présentés dans la Section 3.1.

Ajoutons qu'à l'image de la contrainte `cardinality`, des encodages PB peuvent être proposés pour d'autres contraintes de comptage, telles que `count` ou `nValues`, mais ils sont omis ici. En effet, aucune des instances XCSP3 que nous avons pu trouver ne comportant de telles contraintes, nous n'avons pas été en mesure d'évaluer ces encodages, et nous ne pouvons donc fournir aucune conclusion à leur sujet à ce jour.

3.4 Contraintes *mini-solvers*

Nous proposons maintenant des encodages pour une partie des contraintes autorisées pour les *mini-solvers* ayant participé à la compétition XCSP'19.

3.4.1 Contrainte `sum`

Une contrainte `sum` est une contrainte de la forme suivante :

$$\sum_{i=1}^{N} A_i X_i \odot k$$

où $\odot \in \{<, \leq, =, \neq, \geq, <\}$. Il est clair qu'une telle contrainte peut facilement s'écrire sous la forme d'une contrainte PB. En effet, si chacun des X_i s'écrit sous la forme $X_i = \mu^i + \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j^i x_j^i$, où les x_j^i sont des variables booléennes, alors la contrainte ci-dessous est équivalente à :

$$\sum_{i=1}^{N} A_i \left(\mu^i + \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j^i x_j^i \right) \odot k$$

qui, après développement des facteurs constants, peut être écrite sous la forme d'une contrainte PB (le cas de l'opérateur $\neq$ est traité de manière analogue à celle présentée dans la Section 3.1).

3.4.2 Contrainte `allDifferent`

La contrainte globale `allDifferent` vise à garantir que, parmi un ensemble de variables, les valeurs prises par ces variables sont toutes différentes. Nous illustrons l'encodage de cette contrainte sur l'exemple suivant :

$$\texttt{allDifferent}(X_1, \ldots, X_n)$$

Soit $\mathcal{D} = \bigcup_{i=1}^{N} \texttt{dom}(X_i)$. La sémantique de la contrainte `allDifferent` impose que chaque valeur $v \in \mathcal{D}$ soit utilisée au plus une fois parmi les variables X_i. Soit donc $v \in \mathcal{D}$, et notons x_v^i la variable booléenne représentant l'égalité $X_i = v$ pour tout $i \in 1..N$. Nous pouvons représenter cette contrainte sur v par la contrainte suivante, qui est déjà une contrainte PB :

$$\sum_{\substack{i=1 \\ v \in \texttt{dom}(X_i)}}^{N} x_v^i \leq 1$$

Cette contrainte devant s'appliquer à toutes les valeurs $v \in \mathcal{D}$, il faut ensuite répéter l'opération pour chacune des valeurs possibles. Observons que cet encodage n'est pas sans rappeler celui du problème du *pigeonhole-principle*, qui est connu pour être difficile pour les solveurs SAT utilisant la résolution [13]. Ici, l'encodage sous forme de contraintes PB permet donc, grâce à l'utilisation des solveurs PB, d'améliorer l'efficacité du raisonnement sur le sous-ensemble de contraintes correspondant à la contrainte `allDifferent`.

3.4.3 Contrainte `extension` pour les supports

Un *support* permet de lister explicitement les solutions possibles d'une contrainte. Pour encoder de telles contraintes, commençons par noter qu'une contrainte PB de la forme $\sum_{i=1}^{n} \ell_i \geq n$ permet de représenter la conjonction des littéraux ℓ_i, i.e., $\bigwedge_{i=1}^{n} \ell_i$.

Partant de cette observation, nous pouvons encoder un support (unique) ayant la forme suivante :

$$(X_i \mid 1 \leq i \leq N) = (v_i \mid 1 \leq i \leq N)$$

à l'aide de la contrainte PB :

$$\sum_{i=1}^{N} x_{v_i}^i \geq N$$

où $x_{v_i}^i$ est la variable booléenne représentant l'égalité $X_i = v_i$ pour tout $i \in 1..N$. Dans le cas (plus fréquent) où plusieurs tuples t sont autorisés par une contrainte de type support, il nous faut ajouter un sélecteur s_t pour les contraintes associées à chacun de ces tuples, pour obtenir des contraintes de la forme :

$$s_t \Rightarrow \sum_{i=1}^{N} x_{v_i}^i \geq N$$

En effet, l'ensemble des tuples autorisés doit être vu comme une disjonction. En particulier l'un des tuples doit nécessairement être affecté : il faut alors ajouter la clause $\bigvee s_t$ pour terminer l'encodage du support.

Remarquons enfin que, si le symbole $\star$ est utilisé dans les tuples autorisés à la place d'une valeur v_i (pour symboliser la possibilité d'utiliser une valeur quelconque pour la variable X_i), il suffit d'omettre le littéral correspondant à la variable X_i dans la contrainte ci-dessus.

4 Résultats expérimentaux

Cette section présente quelques résultats expérimentaux relatifs à l'utilisation des encodages pseudo-booléens présentés dans cet article sur différents ensembles de problèmes de satisfaction. Afin d'évaluer les performances de notre approche, nous avons implanté nos encodages dans le solveur `Sat4j` [16], et exécuté plusieurs variantes de ce solveur, notées `Sat4j` + $\mathcal{S}$ dans la suite de cette section, où $\mathcal{S}$ représente le nom la variante utilisée. Lorsque aucun encodage n'est spécifié, c'est la combinaison du *direct-encoding* et du *log-encoding* qui est utilisé pour représenter les domaines des variables. Le solveur `Sat4j` + `OrderEncodingBothPOS2020` utilise quant à lui l'*order-encoding*, tandis que `Sat4j` + `OrderEncodingPrimitiveBothPOS2020` exploite en plus cet encodage pour encoder les contraintes primitives de manière plus efficace (à la manière de ce qui est proposé dans [25]). Dans le même temps, nous avons exécuté le solveur PB `RoundingSat` [9] sur l'encodage PB fourni par notre implantation dans `Sat4j`.

Nous comparons ces implantations avec différents solveurs CSP de l'état de l'art, à savoir `ACE`[2] – le nouvel avatar d'`AbsCon` – `Choco` [23] et `sCOP` [25]. Nous avons également exécuté le solveur CSP proposé avec la bibliothèque `Sat4j`, et noté `Sat4j` + `SAT` [6].

Tous les solveurs ont été lancés sur un cluster de machines équipées de 32 Go de RAM et de 2 processeurs quadricœur

2. https://github.com/xcsp3team/ace

©AFIA2022

Intel Xeon X5550 cadencé à 2.66 GHz. Le temps d'exécution était limité à 1200 secondes.
Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons utilisé deux benchmarks, composés de problèmes de satisfaction provenant de la distribution XCSP [4, 19]. Le premier, noté $\mathcal{I}_{\texttt{card}}$, se compose de 5 familles de problèmes et de 145 instances. Il est composé d'instances CSP comportant des contraintes de type `cardinality` provenant du site XCSP[3]. Pour obtenir cet ensemble, nous avons dû retirer certaines instances qui comportaient des contraintes qui n'étaient pas gérées par notre approche (en particulier, des contraintes `lex`). Le second, noté $\mathcal{I}_{\texttt{XCSP18-19}}$, correspond à l'ensemble des instances des compétitions XCSP18 et XCSP19 utilisées dans le *track mini-solvers*, résultant en 32 familles de problèmes et 371 instances.
Nous présentons ci-dessous l'étude expérimentale de notre approche sur ces deux benchmarks. Ces analyses ont été réalisées avec Metrics[4], un outil d'analyse expérimentale garantissant la reproductibilité des résultats.

4.1 Etude de $\mathcal{I}_{\texttt{card}}$

La Figure 1 présente un aperçu des performances des différents solveurs exécutés sur l'ensemble d'instance $\mathcal{I}_{\texttt{card}}$.
Cette figure est un *cactus-plot*. Chacune des lignes correspond à un solveur, et permet de connaître le nombre d'instances résolues en un temps donné par ce solveur. Ici, nous pouvons observer que le solveur `RoundingSat` parvient à résoudre plus d'instances que les autres solveurs, en résolvant par exemple 16 instances de plus que le solveur `ACE` dans la limite des 1200 secondes. Nous pouvons de plus remarquer que les solveurs utilisant un encodage SAT, en l'occurence, `Sat4j` + `SAT` et `sCOP`, qui utilisent respectivement le *direct-encoding* et l'*order-encoding* ont des difficultés sur ces instances qui requiert des capacités de comptage (rappelons que ces instances contiennent des contraintes `cardinality`).
Afin de comparer plus précisément les deux premiers solveurs du *cactus-plot*, nous traçons à la Figure 2 un *scatter-plot* comparant `ACE` et `RoundingSat`.
Ici, chaque point représente une instance, et sa couleur la famille de problèmes à laquelle elle appartient. L'abscisse d'un point correspond au temps d'exécution de `RoundingSat` sur cette instance, et son ordonnée celui de `ACE` sur cette même instance. Cette figure montre clairement que `RoundingSat` parvient à résoudre très efficacement les instances de la famille `CarSequencing` (qui comportent essentiellement des contraintes `cardinality` et `sum`). De manière générale, nous avons pu observer que ce comportement se généralisait aux différents solveurs PB considérés dans notre étude, même si les différentes variantes de `Sat4j` restent moins efficaces que `RoundingSat`.

4.2 Etude de $\mathcal{I}_{\texttt{XCSP18-19}}$

Afin d'évaluer les capacités de notre approche à résoudre des problèmes plus généraux, nous l'évaluons maintenant sur les instances de l'ensemble $\mathcal{I}_{\texttt{XCSP18-19}}$, qui contient une plus large variété de problèmes et de contraintes. Pour les contraintes des *mini-solvers* que nous n'avons pas présentées dans la Section 3, nous utilisons soit une combinaison classique des contraintes présentées dans cet article, soit un encodage sous forme de clauses (qui reprend donc un encodage existant, dépendant de l'encodage choisi pour les domaines des variables concernées). De cette manière, notre implantation est capable d'encoder toutes les instances de l'ensemble $\mathcal{I}_{\texttt{XCSP18-19}}$, La Figure 3 nous présente une vue globale des solveurs exécutés sur cet ensemble.
Le premier solveur, avec une belle avance sur les autres, est `ACE`. Il est suivi par `Choco` et `sCOP` respectivement en seconde et troisième place. Le premier solveur `Sat4j` arrive en quatrième position. Il s'agit de `Sat4j+Resolution` : ce solveur PB réalise en fait une analyse de conflit à la manière d'un solveur SAT classique, en inférant une clause de manière paresseuse chaque fois qu'une contrainte PB est rencontrée pendant l'analyse. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de combiner la concision des contraintes PB et l'efficacité des structures de données des solveurs SAT.
Néanmoins, l'efficacité de ce solveur ne permet pas de généraliser les bonnes performances observées sur l'ensemble $\mathcal{I}_{\texttt{card}}$. Cela peut en partie s'expliquer par le fait que de (trop) nombreuses contraintes doivent encore être encodées à l'aide de clauses pour les problèmes considérés, ce qui ne permet pas d'exploiter la pleine puissance du système de preuves implanté par les solveurs PB.
Nous pouvons de plus observer que l'ordre des solveurs PB n'est pas le même que pour $\mathcal{I}_{\texttt{card}}$. Cela peut s'expliquer par la complémentarité des approches implantées par les différents solveurs comme cela a notamment été décrit dans [15, 17].

5 Conclusion

Dans cet article nous avons proposé d'exploiter différents encodages booléens des domaines des variables d'un problème de satisfaction de contraintes pour définir des encodages sous forme de contraintes pseudo-booléennes. Nous avons tout particulièrement considéré les contraintes reconnues par les *mini-solvers* de la compétition XCSP3, ainsi que différentes variantes de la contrainte `cardinality`. Le principal avantage des encodages proposés est qu'ils permettent d'exploiter le pouvoir d'inférence des solveurs PB, et notamment leur capacité à compter efficacement. L'analyse expérimentale a montré que nos encodages, combinés à l'utilisation de solveurs PB, permettent en effet de résoudre efficacement des problèmes composés principalement de contraintes `sum` et de contraintes `cardinality`. Néanmoins, ces bonnes performances ne se généralisent pas à des problèmes comportant d'autres types de contraintes, pour lesquels les solveurs CP natifs et les solveurs fondés sur SAT restent plus performants.
À ce jour, notre approche ne permet de résoudre que des problèmes comportant un sous-ensemble restreint de contraintes. À court terme, nous envisageons de définir des encodages pour d'autres types de contraintes, afin de pou-

3. https://xcsp.org
4. https://github.com/crillab/metrics

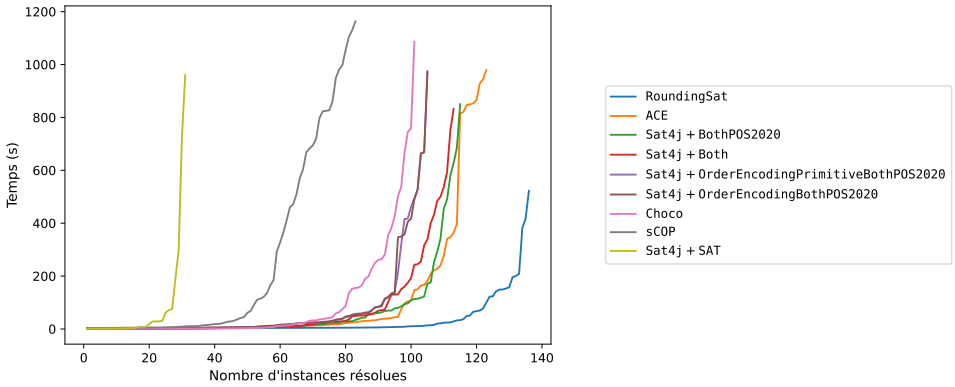


FIGURE 1 – *Cactus-plot* des solveurs sur l'ensemble d'instances $\mathcal{I}_{\texttt{card}}$.

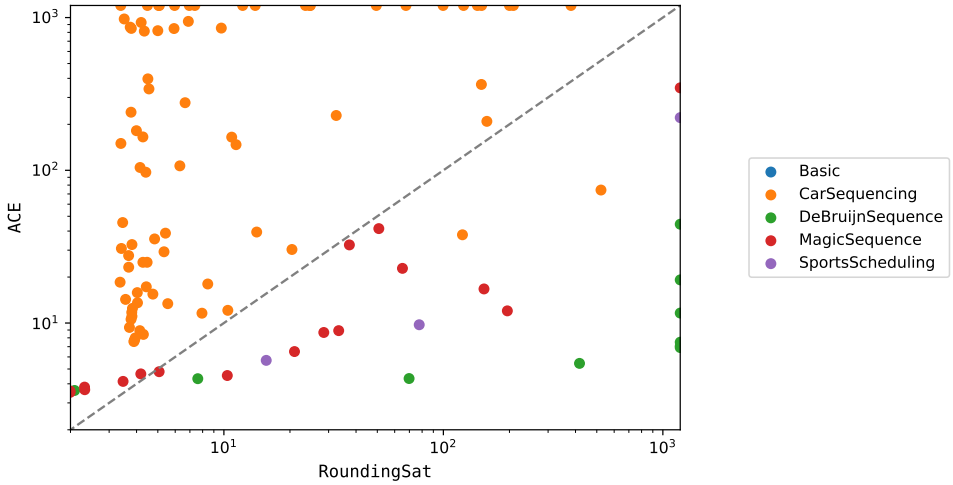


FIGURE 2 – *Scatter-plot* comparant les temps d'exécution (en secondes) d'`ACE` et de `RoundingSat` sur l'ensemble $\mathcal{I}_{\texttt{card}}$.

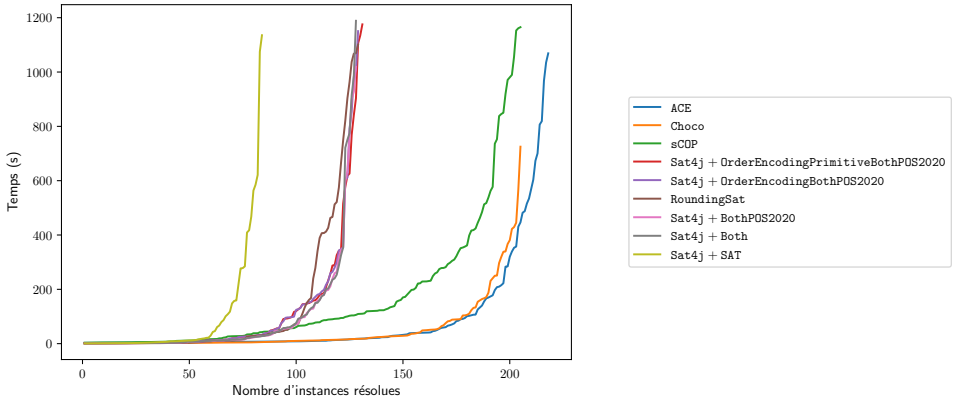


FIGURE 3 – *Cactus-plot* des solveurs sur l'ensemble d'instances $\mathcal{I}_{\texttt{XCSP18-19}}$

©AFIA2022

voir soumettre notre approche à la prochaine compétition XCSP. Nous souhaiterions de plus étudier de nouveaux encodages pour améliorer les performances des solveurs PB dans la résolution de problèmes CSP. À plus long terme, nous envisageons d'exploiter la complémentarité des différents paradigmes de résolution de CSP (natif, fondé sur SAT ou fondé sur PB) pour tirer le meilleur de chacune de ces approches.

Références

[1] Ramón Béjar, Cèsar Fernández, and Francesc Guitart. Encoding basic arithmetic operations for sat-solvers. In René Alquézar, Antonio Moreno, and Josep Aguilar-Martin, editors, *Proceedings of the 13th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence*, pages 239–248. IOS Press, 2010.

[2] Belaid Benhamou, Lakhdar Sais, and Pierre Siegel. Two proof procedures for a cardinality based language in propositional calculus. In Patrice Enjalbert, Ernst W. Mayr, and Klaus W. Wagner, editors, *Proceedings of STACS 1994*, pages 71–82. Springer, 1994.

[3] Christian Bessiere, George Katsirelos, Nina Narodytska, Claude-Guy Quimper, and Toby Walsh. Decompositions of all different, global cardinality and related constraints. In Craig Boutilier, editor, *Proceedings of IJCAI 2009*, pages 419–424, 2009.

[4] Frédéric Boussemart, Christophe Lecoutre, Gilles Audemard, and Cédric Piette. Xcsp3-core : A format for representing constraint satisfaction/optimization problems. *CoRR*, abs/2009.00514, 2020.

[5] Stephen A. Cook. The Complexity of Theorem-proving Procedures. In *Proceedings of the Third Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, STOC '71, pages 151–158, New York, NY, USA, 1971. ACM.

[6] Ines Lynce Daniel Le Berre. Csp2sat4j : A simple csp to sat translator. In *Proceedings of the second CSP Competition*, 2008.

[7] Heidi E. Dixon and Matthew L. Ginsberg. Inference methods for a pseudo-boolean satisfiability solver. In *AAAI'02*, pages 635–640, 2002.

[8] Niklas Eén and Niklas Sörensson. An extensible sat-solver. In *Theory and Applications of Satisfiability Testing*, pages 502–518, 2004.

[9] Jan Elffers and Jakob Nordström. Divide and conquer : Towards faster pseudo-boolean solving. In *Proceedings of IJCAI 2018*, pages 1291–1299, 2018.

[10] Marco Gavanelli. The log-support encoding of CSP into SAT. In Christian Bessiere, editor, *CP 2007*, pages 815–822. Springer, 2007.

[11] Gaël Glorian. Nacre. In *Solver Descriptions of XCSP3 Competition 2018*, 2018.

[12] Ralph E. Gomory. Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. *Bulletin of the American Mathematical Society*, pages 275–278, 1958.

[13] Armin Haken. The intractability of resolution. *Theoretical Computer Science*, 39 :297 – 308, 1985. Third Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science.

[14] J. N. Hooker. Generalized resolution and cutting planes. *Annals of Operations Research*, 12(1) :217–239, 1988.

[15] Daniel Le Berre, Pierre Marquis, and Romain Wallon. On weakening strategies for PB solvers. In Luca Pulina and Martina Seidl, editors, *SAT 2020*, pages 322–331. Springer, 2020.

[16] Daniel Le Berre and Anne Parrain. The SAT4J library, Release 2.2, System Description. *Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation*, 7 :59–64, 2010.

[17] Daniel Le Berre and Romain Wallon. On dedicated cdcl strategies for pb solvers. In *Proceedings of SAT 2021*, pages 315–331, 2021.

[18] C. Lecoutre. *Constraint Networks : Techniques and Algorithms*. ISTE/Wiley, 2009.

[19] Christophe Lecoutre and Nicolas Szczepanski. PYCSP3 : modeling combinatorial constrained problems in python. *CoRR*, abs/2009.00326, 2020.

[20] Joao Marques-Silva and Karem A. Sakallah. Grasp : A search algorithm for propositional satisfiability. *IEEE Trans. Computers*, pages 220–227, 1999.

[21] Matthew W. Moskewicz, Conor F. Madigan, Ying Zhao, Lintao Zhang, and Sharad Malik. Chaff : Engineering an Efficient SAT Solver. In *Proceedings of the 38th Annual Design Automation Conference*, DAC '01, pages 530–535, New York, NY, USA, 2001. ACM.

[22] Jakob Nordström. On the Interplay Between Proof Complexity and SAT Solving. *ACM SIGLOG News*, 2(3) :19–44, August 2015.

[23] Charles Prud'homme, Jean-Guillaume Fages, and Xavier Lorca. Choco solver documentation. *TASC, INRIA Rennes, LINA CNRS UMR*, 6241, 2016.

[24] Naoyuki Tamura, Akiko Taga, Satoshi Kitagawa, and Mutsunori Banbara. Compiling finite linear CSP into SAT. In Frédéric Benhamou, editor, *Proceedings of CP 2006*, volume 4204 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 590–603. Springer, 2006.

[25] Naoyuki Tamura, Akiko Taga, Satoshi Kitagawa, and Mutsunori Banbara. Compiling finite linear CSP into SAT. *Constraints An Int. J.*, 14(2) :254–272, 2009.

[26] Toby Walsh. SAT v CSP. In Rina Dechter, editor, *Proceedings of CP 2000*, volume 1894 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 441–456. Springer, 2000.

L'IA au travail : propositions pour outiller la confiance

Y. Ferguson[1], C. Pecoste[2], avec la collaboration de A. Leblanc[3], P. Crespin[4]

[1] Icam site de Toulouse 1, LaborIA
[2] Icam site de Toulouse
[3] Renault Group, mis à disposition de l'Institut de Recherche Technologique SystemX dans le cadre du programme Confiance ai
[4] Spix Industry

yann.ferguson@icam.fr
charly.pecoste@icam.fr

Résumé

De nombreux travaux appréhendent les enjeux du déploiement de l'IA dans les organisations et les métiers. Au-delà des dynamiques destructions/créations d'emplois, elles dégagent des questions de transformation du travail et de leur acceptabilité. Elles pointent en ce sens sur la nécessité d'établir une confiance technique et sociale envers l'IA. Cet article décrit un outil de diagnostic social des applications de l'IA au travail en vue de faciliter l'instauration d'une confiance située. Cet outil a vocation à être spécifié, expérimenté et formalisé dans le programme Confiance AI.

Mots-clés

Travail, Outil de diagnostic, Confiance, Socialisation.

Abstract

Several studies have examined the challenges of AI deployment in organizations and professions. Beyond the dynamics of job destruction/creation, they highlight the issues of work transformation and their acceptability. In this sense, they point to the need to establish technical and social trust in AI. This article describes a tool for social diagnosis of AI applications at work in order to facilitate the establishment of trust linked to specific working context. This tool will be specified, experimented and formalized in the Confiance AI program.

Keywords

Work, Diagnostic Tool, Trust, Socialization

1 Introduction

L'essor actuel de l'intelligence artificielle (IA) autour notamment de l'approche connexionniste conduit à des projections souvent alarmantes en matière d'impact sur l'emploi et le travail, pointant notamment sur des mutations importantes. La France, en particulier, s'appuie sur l'enquête de l'OCDE [1], qui évalue à 32% la part des emplois profondément transformés par l'IA au cours de vingt prochaines années.

Les études pour qualifier ces changements en vue de définir des systèmes d'IA (SIA) à la fois performants et « encapacitant » se multiplient. La France a notamment initié avec le Canada le Partenariat Mondial pour l'Intelligence Artificielle (PMIA) au sein duquel le Future of Work Working Group a pour mandat d'identifier des bonnes pratiques en matière de SIA responsables au travail [2]. Elle a également lancé le programme LaborIA, centre de ressources d'expérimentations sur l'IA dans le milieu professionnel. Il s'agit d'établir des principes de complémentarité entre les SIA et les travailleurs autour de deux idées : « *elle devrait être saine (notamment au regard des enjeux éthiques) et capacitante pour l'être humain (c'est-à-dire qu'elle doit lui permettre de faire mieux, de se développer et ne pas le mettre dans une posture d'avilissement ou d'asservissement)* » [3]. Les industriels sont évidemment associés à ces initiatives. Ils sont notamment rassemblés dans un collectif, baptisé « Confiance AI » [4], qui réunit des acteurs académiques et industriels français. Ses membres ont décidé de mutualiser leurs savoir-faire scientifiques et technologiques de pointe pour « *concevoir et industrialiser des systèmes à base d'IA de confiance* ». Il traite les défis scientifiques relatifs à l'IA de confiance et apporte des solutions tangibles, applicables dans le monde réel et industrialisables. La confiance est instituée techniquement (« *by design* ») et socialement, entre un SIA et le professionnel qui l'utilise.

Cet article présente un outil en cours d'élaboration, « MAIAT » (Mesure de l'Acceptabilité sociale de l'IA au Travail), pour qualifier, évaluer et accompagner la construction sociale de la confiance entre un SIA et ses utilisateurs dans différents métiers et organisations. Développé dans le cadre du programme Confiance AI, MAIAT est un instrument de « dérisquage » de la construction de la confiance. Il attire l'attention sur des points des vigilance que nous avons identifiés à partir du catalogue mondial de cas d'usage du PMIA que nous coordonnons. MAIAT propose deux familles de trois critères basés sur des indicateurs à suivre tout au long du processus d'intégration que nous qualifions de « processus de socialisation », à savoir l'appropriation progressive d'une technique par un métier, une communauté professionnelle fondée sur le partage de valeurs, de normes, de pratiques, d'une identité. La première rassemble des critères qui ont essentiellement trait au bien-être des travailleurs : la reconnaissance, l'engagement relationnel et la

©AFIA2022

surveillance (2). La seconde comporte des critères qui renvoient davantage à l'engagement : l'autonomie, le savoir-faire, la responsabilité (3). Nous présentons ensuite comment nous envisageons de le déployer (4) et, pour finir, les premiers retours d'utilisation de MAIAT (5).

2 Evaluer les effets des SIA sur le bien-être au travail

La première famille de points de vigilance touche le bien-être des travailleurs. Le bien-être met l'accent sur la perception personnelle et collective des situations et des contraintes de la sphère professionnelle. Il fait référence à un sentiment général de satisfaction et d'épanouissement dans et par le travail qui dépasse l'absence d'atteinte à la santé. MAIAT traite du bien-être suivant trois critères : la reconnaissance, les relations sociales et la surveillance.

2.1 La reconnaissance

Au travail, la reconnaissance prend la forme de revendications de salaires, de statuts, mais surtout d'une demande plus générale et plus diffuse qui porte sur la personne elle-même, le « respect » et la dignité que chacun estime dus. La reconnaissance s'allie souvent au mérite qui a pris une place considérable dans les organisations. Le mérite est une norme de justice centrale pour établir les inégalités justes. Il justifie en effet les inégalités de gratification symbolique ou matérielle, de positions, d'attributions et les rend acceptables aux yeux des membres du collectif. C'est pourquoi les organisations construisent des indicateurs et des systèmes d'évaluation sophistiqués qui vont organiser, objectiver, la reconnaissance du mérite.

Brun et Dugas [5] distinguent quatre dimensions de la reconnaissance au travail :

- La reconnaissance existentielle qui porte sur l'individu et non sur le seul salarié ;
- La reconnaissance de la pratique qui porte sur la manière d'exécuter le travail ;
- La reconnaissance des efforts consentis, qui portent sur l'engagement, l'intensité voire les risques encourus ;
- La reconnaissance des résultats effectifs, observables, mesurables et contrôlables.

L'IA au travail peut fragiliser directement ces quatre formes de reconnaissance :

- Reconnaissance existentielle : l'IA peut élever la substituabilité des travailleurs en déplaçant la valeur vers la machine ;
- Reconnaissance de la pratique : l'IA exécute les tâches ou renforce le caractère procédurier du travail ;
- Reconnaissance des efforts : l'IA facilite le travail ;
- Reconnaissance des résultats : l'IA rend illisible la contribution propre au travailleur.

Au final, ce critère reproblématise les enjeux de déplacement de la valeur du travail en pointant sur la nécessité pour les organisations de produire des nouveaux indicateurs qui permettront de définir et de positionner la reconnaissance au travail.

Critère 1 : La fragilisation de la reconnaissance

1.1. Le SIA réduit-il la distinction entre les travailleurs (réduction de l'écart entre l'expert et le novice) ? (Oui =1 ; Non=0)
1.2. Des tâches requérant auparavant de l'expertise sont-elles désormais partiellement ou totalement automatisées ? (O=1, N=0)
1.3. Le SIA supprime-t-il des tâches pénibles, ingrates, répétitives ou dangereuses ? (O=0 ; N=1)
1.4. L'introduction de la technologie rend-elle moins visible le résultat de l'activité du travailleur ? (O=1 ; N=0)

Nous présenterons le système de notation de MAIAT dans la section 4.2.

2.2 Les relations sociales

Dans les sociétés modernes, marquées par l'individualisme et la fragilité des engagements dans les collectifs, le travail continue d'incarner ce lieu où émergent des formes collectives dans lesquels les individus se construisent et s'engagent. Or, l'intermédiation technologique dans les relations sociales n'est évidemment pas sans incidence. Aussi, pour Bobillier Chaumon [6], « *tout dispositif qui viserait, d'une manière ou d'une autre, à remettre en cause les équilibres sociaux en place, les réseaux de travail constitués (formels et informels), les sentiments d'appartenance à une communauté, aurait de grandes difficultés à être accepté. Le rejet des technologies relèverait ici davantage d'une stratégie de défense ou de protection face au danger de désorganisation et de fragilisation que peut faire peser la technologie sur le collectif de travail* ».

Supposées établir une « société de communication », les Technologies de l'Information et de la Communication ont transformé la façon dont les travailleurs communiquent au travail, avec des résultats mitigés. Dominique Wolton [7] souligne notamment qu'elles alimentent une confusion entre communication fonctionnelle et technique, qui relève de l'efficacité informationnelle, et la communication normative et humaine, qui désigne un processus d'intercompréhension et de réciprocité. L'appauvrissement de la communication normative est ainsi souvent le prix de l'efficacité de la communication fonctionnelle.

De nombreux SIA automatisent ou interfèrent dans des tâches sociales, c'est-à-dire des tâches qui se basent essentiellement sur une communication humaine. Certains SIA lui substituent des relations machine-machine, humain-humain via des machines, ou humain-machine. Ces dernières peuvent être source de satisfaction et leur part peut croître au détriment des relations humaines. Les chatbots, par exemple, ont pour eux leur disponibilité, leur immédiateté, l'homogénéité de leur réponse, leur stabilité émotionnelle et n'implique pas de réciprocité. Pour le psychiatre Serge Tisseron [8], cette prévisibilité de la communication avec une machine risque de rendre moins acceptable l'irréductible écart entre les attentes et la réalité des relations humaines. Cela pourrait conduire les utilisateurs à privilégier la communication avec une machine, de la même façon que de nombreux travailleurs préfèrent la communication asynchrone de la messagerie à la confrontation directe. Victor Scardigli [9] a lui montré comment les premiers

concepteurs de l'automatisation du pilotage des avions se méfiaient de l'usage de la voix dans les interactions des pilotes avec les contrôleurs aériens. Les dangers qu'ils associent aux erreurs de prononciation, de traduction, d'interprétation d'inattention leur font préférer un « automatisme social », un remplacement du lien social par un lien technique entre ordinateurs au sol et à bord, jugé plus sûr et efficace. Pourtant les contrôleurs expriment leur attachement aux informations paraverbales contenues dans la voix du pilote, révélatrices du climat du cockpit et l'équipage ressent le lien humain avec la terre comme un élément de stabilité émotionnelle en cas d'incident à bord.

France Stratégie pointe alors sur un risque de désengagement relationnel, en raison d'une « *déshumanisation des pratiques et un appauvrissement des interactions sociales, lesquels constituent très souvent la raison d'être de certains métiers* » [10]. La communication pourrait en effet être appauvrie par les stratégies de dialogue standardisées des machines qui déterminent les réponses et parfois même les questions à partir d'architectures de choix.

Critère 2 : Le désengagement relationnel

2.1 Le SIA introduit-il une communication entre des machines ? (O=1 ; N=0)
2.2 Le SIA crée-t-il une interaction humain-machine au détriment d'une communication entre personnes ? (O=1 ; N=0)
2.3 Le SIA intervient-il dans la communication entre plusieurs personnes ? (O=1 ; N=0)
2.4 Le SIA impose-t-il des lexiques et des syntaxes standardisés pour communiquer ? (O=1 ; N=0)

2.3 La surveillance et le contrôle

Dans l'imaginaire collectif, les machines sont associées à des systèmes de surveillance et de contrôle. Le droit pour l'employeur de contrôler et de surveiller l'activité de ses salariés est admis dans son principe, tout en faisant l'objet d'un encadrement autour de la distinction activité professionnelle/vie privée. Dans certaines situations, non seulement l'employeur peut, mais doit surveiller l'activité du salarié, lorsque la finalité est de protéger des installations comportant un risque élevé d'explosion ou de diffusion de matières dangereuses ou de détournement de celles-ci par des tiers non autorisés, et d'assurer la protection de personnes exposées à des risques particuliers en raison de ces activités. En dehors de ces situations spécifiques, ce droit est soumis à un contrôle de proportionnalité : il doit être justifiable par les intérêts légitimes de l'employeur. Ainsi, la commission nationale informatique et liberté (Cnil) a censuré un dispositif de surveillance par caméra au-dessus d'un poste de travail qui fonctionnait la journée en mode visualisation et plaçait l'employé sous surveillance permanente et constante. Le gérant pouvait accéder en temps réel aux images depuis son téléphone et donc exercer cette surveillance à distance [11].

Les données collectées par les SIA peuvent concerner directement les travailleurs et être exploitées en vue d'évaluer leur productivité. Plusieurs technologies sont en ce sens dédiées à « la mesure de soi » (quantified self) en collectant et en analysant des données individuelles. Ces méthodes sont largement déployées dans les entrepôts : le nombre de commandes par journée, par semaine, le nombre moyen d'articles par commande, le temps écoulé entre le moment de la commande et sa réception, entre l'arrivée du client et son départ, le nombre d'articles collectés par employé et par heure, le parcours de l'employé… Toutes ces données sont enregistrées, analysées, transformées en indicateurs de productivité. Head [12] décrit ainsi l'émergence d'un « *management numérique* » qui transforme les travailleurs encadrés en « *représentations électroniques* » d'êtres humains, ces « *nombres, mots codés, cônes, carrés, et autres triangles qui nous incarnent sur les écrans des managers* » qui assurent la micro-gestion du travail de chaque salarié ou de chaque équipe.

Le SIA peut également solliciter une identification pour des raisons de sécurité, de paramétrage individuel ou de traçabilité des problèmes rencontrés par la machine. Quel que soit l'usage prévu de ces données, elles peuvent être exploitées pour surveiller ou contrôler le travailleur, du moins peut-il le ressentir ainsi. La Réglementation Générale des Données Personnelles limite l'utilisation des données à une finalité unique et précise et impose des principes de transparence sur la collecte, l'utilisation et la conservation des données personnelles. Mais peu de travailleurs (et de citoyens en général) maîtrisent ce cadre.

Critère 3 : La surveillance

3.1 Le SIA intègre-t-il une caméra/micro susceptible de filmer/écouter le travailleur ou d'être perçu comme tel ? (O=1 ; N=0)
3.2 Le SIA implique-t-il des identifiants permettant de collecter des données sur son utilisateur ? (O=1 ; N=0)
3.3 Les données collectées par le SIA sont-elles exploitées pour mesurer la productivité de son utilisateur ? (O=1 ; N=0)
3.4 La finalité de l'utilisation des données est-elle transparente ? (O=1 ; N=0)

3 Evaluer l'effet des SIA sur l'engagement au travail

L'engagement professionnel se définit par une *« attitude qui traduit la force des liens unissant l'individu à son travail. L'engagement implique l'attachement affectif (s'identifier à l'organisation), l'attachement instrumental (coût d'opportunité), enfin, l'attachement moral (obligation envers l'organisation)* » [13]. Pour générer cet engagement, il est communément admis que les motivations autodéterminées ou intrinsèques sont bien plus efficaces que les motivations extrinsèques ou contrôlées. Elles correspondent au fait d'accomplir une ou plusieurs tâches au travail par intérêt, par plaisir ou encore par satisfaction et renvoient aux aspirations des individus à se réaliser via leur travail, que Clot attribue essentiellement à la liberté qu'accorde l'organisation pour assurer un travail de qualité [8]. Notre outil aborde l'engagement au prisme de trois critères : l'autonomie, le

©AFIA2022

savoir-faire et la responsabilité.

3.1 L'autonomie

L'autonomie qualifie la possibilité pour le travailleur de devenir sujet, de s'éprouver comme l'auteur de ses œuvres, d'affirmer ses choix, d'agir de lui-même. Le principe d'autonomie oppose le travail authentique, expressif et personnel au travail mécanique, déshumanisé et « abstrait ». L'autonomie est devenue un principe de justice central au travail : chaque travailleur est conduit à juger de la justice de son travail en fonction de la liberté, de l'autonomie et de la réalisation de soi qu'il lui permet [14]. A l'opposé, le sentiment d'injustice résulte de la fatigue, de l'usure, de l'absence d'intérêt pour la tâche, du sentiment de mépris et d'impuissance sur sa propre activité. L'autonomie consacre la réalisation de soi comme juste et l'aliénation comme injuste.

Tout projet d'automatisation d'une activité porte en germe une réduction de l'espace d'autonomie du travailleur (mais peut, à termes, en générer un nouveau). Pour une machine, l'autonomie est la capacité d'opérer indépendamment d'un opérateur humain dans un environnement dynamique complexe. Cette diminution des interventions réduit l'espace d'autonomie des travailleurs. Consécutivement, les SIA modifient la répartition de l' « intelligence » du travail [15]. Pour un salarié, l'importance de l'activité de réflexion dans sa tâche délimite son autonomie dans l'organisation du travail, c'est-à-dire son pouvoir, sa valeur marchande, l'intérêt du travail, la maîtrise de son itinéraire professionnel et, partant, de son avenir personnel. Un intégrateur de SIA nous révélait d'ailleurs bannir la notion de « *machines intelligentes* » de son vocabulaire : « *ce sont les travailleurs qui sont intelligents, pas les machines* ». Les SIA portent toutefois un risque de « *paternalisme technologique* » aux multiples visages - alertes, recommandations, aides à la décision, rappels à l'ordre, blocages, interdictions qui placerait progressivement le travailleur dans une situation de dépendance : « *obéir aux ordres d'une intelligence artificielle, perdre le contrôle sur les processus, déléguer les décisions à la machine sont autant de modes de complémentarité, qui, au niveau individuel et collectif, seront susceptibles de créer de la souffrance au travail* » (p. 186) [16]. En deçà de l'obéissance à un algorithme, le SIA peut dégrader la flexibilité cognitive du travailleur qui, suivant le déroulement de la séquence opératoire, est moins en capacité de s'interrompre, de s'adapter à un environnement changeant, de répondre à une sollicitation extérieure. Il peut aussi se retrouver prisonnier d'un tunnel attentionnel qui l'empêche d'envisager des solutions alternatives.

Critère 4 : La perte d'autonomie

4.1 Le SIA détermine-t-il un déroulement de l'action du travailleur ? (O=1 ; N=0)

4.2 Le SIA émet-il des notifications à l'adresse du travailleur ? (O=1 ; N=0)

4.3 Le SIA réduit-il ou rend-il plus difficile la prise d'initiative pour le travailleur ? (O=1 ; N=0)

4.4 Le travailleur dispose-t-il de marge manœuvre convenue dans l'utilisation ou l'interprétation du SIA ? (O=0 ; N=1)

3.2 Le savoir-faire

L'identité professionnelle se construit en rapport à un savoir-faire : une école, un diplôme puis l'expérience contribuent chez l'individu à se construire une identité pour soi et pour autrui. Ce savoir-faire sert de base à sa légitimité, elle-même constitutive de son statut et de sa position, parfois durement acquise. L'innovation de processus, en déplaçant la valeur du travail, met toujours fin à un monde au sein duquel les opérateurs s'étaient constitués des pratiques, des règles, des routines efficaces qui ont établi un statut, une identité. La nouvelle technologie « permet/autorise de faire » ou « oblige à faire », mais aussi « empêche de faire » ou « plus comme avant » [6].

Les SIA sont potentiellement porteurs de quatre tendances corrélées entre elles :

- La valeur du travail pourrait se déplacer, être moins dans le faire, fonction de l'IA, que dans le contrôle, la vérification, l'approbation et la validation : une partie de l'activité s'oriente vers la machine « intelligente » elle-même, dont il s'agit de s'occuper [17]. Le travail est ainsi décentré, le travail direct et immédiat décline tandis que celui sur le système technique devient l'objet principal.
- Le SIA généralise des savoir-faire, c'est-à-dire baisse le niveau d'expertise nécessaire à l'exécution de tâches, les rendant plus accessibles et consécutivement moins distinctives. Les savoir-faire ne disparaissent pas mais sont moins valorisants professionnellement.
- Le SIA réduit l'espace des pratiques au profit des process [12], la capacité d'agir des travailleurs se limitant à suivre des instructions sans aucune autre finalité. Le processus, « *série d'opérations et la façon dont elles sont reliées les unes aux autres*» évince la pratique, qui désigne « *l'accumulation de connaissances tacites et de compétences* » dont les employés ont besoin pour effectuer leur travail. Cette redistribution des capacités d'action affecte le périmètre du travail réel qui décrit ce que le travailleur produit et a le sentiment de produire effectivement, tantôt en deçà, tantôt au-delà des règles et des attentes formelles. Or, on tend à définir la véritable compétence comme la ressource nécessaire pour combler cet écart : le professionnel démontre sa compétence qu'à partir du moment où suivre les ordres ne suffit pas pour réaliser les tâches qu'on lui demande. Le SIA peut ainsi coloniser le travail réel, soit en automatisant les pratiques antérieures, soit en éteignant son expression par l'injonction managérial à suivre l'algorithme.
- La qualité du travail peut alors s'en trouver « *empêchée* » si le travailleur n'est plus autorisé de mettre en œuvre ce qu'il estime nécessaire pour effectuer un travail de qualité [18]

Limité dans la possibilité de mobiliser leurs savoir-faire, les travailleurs s'exposent à une déqualification, souvent appelée « ubérisation » quand elle est occasionnée par des algorithmes.

Nicholas Carr [19] constate dans les métiers qui s'automatisent un appauvrissement des tâches cognitives, une déqualification, qui altère la façon d'agir et de penser. France Stratégie perçoit un risque de « *prolétarisation des savoirs et des savoir-faire* » où *« les humains risquent de se voir déposséder de leur expertise en termes de know-how, et de perdre un ensemble de capacités et de compétences, qui non seulement peuvent être utiles à la société, mais qui contribuent aussi à alimenter le respect de soi* » (p. 6) [9].

Critère 5 : Le sentiment de dépossession

4.1 Le SIA réduit-il le travail direct ? (O=1 ; N=0)
4.2 Le SIA rend-il l'activité plus facile à réaliser par tout un chacun ? (O=1 ; N=0)
4.3 Le SIA rend-il des savoir-faire obsolètes ? (O=1 ; N=0)
4.4 Le SIA génère-t-il de nouvelles tâches pour le travailleur ? (O=1 ; N=0)

3.3 La responsabilité

Du latin *respondere*, répondre, la responsabilité exprime le devoir de répondre de ses actes, toutes circonstances et conséquences comprises, c'est-à-dire d'en assumer l'énonciation, l'effectuation, et par suite la réparation voire la sanction lorsque l'attendu n'est pas obtenu. La notion de responsabilité morale va plus loin : elle consiste en une capacité pour un sujet volontaire et conscient de prendre une décision sans en référer au préalable à une autorité supérieure, à pouvoir donner les motifs de ses actes, et à être jugé sur eux. La responsabilité est le contrepoids de la liberté. Il ne peut y avoir de responsabilité sans liberté : nul ne peut être tenu responsable d'actes effectués sous la contrainte.
L'organisation détermine qui est responsable d'une tâche. Cette responsabilité s'étend à l'exécution de la tâche, c'est la responsabilité opérationnelle ; et à la responsabilité des effets de la part réalisée sur le résultat d'ensemble, c'est la responsabilité conséquentialiste. Plus une organisation est complexe, plus les responsabilités sont partagées entre un grand nombre d'individus et plus le sentiment de responsabilité à l'égard du tout se brouille.

L'intégration de machines intelligentes peut affecter la distribution des responsabilités suivant six mécanismes :

- Une fragmentation des responsabilités entre le travailleur et la machine intelligente : la délégation de tâche, a fortiori de tâches décisionnelles, rend le travailleur moins opérationnel *(« pourquoi assumer la responsabilité d'une tâche que je n'exécute plus* ? »). Cette nouvelle division du travail l'éloigne d'une perception globale d'une séquence opératoire et donc d'un sentiment responsabilité à l'égard de l'ensemble.
- Il devient de plus en plus difficile de définir la distribution des responsabilités entre toutes les parties-prenantes (concepteur, ingénieur, programmeur, fabricant, vendeur, utilisateur), notamment dans le cas de machines apprenantes dont le comportement dépend partiellement d'une adaptation à l'environnement. Si toutes les parties-prenantes ont une part de la responsabilité, aucun d'eux n'est entièrement responsable.
- Une emprise des processus qui réduit la liberté : ~~la~~ l'emprise des algorithmes sur la pratique pourrait délier moralement le travailleur de son activité.
- Un effacement du travailleur devant l'autorité machinique : l'efficacité voire la supériorité présumée du SIA peut générer des conduites de retrait par excès de confiance, de contentement (se satisfaire d'une solution jugée correcte mais non optimale au nom de l'efficience), ou de prudence.
- L'automatisation d'une tâche peut conduire à son invisibilisation. Progressivement, la tâche automatisée échappe à l'attention, à la conscience de la situation du travailleur qui se focalise sur les tâches sur lesquelles il intervient. En outre, le robot exécute silencieusement. Basculant dans l'invisible et l'indicible, les tâches déléguées pourraient cesser d'exister socialement et moralement.
- Le problème de l'explicabilité des algorithmes d'apprentissage automatique dont l'effet de « boîte noire » est considéré un obstacle majeur à l'acceptabilité sociale des SIA dans de nombreuses activités soumises à des enjeux élevés d'imputation de la responsabilité (comme dans les SIA à haut risque tels que définis par la Commission Européenne [20]).

L'ensemble de ces facteurs peut ainsi altérer l'éthique du travail, plus précisément ce que Matthew Crawford [21] qualifie de « *vertu infra-éthique* » : une situation où le travailleur est en capacité de jugement, où, contre le « *détachement contemplatif* », il se met en jeu (moralement et physiquement), manifeste de l'intérêt, se confronte à la réalité et peut ainsi faire l'expérience directe de sa responsabilité. Cette éthique du travail est tributaire d'une expérience de l'agir humain qui découle d'une « *friction psychique* » entre l'usager et sa réalisation alors même que les outils informatiques, en minimisant ces frictions par des interfaces toujours plus intuitives, réduisent la conscience de la réalité. Crawford oppose à cette expérience désincarnée, le concept d'« *agir individuel* » comme « *expérience directe de notre responsabilité à l'égard de notre environnement matériel* ».

Critère 6 : La déresponsabilisation

6.1. L'imputation de responsabilités en cas de problème est-elle un enjeu majeur de l'activité et de l'organisation ? (O=1 ; N=0)
6.2. Le SIA utilise des algorithmes d'apprentissage lui permettant de s'adapter dans un environnement aléatoire ? (ce qui génère de l'imprévisibilité dans le comportement du SIA) (O=1 ; N=0)
6.3. Le SIA réduit-il l'espace de jugement du travailleur (en augmentant l'emprise des procédures, en fragmentant les responsabilités, en invisibilisant des actions, en expliquant pas ses décisions recommandations)? (O=1 ; N=0)
6.4. Le SIA peut-il alimenter un effacement volontaire ou inconscient du travailleur (excès de confiance, effet de contentement, excès de prudence) ? (O=1 ; N=0)

©AFIA2022

4. Utilisation de l'outil « MAIAT»

4.1 Quels utilisateurs pour MAIAT?

Le premier cas de figure renvoie à notre propre profil, à savoir un accompagnateur-expert de transformations métiers et organisations liées à l'introduction d'une nouvelle technologie en générale, un SIA en particulier. Dans cette configuration, l'outil sert de guide au diagnostic et l'expertise de l'utilisateur ne justifie pas une formalisation particulièrement aboutie. En vue d'étendre le cercle des utilisateurs, nous envisageons également des scénarios d'usage où l'outil est mobilisé par le fournisseur du SIA ou par son client. Dans cette perspective, MAIAT doit pouvoir fonctionner sans portage : les utilisateurs sont rendus autonomes par un design qui facilitera son appropriation. Se pose alors la question du système d'acteurs pertinent pour réaliser le diagnostic. Nous pensons qu'il doit être réalisé de façon transparente et plurielle par un groupe représentatif de la communauté professionnelle. D'une part, cette approche ouverte est plus favorable à la construction de la confiance qui sera d'autant plus robuste que le diagnostic sera partagé. D'autre part, cela responsabilise toutes les parties-prenantes vis-à-vis d'un SIA qui devra faire l'objet de retour d'expériences et d'améliorations. MAIAT participera en ce sens à une montée en compétence collective autour de l'IA qui peut constituer un temps social fédérateur. Pour autant, cette utilisation collégiale, ouverte et transparente peut aussi inspirer des craintes, en multipliant des questions anxiogènes qui risquent de faire passer la proposition de valeur du SIA au second plan. Les utilisateurs peuvent toutefois être des représentants élus du Comité Social et Economique, qui doit légalement être informé de toute transformations organisationnelles. Or, les représentants élus au CSE peuvent réclamer le statut de « projet important » pour l'introduction d'un SIA. La reconnaissance de ce statut déclenche le recours à une mesure d'expertise afin d'examiner les modifications des conditions de santé, de sécurité et les conditions de travail. Dans ce contexte, notre outil peut contribuer à « dépassionner » la concertation en l'arrimant à des critères et des indicateurs qui organiseront un diagnostic partagé et objectivé.

4.2 Comment fonctionne MAIAT?

Dans sa configuration actuelle, sommaire, MAIAT fonctionne comme un outil de notation :

- Chaque critère est composé de quatre indicateurs
- Les indicateurs se renseignent en répondant « oui » ou « non » à une question. Cette binarité laisse moins de place à la subtilité qu'une échelle graduelle qui permettrait une évaluation plus fine. En l'état actuel, nous avons pourtant maintenu cette modalité. Une échelle graduelle, en produisant des nuances rend moins lisible le diagnostic. Il s'agit de faire remonter des points de vigilance et non d'acter des nuisances. Les questions, certes formulées avec un minimum d'ambiguïté, doivent s'entendre ainsi : « *identifiez-vous un risque de…* ». L'approche binaire a également le mérite de dégager plus clairement des points d'attention et ainsi de faciliter la priorisation des actions de remédiation.
- Chaque indicateur produit un score « 0 » ou « 1 » en fonction de la réponse. Nous avons précisé l'allocation des valeurs de chaque indicateur plus haut. Ces valeurs se cumulent pour former une note entre 0 et 4 pour chaque critère.
- Ces notes formalisent un schéma radar (fig. 1) qui permet de visualiser le résultat du diagnostic. Actuellement, ce schéma ne distingue pas les deux grandes familles de critères (« Bien-être » et « Engagement »). Nous envisageons l'opportunité de les distinguer en les positionnant sur un même schéma afin d'offrir un meilleur visuel. Nous redoutons cependant que cela conduise à une différenciation excessive de critères qui demeurent très emboîtés.

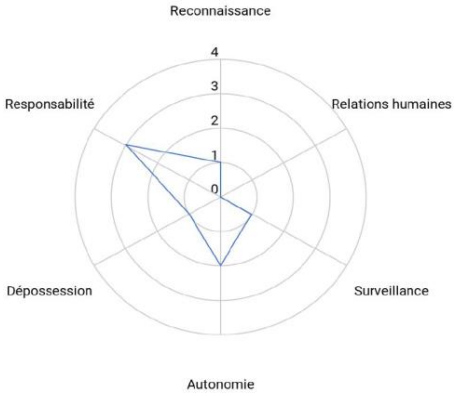


Fig.1 : Visualisation des points d'attention de MAIAT

Une fois le radar consulté, MAIAT permet à l'utilisateur d'analyser les critères un à un. Les quatre indicateurs de chaque critère sont associés à un risque. Lorsque la réponse apportée entraine un risque, un point de vigilance est généré afin de permettre à l'utilisateur de le conscientiser (fig.2). Lorsque ce n'est pas le cas, l'outil génère un point « A ne pas négliger » car nous considérons que les risques ne sont pas totalement écartés et qu'il est donc important de les connaître tous pour pouvoir les identifier en cours d'expérimentation le cas échéant.

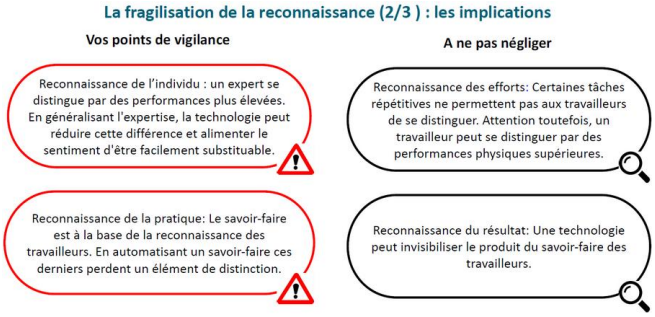


Fig.2 : Visualisation des points de vigilance par critère de MAIAT

Suite à cela l'utilisateur est invité à formuler une explication contextualisée de son diagnostic afin de relier la théorie à des éléments concrets de l'activité des travailleurs. Il peut ensuite saisir des plans d'actions. Pour finir, MAIAT doit permettre de réaliser un suivi dans le temps.

MAIAT ne produit pas de recommandations, il est seulement un outil d'aide au questionnement et à l'évaluation. Nous l'envisageons comme un outil de définition partagée de

situations sociales mal structurées, sur lesquelles les acteurs manquent de ressources et de repères pour agir, plutôt qu'outil de résolution de problèmes par des solutions standardisées. Si MAIAT aide à problématiser, les solutions viennent des acteurs des situations de travail.

4.3 Quand utiliser MAIAT?

L'outil MAIAT peut être utilisé par un fournisseur pour évaluer la robustesse sociale de son SIA en vue d'améliorer le design de son système et/ou d'accompagner ses clients sur les enjeux sociaux du SIA. Nous concevons cependant MAIAT en référence au contexte du programme Confiance AI, à savoir l'expérimentation d'un assistant vocal intelligent dans un environnement industriel et plus généralement la mise à disposition d'outils génériques pour faciliter la construction de la confiance dans les SIA. A ce titre, nous envisageons l'utilisation de MAIAT dans le cadre d'un projet d'intégration d'un SIA afin d'identifier des points d'attention qu'il suscite dans un contexte de déploiement donné. Dans cette configuration d'usage, MAIAT est outil de diagnostic et de suivi de ces points d'attention en vue d'accompagner un processus de socialisation du SIA.

- Un outil de diagnostic : MAIAT permet de réaliser un pronostic d'usage à partir des résultats de l'évaluation. Cependant, ce diagnostic sera réalisé après un temps d'utilisation forcément limité qui ne permettra pas d'épuiser toutes les situations. Il pourrait en outre reposer davantage sur une représentation de l'activité que sur l'activité réelle.
- Un outil de suivi : l'usage de MAIAT ne doit dès lors pas s'arrêter à l'établissement d'un diagnostic statique mais être mobilisé dans le cadre d'un suivi et de retours d'expérience réguliers. D'une part, à l'épreuve du travail réel, les indicateurs mesurés peuvent être réévalués. D'autre part, l'usage du SIA peut faire apparaître de nouvelles situations de travail, mais aussi de nouveaux savoir-faire porteurs d'opportunités imprévisibles au moment du diagnostic.

Tout au long du parcours d'un SIA (idéation, conception, expérimentation, déploiement), s'expriment des représentations, puis des retours d'expérience, durant lequel le SIA est transformé par le travail et le travail transformé par le SIA. MAIAT a vocation à scander ce processus de socialisation autour d'indicateurs dynamiques mesurés et renseignés collectivement.

5 Les premières utilisations de MAIAT

Notre projet de recherche initié dans le cadre du programme Confiance AI, en partenariat avec Renault Group et Spix Industry, a permis de réaliser des premiers tests de MAIAT. Trois utilisateurs au profil d'ingénieur/manager ont pu solliciter MAIAT afin d'identifier les risques associés à l'intégration de trois SIA différents :

- Un assistant vocal pour la saisie de données de traçabilité sur un poste de contrôles et retouches de soudure.
- Un système d'assistance au contrôle visuel permettant la détection d'anomalie de fabrication.
- Un système mobile d'aide à la détection d'anomalies par vision permettant la caractérisation de problèmes de qualité.

Les tests ont été articulés autour de quatre temps :

1- L'ensemble des indicateurs ont été intégrés dans un questionnaire. Les utilisateurs ont pu répondre à celui-ci via un Google Forms.
2- Un questionnaire d'évaluation des indicateurs a été utilisé afin que les utilisateurs puissent évaluer (1) le temps de compréhension nécessaire et (2) la facilité à trouver la réponse.
3- Le diagnostic (comprenant le radar, les points vigilances par critère, le tableau de suivi) a été envoyé à chaque participant sous forme de Powerpoint.
4- Un entretien a été réalisé individuellement avec chaque participant afin d'évaluer l'expérience globale avec MAIAT, les différents éléments qui le compose ainsi que les choix d'interface.

Suite à ces tests, plusieurs points forts ont été identifiés. Le plus important est la capacité de MAIAT à structurer une analyse qualifiée autour de thèmes sortant du domaine de compétences des managers (« *Intéressant pour moi, t'as pas forcément ça en tête. C'est génial d'avoir ça* » ; « *… on a cellules de performances. Les gens de cette cellule-là devraient l'utiliser avant de déployer tous systèmes d'IA* »). Cela confirme notre postulat de base : trouver les bonnes réponses nécessite de se poser de bonnes questions. Nous avons aussi noté la pertinence du système de visualisation par radar, celui-ci étant répandu dans le management visuel dans l'industrie *(*« *Typiquement les outils qu'on utilise* »). Il permet rapidement d'identifier les critères particulièrement à risque. Par la suite, le système par points de vigilance permet d'identifier et de caractériser rapidement les risques sociaux (« *Si j'avais eu cet outil avant j'aurais fait moins d'erreurs* »). L'articulation de présentation du diagnostic de MAIAT est perçue comme très cohérente et permet d'avancer en compréhension dans la caractérisation des risques. Nous ajouterons aussi le potentiel formateur/sensibilisateur de l'outil (« *je suis désormais plus sensible à l'aspect socio-technique* »).

Concernant les points à améliorer, 30% des questions comme présentant ont dû être reformulées, vulgarisées. Il est en effet primordial pour nous de traduire le jargon expert propre sciences humaines et sociales afin d'être compris par le plus grand nombre. Pour finir, la formalisation du diagnostic au travers d'un Powerpoint a rencontré quelques limites. La première renvoie au difficile équilibre à trouver entre le besoin d'informations à afficher à l'écran et celui d'éviter une surcharge cognitive. Le deuxième est le caractère figé et passif du document qui ne guide aucunement l'utilisateur dans l'expérience de complétion de MAIAT.

Ces retours nous ont poussé à travailler sur une interface logicielle dédiée permettant de maitriser l'expérience d'utilisation de MAIAT, de la complétion du questionnaire initial au suivi de l'intégration du SIA. Une interface dynamique permettrait ainsi de présenter des informations contextuelles selon le besoin de l'utilisateur mais surtout que les différentes étapes d'utilisation de MAIAT viennent activement à lui pour le guider. Notre objectif est de permettre l'étude de l'acceptabilité sociale de l'intégration de l'IA au

©AFIA2022

travail à travers une interface elle-même… acceptable.

6 Conclusion

MAIAT est un outil d'accompagnement de la construction sociale de la confiance dans un SIA dédié au travail. Son expérimentation dans le cadre du programme Confiance AI a débuté en avril 2022 avec des résultats encourageants qui plaident en faveur de l'intérêt d'une approche structurée [22] pour aborder les effets sociaux des SIA. Une campagne de tests en dehors du programme Confiance AI vient d'être lancée. La matrice de MAIAT est également à l'étude par le LaborIA qui pourrait en faire l'outil d'opérationnalisation de son approche fondée sur les « capabilités » du prix Nobel d'Economie Amarty Sen. Celui-ci avait notamment contribué au rapport Stiglitz commandé en 2008 par le président Sarkozy pour formuler des propositions d'indicateurs de richesse qualitatif alternatifs au PIB susceptible de mieux mesurer le progrès social. Les capabilités répondent à la question « *qu'est-ce que cette personne est capable de faire et d'être* » ? [23], soit un ensemble de possibilités interdépendantes de choisir et d'agir. Elles ne décrivent pas simplement des capacités dont une personne est dotée mais des possibilités crées par une combinaison de capacités personnelles et d'un environnement politique, social et économique. Nous pourrions ajouter « technologique ». Dans cette perspective, MAIAT pourrait s'enrichir de deux nouvelles familles de critères :

- Organisationnel car l'organisation est l'environnement à l'intérieur duquel se construit la nouvelle configuration capital/travail.
- Managérial, car le manager, en tant que travailleur, est également interpelé dans ses pratiques, transformation qui aura des conséquences sur ses collaborateurs.

MAIAT est enfin aussi discuté avec les chercheurs de l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents de travail et des maladies professionnelles (INRS) dont les rendus de travaux sur les effets de l'IA sur la qualité de vie au travail sont attendus fin 2022.

Remerciements

Nous remercions nos partenaires du programme Confiance AI, en particulier Renault Group et Spix Industry. Nous remercions également le Future of Work Working Group du PMIA pour son travail de recensement de cas d'usage réels de l'IA au travail. Nous remercions enfin l'équipe du LaborIA pour notre prometteuse coopération. Nous remercions enfin Alexandre Blanche, Samuel Crespy et Augustin Debray pour avoir relu et commenté les premières versions de ce texte. Les auteurs assument l'entière responsabilité de son contenu.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État au titre du programme France 2030 dans le cadre de l'Institut de Recherche Technologique SystemX.

7 Références

[1] M. Arntz, T. Gregory, U. Zierahn, « The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis », *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*, No. 189 ; Paris, OECD Publishing, 2016.

[2] GPAI, Future of Work, AI Observatory at the Workplace: https://gpai.ai/projects/future-of-work/ai-at-work-observation-platform/ai-observatory-at-the-workplace.pdf

[3] MTEI : https://travail-emploi.gouv.fr/actualites/l-actualite-du-ministere/article/laboria-centre-de-ressources-et-d-experimentations-sur-l-intelligence

[4] Confiance AI: https://www.confiance.ai/

[5] J.-P. Brun, N. Dugas, « La reconnaissance au travail : analyse d'un concept riche de sens », *Gestion*, volume 30, numéro 2, pp. 79-88, été 2005.

[6] M.-E. Bobillier Chaumon, M.E., « Acceptation située des TIC dans et par l'activité : Premiers étayages pour une clinique de l'usage », *Psychologie du Travail et des Organisations*, Vol. 22(1), pp. 4-21, 2016.

[7] D. Wolton, *Penser la communication*, Flammarion, 1997.

[8] S. Tisseron, *Le jour où mon robot m'aimera. Vers l'empathie artificielle*, Albin Michel, 2015.

[9] V. Scardigli, *Un anthropologue chez les automates*, PUF, 2001.

[10] France Stratégie, *Anticiper les impacts économiques et sociaux de l'Intelligence Artificielle. Annexe 1 : L'intelligence Artificielle en quête d'acceptabilité et de confort*, 2016.

[11] Cnil, La surveillance, video-protection au travail, 2019 : https://www.cnil.fr/sites/default/files/atoms/files/travail-vie_privee.pdf

[12] S. Head, *Mindless: Why Smarter Machines are Making Dumber Humans?*, Basic Books, 2014.

[13] J.-P, Meyer, J.P, N.J. Allen, (1991) A Three-Component Conceptualization of Organizational Commitment. *Human Resource Management Review*, 1, pp. 61-89.

[14] F. Dubet, *Injustices. L'expérience des inégalités au travail*, Seuil, 2006.

[15] M., Freyssenet, *Le processus de déqualification-surqualification de la force de travail*, Paris, CSU, 1974.

[16] Mission Villani, *Donner un sens à l'intelligence artificielle*, rapport mission parlementaire, 2018.

[17] Y. Clot, *Le travail sans l'homme*, La Découverte, 1995.

[18] Y. Clot, *Le travail à cœur. Pour en finir avec les risques psychosociaux*, La Découverte, 2015.

[19] N. Carr, *Remplacer l'humain. Critique de l'automatisation de la société*, L'Echappée, 2017.

[20] Commission Européenne, *Proposition de règlement du parlement européen et du conseil établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle (législation sur l'intelligence artificielle) et modifiant certains actes législatifs de l'union*, 2021.

[21] M., Crawford, M., *Éloge du carburateur*, La Découverte, 2016.

[22] D. Kahneman, *Noise. Pourquoi nous faisons des erreurs du jugement et commencer les éviter*, Odile Jacob, 2021.

[23] M. Nussbaum, *Capabilités. Comment créer les conditions d'un monde plus juste ?* Climats, 2011.

Le problème du décor revisité : un modèle logique pour le diagnostic d'erreurs humaines

Valentin Fouillard[1,2], Nicolas Sabouret[1], Safouan Taha[2], Frédéric Boulanger[2]

[1] Université Paris-Saclay, CNRS, LISN, 91405, Orsay, France
[2] Université Paris-Saclay, CNRS, ENS Paris-Saclay, CentraleSupélec, LMF, 91190, Gif-sur-Yvette, France

prenom.nom@universite-paris-saclay.fr

Résumé

Cet article présente un modèle logique pour étudier et diagnostiquer les erreurs de décision commises par des humains dans des systèmes critiques comme les avions. Notre approche s'appuie sur la révision de croyance pour calculer les états mentaux possibles de l'opérateur à partir des observations et actions enregistrées. Nous montrons que notre modèle capture différentes formes d'incohérences qui correspondent à des erreurs de raisonnement possibles de l'opérateur. Certaines de ces erreurs sont liées à un problème de distorsion du décor*, c'est-à-dire à des déviations du comportement attendu selon le principe d'inertie connu sous le nom de « problème du décor ».*

Mots-clés

Révision de croyance, diagnostic, erreur humaine

Abstract

This paper presents a logic-based framework to study and put forward explanations for erroneous decision-making by human operators. Our approach is based on belief revision to compute the operator's possible mental states from recorded actions and observations. We demonstrate how our model captures different forms of inconsistencies in the logic model, which correspond to possible reasoning errors by the operator. Some of these errors can be related to a Frame Distortion Problem*, namely a deviation from the expected behaviour under the inertia principle known as the Frame Problem.*

Keywords

Belief revision, diagnosis, human error

1 Introduction

L'erreur est humaine, c'est pourquoi nous la retrouvons dans de nombreuses situations : erreur d'interprétation, distraction, violation des règles, *etc* [11]. Ces erreurs peuvent conduire à des accidents graves dans des domaines critiques comme la sûreté nucléaire, le transport aérien, la médecine ou l'ingénierie spatiale. Comprendre ce qui s'est passé dans le cas d'un incident ou d'un accident est donc essentiel pour éviter qu'une telle situation se répète et pour concevoir de nouveaux systèmes qui prennent en compte ces facteurs humains [17]. La littérature du domaine parle d'« analyse de l'erreur humaine » (*human error analysis* en anglais).

Pour mener à bien cette analyse de l'erreur humaine, les experts doivent comprendre précisément la situation et poser des hypothèses sur les états mentaux des opérateurs humains pour expliquer leurs erreurs. Prenons l'exemple du transport aérien. Dans ce domaine, les enregistreurs de vol (les « boites noires ») permettent aux experts d'avoir accès à l'ensemble des informations des instruments de vol, à l'état de l'appareil et aux conversations dans le cockpit. Ils utilisent ces informations pour comprendre ce que les pilotes ont compris de la situation et pour expliquer pourquoi ils ont effectué des actions erronées.

La thèse que nous défendons dans cet article est que la modélisation formelle en logique constitue un fondement solide pour développer des outils semi-automatiques d'analyse de l'erreur humaine. En effet, le problème de l'identification des erreurs de décision dans une séquence d'actions est similaire à un problème de diagnostic, un domaine de l'IA très actif depuis les années 80 et pour lequel de nombreux modèles logiques ont été proposés [19, 16, 18]. Cependant l'utilisation de ces modèles logiques pour l'analyse de l'erreur humaine est difficile car ces modèles implémentent des raisonnements complètement rationnels, comme le principe d'inertie des croyances lié au problème du décor de McCarthy et Hayes [15]. Au contraire, les facteurs humains qui rentrent en jeu dans les erreurs de prise de décision ont tendance à casser ces principes. Ainsi le diagnostic logique des erreurs humaines nécessite de revoir ces principes rationnels pour permettre des déviations des comportements attendues. C'est ce que nous nommons le *problème de la distorsion du décor*.

Cet article propose un modèle logique qui supporte la distorsion du décor pour construire une série d'états mentaux menant à un raisonnement erroné. Il est organisé de la manière suivante. La section 2 introduit la problématique de recherche. La section 3 décrit notre modèle qui permet de représenter la situation d'accident et de calculer les états mentaux successifs en prenant en compte l'inertie des croyances. La section 4 montre, à travers différentes incohérences, dont la « distorsion du décor » que nous avons men-

©AFIA2022

tionnée ci-dessus, comment nous pouvons diagnostiquer les erreurs humaines dans notre modèle. Enfin, les deux dernières sections abordent les travaux connexes (section 5) et des perspectives de notre modèle (section 6)

2 Définition du problème

Notre objectif est d'utiliser le diagnostic pour retrouver les séquences d'états mentaux d'un opérateur, représenté formellement comme un agent, qui permettent d'expliquer un accident. Pour cela, nous utilisons le *consistency based diagnosis* présenté dans la section suivante.

2.1 Consistency-based diagnosis

Le diagnostic consiste à déterminer quels composants d'un système ont causé un comportement anormal sachant un ensemble d'observations. Dans ce contexte, le *consistency based diagnosis* proposé par Reiter [19] est un modèle logique pour le diagnostic automatique qui consiste à retrouver la cohérence entre la description du comportement du système et les observations. Ce modèle comporte trois ensembles logiques :

— SD un ensemble de formules logiques qui décrit le système,
— ASS un ensemble de prédicats qui décrit les *hypothèses* de la forme $\neg ab(c)$, *i.e* le composant c est supposé se comporter normalement,
— OBS une conjonction de prédicats qui décrit une observation du système.

Quand $SD \cup ASS \cup OBS$ est incohérent, un diagnostic Δ est un ensemble minimal d'*hypothèses* tel que $SD \cup (ASS \setminus \Delta) \cup OBS$ est cohérent. En d'autres termes, un diagnostic est un ensemble minimal d'éléments dont on doit supposer qu'ils ont un comportement anormal pour retrouver la cohérence avec les observations.

Notre modèle d'analyse d'erreur humaine est basé sur cette approche de diagnostic par recherche de la cohérence (*consistency-based diagnosis*) avec quelques adaptations que nous présentons dans les sections suivantes. La principale modification provient de ce que nous voulons étudier les états mentaux, qui peuvent différer de la vérité du monde. C'est pourquoi nous considérons qu'un état mental est composés de différents éléments (croyances, règles de raisonnement, observations...) qui sont par défaut ceux qui correspondent à la réalité du monde physique. Toutefois, l'état mental d'un agent humain peut être altéré par différents facteurs (erreurs de raisonnement, occultation d'informations), et nous considérons qu'un diagnostic d'erreur humaine est un ensemble minimal d'éléments qu'il faut retirer de l'état mental de l'agent pour retrouver la cohérence avec les actions qu'il a effectuées. Nous présentons dans la section 3 ce modèle et l'algorithme de diagnostic qui va avec.

2.2 Le problème du décor

Le problème du décor (*frame problem* en anglais) a été introduit par John McCarthy et Patrick Hayes [15] en 1969. C'est un problème très connu en modélisation logique qui peut être décrit comme la difficulté à représenter les effets d'une action en logique sans avoir à représenter explicitement tous les non-effets évidents [22]. Pour illustrer ce propos, considérons une formalisation simple, en logique du premier ordre, du *Yale Shooting Problem* (YSP) proposé par Hanks et McDermott [10] :

$$\begin{array}{lcl} \textit{init} & = & \mathrm{alive}(0), \neg\,\mathrm{loaded}(0) \\ \textit{actions} & = & \mathrm{Load}(0), \mathrm{Wait}(1), \mathrm{Shoot}(2) \\ \textit{rules} & = & \mathrm{Load}(0) \rightarrow \mathrm{loaded}(1), \\ & & (\mathrm{Shoot}(2) \wedge \mathrm{loaded}(2)) \rightarrow \neg\,\mathrm{alive}(3) \end{array}$$

0,1,2,3 correspondent à des instants successifs. Les prédicats dans *init* décrivent la situation initiale : la dinde est vivante et le pistolet est chargé. Les prédicats dans *actions* modélisent le déroulement des actions (l'agent charge le pistolet, attend et tire) et les prédicats dans *rules* modélisent la physique du monde : tirer sur la dinde avec un pistolet chargé la tue.

Avec cette modélisation, le bon sens nous dit que $\neg\,\mathrm{alive}(3)$ est vrai. Toutefois, les effets de l'action *Wait* ne sont pas définis dans le modèle et ne peuvent être déduit sans des règles logiques qui indiquent que $\mathrm{loaded}(t+1) = \mathrm{loaded}(t)$ quand rien d'autre ne dit le contraire. Écrire ces règles manuellement pour chaque fait initial et toutes les actions possibles est une charge trop lourde dans le cas général. C'est ce qu'on appelle le problème du décor.

Une première solution à ce problème a été proposée par McCarthy [14] en utilisant la *circumscription* et en sélectionnant les modèles (c'est-à-dire les ensembles de propositions) qui minimisent le nombre de changements dans le monde. Toutefois, cela ne marche pas sur le YSP où deux solutions minimales peuvent être trouvées : la solution conforme à notre intuition, dans laquelle $\mathrm{loaded}(2) \wedge \neg\,\mathrm{alive}(3)$ est vrai, mais aussi une solution contre-intuitive $\neg\,\mathrm{loaded}(2) \wedge \mathrm{alive}(3)$ dans laquelle le pistolet se décharge magiquement pendant l'action *Wait*.

D'autres solutions on été proposées au fil du temps pour résoudre ce problème, comme les axiomes de Reiter sur les états successeurs [20] ou l'occlusion de Sandewall [21]. Toutes les solutions consistent à ajouter des éléments pour distinguer les prédicats ou propositions qui doivent sortir de l'inertie des clauses du décor. En d'autres termes, ils permettent une description de comment le monde change ou ne change pas sachant les actions occurrentes.

Comme tout autre modèle logique d'actions et de changements, notre modèle d'analyse d'erreur humaine fait face au problème du décor. Mais en plus de cela, nous devons faire face à un autre problème : celui de la *distorstion du décor* que nous illustrons dans la prochaine section en utilisant une version remaniée du YSP.

2.3 Le problème de la distorsion du décor

Supposons, dans le YSP, que l'agent ne voulait pas tuer la dinde. Nous sommes face à une situation d'erreur de prise de décision et nous voulons comprendre pourquoi l'agent a finalement appuyé sur la détente. Pour modéliser cette situation, nous ajoutons un désir dans la liste des prédicats :

$$\textit{desires} \quad = \quad \mathit{desire}(\mathrm{alive}(3))$$

Cela indique que l'agent veut que $\mathrm{alive}(3)$ soit vrai. Du point de vue d'un observateur extérieur, en faisant l'hypothèse que le problème du décor est résolu dans le modèle (i.e que l'agent devrait croire à $t = 2$, que le pistolet reste chargé), il n'y a aucune raison que l'agent choisisse de tirer ($\mathrm{Shoot}(2)$). Mais il l'a fait. La question est alors : qu'est ce qui peut expliquer ce comportement apparemment irrationnel ?

Une explication possible serait que l'agent a oublié que le pistolet était chargé. Cela implique que l'agent croyait que le pistolet était chargé au pas de temps 1, mais plus au pas de temps 2 : $\mathrm{loaded}(1) \wedge \neg\,\mathrm{loaded}(2)$. Pourtant cela n'est pas attendu avec l'inertie des croyances de l'agent, bien que ce soit une explication plausible du comportement irrationnel de l'agent.

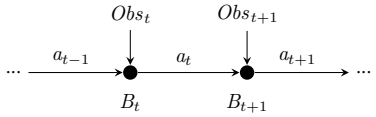
Cet exemple montre que le diagnostic des erreurs humaines selon un modèle logique nécessite de capturer des déviations à tous les niveaux, y compris dans le principe d'inertie des croyances.

Cette situation n'est pas une simple construction de l'esprit. Considérons par exemple le crash du Mont-Saint-Odile [3]. Les pilotes ont effectué une erreur de programmation du pilote automatique avec une vitesse verticale trop grande parce qu'ils avaient oublié qu'ils avaient précédemment configuré le système en mode Vertical Speed (vitesse de descente) au lieu de Flight Path Angle (angle de descente). Les humains peuvent réellement oublier ce qu'ils avaient fait précédemment et ainsi aller à l'encontre du principe d'inertie des croyances. Concrètement, la base de croyance de l'agent a été modifiée entre les deux pas de temps, sans aucune raison !

Ce que nous appelons le *problème de la distorsion du décor* consiste à trouver un diagnostic par recherche de la cohérence (*consistency based diagnosis*) à une situation qui considère des déviations possibles de l'inertie du décor. Dans la prochaine section, nous présentons notre modèle logique qui permet de réaliser ce type de diagnostic.

3 Un modèle logique pour l'analyse des erreurs humaines

Notre approche repose sur la modélisation des actions comme des transitions entre les états mentaux de l'agent, de manière similaire au *calcul des situations* [20], à ceci près que nous modélisons les changements de l'état mental et non du monde lui-même. Nous ajoutons également les observations à chaque pas de temps, qui correspondent aux nouvelles informations reçues par l'agent depuis le monde.



3.1 Modélisation de situation

Nous décrivons les croyances et actions de l'agent par un ensemble de propositions $p_t \in \mathcal{P}$. Chaque proposition p est indexée par un pas de temps t. Par exemple :

$\neg\,\mathrm{alive}_3$	$\rightarrow$	L'agent croit que la dinde est morte à $t = 3$
$\mathrm{Load}_2 \in \mathcal{A}ct$	$\rightarrow$	l'agent charge le pistolet à $t = 2$

L'utilisation d'une valeur d'indice temporel t' égale, plus grande ou plus petite que le pas de temps courant t nous permet ainsi de représenter des croyances à propos du présent, du passé ou du futur.

Nous définissons l'ensemble des croyances initiales $\mathcal{I}nit$ qui représente les croyances des agents au pas de temps $t = 0$. Par exemple $\mathrm{alive}_0 \in \mathcal{I}nit$ indique que l'agent croit initialement que la dinde est vivante. Nous considérons aussi les ensembles de prédicats $Obs_0, \ldots, Obs_n$, chaque Obs_t correspond à des observations possibles au pas de temps t. Par exemple, si $\mathrm{loaded}_1 \in Obs_1$, alors il est possible que l'agent observe que le pistolet est chargé au pas de temps 1. Enfin, nous considérons la liste $\mathcal{T} = [a_0, \ldots, a_n]$ avec $a_i \in \mathcal{A}ct$, qui représente la liste des actions effectuées par l'agent (une action par pas de temps). Par exemple, $\mathrm{Load}_0 \in \mathcal{T}$ indique le fait que l'agent a chargé le pistolet au pas de temps 0.

Nous utilisons des formules logiques pour modéliser le raisonnement et le comportement de l'agent. Nous notons $\mathcal{R}$ l'ensemble de toutes les règles que l'agent peut utiliser. Chaque règle $R_i \in \mathcal{R}$ obéit à la grammaire suivante :

$$R_i ::= \varphi \mid [\varphi]\, a \mid a :: \varphi \qquad \varphi \in \mathfrak{F}(\mathcal{P}, \wedge, \neg),\ \ a \in \mathcal{A}ct$$

où φ est une formule logique propositionnelle utilisant des propositions atomiques de $\mathcal{P}$ ainsi que tous les connecteurs logiques classiques ($\wedge, \vee, \rightarrow$, etc). $[\varphi]a$ indique que la pré-condition φ doit être vraie pour effectuer l'action a. Enfin, $a :: \varphi$ indique que la post-condition φ est vraie après que a a été effectué. L'indice temporel t dans une règle est toujours une variable libre. Par exemple :

$$R_1 \equiv \mathrm{Load}_t :: \mathrm{loaded}_{t+1}$$

modélise l'effet de l'action « charger le pistolet » à n'importe quel pas de temps t.

Pour notre algorithme d'analyse de l'erreur humaine qui sera présenté dans la prochaine section, nous définissons deux fonctions :

- $\mathit{prec} : \mathcal{A}ct \longrightarrow \mathcal{R}$ qui retourne l'ensemble des règles R_i qui définissent les pré-conditions d'une action donnée.
- $\mathit{effect} : \mathcal{A}ct \longrightarrow 2^{\mathcal{P}}$ qui retourne l'ensemble des propositions qui apparaissent dans les post-conditions (i.e après le séparateur :: dans une règle) d'une action donnée.

Nous modélisons les buts de l'opérateur (les désirs qui doivent être satisfaits à chaque pas de temps) par un ensemble $\mathcal{D}$ de littéraux négatifs ou positifs avec un indice temporel libre. Par exemple, $\mathrm{alive}_t \in \mathcal{D}$ indique que l'agent veut que la dinde soit en vie à chaque pas de temps. Ainsi, chaque situation dans laquelle $\neg\,\mathrm{alive}_t$ peut être inféré sera considérée comme incohérente du point de vue de l'agent.

©AFIA2022

3.2 États mentaux

À partir de la modélisation des situations présentée ci-dessus, notre objectif est de construire un diagnostic sous la forme d'une suite d'états mentaux $B_0 \dots B_n$ dans laquelle chaque état mental B_t est un ensemble de propositions dans $\mathcal{P}$ et de règles dans $\mathcal{R}$ qui décrivent les croyances, observations, désirs et règles de raisonnement de l'agent pour le pas de temps t.
L'état mental initial est :

$$B_0 = \mathcal{I}nit \cup \mathcal{R} \cup \mathcal{D}$$

Chaque état successif B_t est construit à partir de l'état précédent B_{t-1} en ajoutant les observations Obs_t et l'action effectuée a_t :

$$B_t = B_{t-1} \cup Obs_t \cup \{a_t\}$$

Nous notons $B_t \vdash \varphi$ pour indiquer que φ est une conséquence de B_t dans la logique propositionnelle classique. Par exemple :

$$\frac{B_t \vdash \psi \rightarrow \varphi, \quad B_t \vdash \psi}{B_t \vdash \varphi} \qquad \frac{a_t \in B_t, \quad [\varphi]\ a_t \in B_t}{B_t \vdash \varphi}$$

Comme nous nous reposons sur la logique propositionnelle, nous utilisons un solveur SAT pour calculer la valeur de vérité des propositions. Concrètement, $B_t \vdash \varphi$ si et seulement si $B_t \wedge \neg\varphi$ est insatisfaisable.

Nous disons que B_t est incohérent quand celui-ci est insatisfaisable, ce qui est équivalent à $B_t \vdash \bot$. L'objectif de notre modèle de diagnostic est de « réparer » ces états de croyances incohérents.

3.2.1 Les prédicats *known*

Une première difficulté que nous devons résoudre est la gestion des propositions qui ne sont pas connues par l'agent. En effet, puisque que nous gérons des croyances et non des faits, une proposition φ est *connue* par un agent au pas de temps t si et seulement si $B_t \vdash \varphi$ ou $B_t \vdash \neg\varphi$. Dans le cas contraire (φ n'apparaît pas dans l'état mental), nous disons qu'elle est inconnue. Le raisonnement de l'agent peut ne pas être le même selon qu'une proposition est connue ou non.
Considérons par exemple l'état mental B_t comprenant les règles et observations suivantes :

$$\mathcal{R} \equiv \left\{ \begin{array}{lcl} R_1 & \equiv & \varphi \rightarrow \neg\psi \\ R_2 & \equiv & \neg\varphi \rightarrow \neg\gamma \end{array} \right\} \qquad Obs_t \equiv \{\gamma, \psi\}$$

Le comportement que nous souhaitons dans notre modèle est le suivant :

— Si φ est connu dans B_t, φ doit être considéré comme vrai ou faux par l'agent et, par conséquent, $\neg\psi$ ou $\neg\gamma$ doit être inféré.
Cela mène à une incohérence avec Obs_t (et donc à la nécessité d'une correction, qui est l'objet de notre travail de diagnostic).

— À l'inverse, si φ est inconnu, le comportement attendu est qu'il n'y ait pas d'incohérence : l'agent ne sait rien sur φ, donc il ne peut rien en déduire et donc son état mental n'est pas contradictoire.
Malheureusement, le solveur SAT peut inférer φ et $\neg\varphi$ par les formules ci-dessus (il cherche en effet les valeurs possible pour nier la formule passée en paramètre) et il renvoie donc que B_t est incohérent.

Pour implémenter le comportement souhaité (pas d'incohérence trouvée quand φ est inconnu), nous introduisons les prédicats $known$ dans notre modèle. Notre objectif est de forcer le modèle à appliquer les règles de raisonnement uniquement sur les propositions connues. Concrètement, pour chaque proposition φ, $known_\varphi$ indique que φ est connu par l'agent. Chaque proposition φ ou $\neg\varphi$ qui apparaît dans une règle $R_k \in \mathcal{R}$ est transformée respectivement en $\varphi \wedge known_\varphi$ ou $\neg\varphi \wedge known_\varphi$. Ainsi l'exemple précédent devient :

$$\begin{array}{lcl} R_1 & \equiv & (\varphi \wedge known_\varphi) \rightarrow (\neg\psi \wedge known_\psi) \\ R_2 & \equiv & (\neg\varphi \wedge known_\varphi) \rightarrow (\neg\gamma \wedge known_\gamma) \end{array}$$

En conséquence, une proposition est forcée à connu ($known$) seulement si c'est une conséquence d'une règle avec une prémisse qui est $known$ et vraie.
Les croyances initiales dans $\mathcal{I}nit$, les observations et les actions à chaque pas de temps t sont forcées à être $known$ dans B_t afin de déclencher les règles de raisonnement. Par inférence, toutes les croyances dérivées par de telles règles de raisonnement sont mises à $known$ aussi. Les autres prédicats restent inconnus de l'agent tout au long du processus, sauf s'ils peuvent être déduits.

3.3 Inertie du modèle : le problème du décor

Le Problème du Décor nous dit que tout ce que l'agent connaît (ce qui est défini par les prédicats $known$ à $t-1$) doit être aussi connu à t, sauf si un changement est induit par les observations ou les effets d'une action. Par exemple, si $\text{alive}_0 \in B_0$, nous attendons que $\text{alive}_1 \in B_1$ sauf indication contraire.
Pour résoudre ce problème, nous introduisons deux prédicats qui forcent une proposition à garder la même valeur et le même état de connaissance :

— $keep^{(v)}$ pour maintenir la valeur de vérité d'une proposition φ :

$$keep^{(v)}_{\varphi_t} \equiv (\varphi_t \longleftrightarrow \varphi_{t-1})$$

— $keep^{(k)}$ pour maintenir l'état de connaissance d'une proposition φ :

$$keep^{(k)}_{\varphi_t} \equiv (known_{\varphi_t} \longleftrightarrow known_{\varphi_{t-1}})$$

Nous définissons les propositions $keep^{(k)}_{\varphi_t}$ et $keep^{(v)}_{\varphi_t}$ pour chaque prédicat qui apparaît dans les croyances initiales, les observations et les effets des actions. Nous les appelons *prédicats primitifs* et notons $\mathfrak{P}_t$ l'ensemble des nouvelles propositions primitives qui doivent être maintenues pour le

pas de temps t :

$$\begin{aligned}\mathfrak{P}_1 &= \mathcal{I}nit\\ \mathfrak{P}_{t>1} &= Obs_{t-1} \cup \mathit{effect}(a_{t-1})\end{aligned}$$

Les propositions *keep* qui doivent être maintenues au pas de temps t accumulent les propositions *keep* précédentes du pas de temps $t-1$ ainsi que les nouvelles. Nous définissons les ensembles $\mathfrak{K}_t^{(v)}$ et $\mathfrak{K}_t^{(k)}$ qui contiennent respectivement toutes les propositions $keep^{(v)}$ et $keep^{(k)}$ qui doivent être dans la base de croyance pour le pas de temps t :

$$\begin{aligned}\mathfrak{K}_t^{(v)} &= \mathfrak{K}_{t-1}^{(v)} \cup \bigcup_{\varphi \in \mathfrak{P}_t} \{keep_\varphi^{(v)}\}\\ \mathfrak{K}_t^{(k)} &= \mathfrak{K}_{t-1}^{(k)} \cup \bigcup_{\varphi \in \mathfrak{P}_t} \{keep_\varphi^{(k)}\}\end{aligned}$$

Ajouter ces propositions *keep* dans l'état mental nous permet de traiter le problème du décor. À partir des prédicats primitifs et des règles de l'agent, nous pouvons retrouver toutes les autres propositions par inférence. La prochaine section montre comment les actions et changements peuvent modifier ces règles *keep*.

Pour faciliter la lecture, les prédicats *known* et les propositions *keep* sont omises dans les prochains exemples.

3.4 La révision de croyance dans un agent rationnel

Notre premier objectif est de modéliser un agent rationnel qui reçoit des observations et effectue des actions. En d'autres termes, chaque B_t successif doit être cohérent afin de représenter le fait que l'agent *avait une bonne raison d'effectuer l'action* sachant ce qu'il pouvait observer et croire. Toutefois, deux cas d'incohérence peuvent apparaître dans le modèle :

(1) Une observation dans Obs_t n'est pas cohérente avec l'état mental précédent B_{t-1}

(2) Une action a_t n'est pas cohérente avec les observations, désirs et l'état mental précédent

Ce sont deux problèmes distincts. Résoudre (1) revient à faire une *révision de croyance* [8]. Le but est de déterminer quelle croyance ignorer (celle à retirer du système) face à des informations contradictoires. Ce problème a été étudié par [1] et a résulté en la définition d'AGM, un ensemble d'axiomes qui caractérise un opérateur de révision de croyance *minimal*. L'idée derrière cette minimalité est que les agents rationnels ont tendance à garder leurs anciennes croyances.

Résoudre (2) correspond à trouver un *consistency based-diagnosis* que nous avons présenté dans la sous-section 2.1 (*i.e* le comportement de l'agent n'est pas celui attendu). Toutefois, Wassermann montre qu'un opérateur de révision de croyance peut être utilisé pour effectuer une *consistency based-diagnosis* et vice versa [27] car ces deux méthodes recherchent une solution minimale.

Pour cette raison, nous proposons d'utiliser le *Minimal Correction Set* (MCS) pour implémenter l'opérateur de révision de croyance qui permet de résoudre les deux problèmes.

Pour un système $\Phi = \{\phi_1, \phi_2 \dots \phi_n\}$ donné, $M \subseteq \Phi$ est un MCS de Φ ssi :

— $\Phi \setminus M$ est cohérent

— $\forall \phi_i \in M, (\Phi \setminus M) \cup \{\phi_i\}$ est incohérent

Pour calculer le MCS nous utilisons l'algorithme de [13] que nous avons implémenté avec le SMT-solver z3 [5]. Nous notons $\mathfrak{M}\big(\Phi, \mathit{shielded}\big)$ la sortie de cet algorithme. Φ est l'ensemble qui doit être corrigé, et $\mathit{shielded} \subset \Phi$ est un ensemble de propositions et règles qui ne peuvent être retirées du système par l'algorithme de MCS (c.-à-d. $\mathfrak{M}\big(\Phi, \mathit{shielded}\big) \cap \mathit{shielded} = \emptyset$). La prochaine section montre comment nous utilisons $\mathfrak{M}$ pour l'analyse des erreurs humaines dans notre algorithme.

Il faut souligner que nous n'obtenons pas nécessairement un MCS unique pour un Φ donné. En d'autres termes, il existe de multiples solutions pour retrouver la cohérence dans l'état mental B_t :

$$B_t = (B_{t-1} \cup Obs_t \cup \{a_t\}) \setminus M$$

où $M \in \mathfrak{M}\big(\Phi, \mathit{shielded}\big)$. Par conséquent, à partir d'un état mental B_{t-1}, nous obtenons un arbre d'états où chaque branche correspond à un « choix de révision possible » et donc un état mental possible. Chaque chemin dans l'arbre est alors un *scénario*, c'est à dire, une suite d'état mentaux qui est cohérent avec les actions constatées de l'agent.

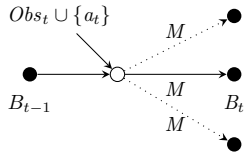


FIGURE 1 – Calcul de B_t (un cercle noir représente un état cohérent, un blanc un état potentiellement incohérent)

Dans la prochaine section, nous nous appuyons sur ces scénarios et les MCS successifs pour diagnostiquer les erreurs humaines dans la situation d'accident que nous modélisons.

4 Analyse de l'erreur humaine

La difficulté de ce travail d'analyse de l'erreur humaine est de distinguer ce qui correspond à de la révision de croyance (cas 1 dans la section précédente) de ce qui relève d'une prise de décision erronée (cas 2) dans les séries des MCS d'un scénario.

4.1 Révision de croyance *vs* erreur humaine

Certains choix de révision dans un scénario correspondent en effet à une révision de croyance rationnelle dans le contexte de l'inertie du décor. Cela se produit dans deux cas :

(1) La base de croyance doit être révisée à cause des effets attendus d'une action (p. ex. si l'agent charge le pistolet, la valeur de loaded_t doit changer, ce qui est en contradiction avec $keep^{(v)}_{\mathrm{loaded}_t}$).

(2) La base de croyance doit être révisée à cause d'une nouvelle information (p. ex. si l'agent croit initia-

©AFIA2022

lement que le pistolet est chargé et observe ensuite qu'il ne l'est plus).

Toutes les autres incohérences qui apparaissent dans les états mentaux correspondent à des erreurs dans le raisonnement de l'agent. Toutefois, nous pouvons à nouveau distinguer deux types d'incohérences. Le premier type vient directement du scénario (p. ex. les actions qui n'auraient pas dû être effectuées connaissant les observations). Nous parlons alors d'*incohérences locales*. Le deuxième type correspond au problème de la distorsion du décor. Dans ce qui suit, nous présentons notre algorithme pour séparer les trois types d'incohérences : les incohérences locales, les distorsions du décor, et les révisions de croyance « normales » qu'il faut accepter comme ne relevant pas de l'erreur humaine.

4.2 Un algorithme pour l'analyse de l'erreur humaine

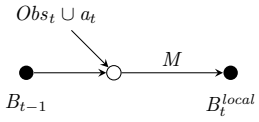
Notre algorithme fonctionne en trois phases. Nous commençons par détecter les MCS qui correspondent à des incohérences locales. Nous détectons ensuite les changements dans la base de croyances liés à l'inertie du décor (qui peuvent créer des incohérences et des MCS, mais qui ne sont pas des erreurs). Enfin nous détectons les MCS qui correspondent à des distorsions du décor.

4.2.1 Incohérence locale

En commençant par B_{t-1}, avant d'ajouter $\mathfrak{K}_t^{(v)}$ et $\mathfrak{K}_t^{(k)}$ dans la base de croyance, nous vérifions les incohérences locales en calculant :

$$\begin{aligned} &B_t^{local} = (B_{t-1} \cup Obs_t \cup \{a_t\}) \setminus M \\ &\text{avec } M \in \mathfrak{M}\big(B_{t-1} \cup Obs_t, \{a_t\}\big) \end{aligned} \tag{1}$$

Ceci nous permet de capturer les situations où un agent effectue des actions qui ne sont pas cohérentes avec l'état courant des observations et des croyances. L'état B_t^{local} qui en résulte est cohérent avec l'action mais peut contenir des corrections de la base de croyance qui correspondent à une prise de décision erronée.



Un exemple classique d'une telle situation est le crash du vol Rio-Paris en 2009 [4]. Les pilotes recevaient des informations contradictoires et prirent la mauvaise décision (l'avion était en décrochage et ils ont tiré le manche, ce qui a maintenu l'appareil en décrochage). Voici une représentation simplifiée de cette situation dans notre modèle :

$$\begin{array}{lcl} \mathcal{I}nit & = & \emptyset \\ Obs_1 & = & \{\mathrm{alarm}_1, \mathrm{acceleration}_1\} \\ \mathcal{R} & = & \left\{ \begin{array}{lcl} R_1 & \equiv & \mathrm{alarm}_t \rightarrow \mathrm{stall}_t \\ R_2 & \equiv & \mathrm{acceleration}_t \rightarrow \mathrm{overspeed}_t \\ R_3 & \equiv & \mathrm{overspeed}_t \rightarrow \mathrm{Pull}_t \\ R_4 & \equiv & \mathrm{stall}_t \rightarrow \mathrm{Push}_t \\ R_5 & \equiv & \mathrm{Pull}_t \wedge \mathrm{Push}_t \rightarrow \bot \end{array} \right\} \\ \mathcal{T} & = & \{\mathrm{Pull}_1\} \end{array}$$

Dans cet exemple, les observations de l'alarme et de l'accélération sont incohérentes entre elles (elles mènent à violer R_5 si on suit $R_{1\ldots4}$). Le MCS qui est cohérent avec l'action Pull_1 consiste à garder les observations et règles liées à la survitesse au lieu du décrochage. Cela correspond à ce qui s'est vraiment passé : les enregistreurs du cockpit montrent que les pilotes croyaient qu'ils étaient en survitesse et essayaient d'en sortir en tirant le manche.

4.2.2 Incohérence du décor

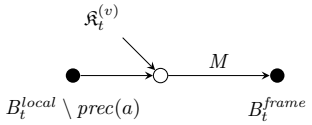
Pour chaque B_t^{local} possible, nous introduisons les propositions $keep^{(v)}$ qui sont responsables de l'inertie des croyances. Nous calculons ensuite :

$$\begin{aligned} &B_t^{frame} = ((B_t^{local} \setminus prec(a)) \cup \mathfrak{K}_t^{(v)}) \setminus M \\ &\text{avec } M \in \mathfrak{M}\big((B_t^{local} \setminus prec(a)) \cup \mathfrak{K}_t^{(v)}, \\ &\qquad\qquad B_t^{local} \setminus prec(a)\big) \end{aligned} \tag{2}$$

Cela nous permet de capturer les corrections dans la base de croyance qui sont liées au problème du décor. En effet, en calculant les MCS seulement sur les propositions *keep* en protégeant tout ce qui est dans B_t^{local}, nous détectons les incohérences entre les *keep* et les croyances dérivées des observations et des effets d'action. Plus précisément, l'ajout de $\mathfrak{K}_t^{(v)}$ maintient la valeur de vérité des croyances précédentes, mais laisse leur état de connaissance (les prédicats *known*) libre. Si une incohérence est détectée, nous savons qu'elle vient de ces croyances dérivées.

Toutefois, comme nous considérons que l'action a est faite à l'instant t, ses pré-conditions et les *known* associés doivent être vrais, ce qui au final force à vrai toutes les propositions qui peuvent être inférées par ces pré-conditions, ce que nous ne voulons pas. En effet, de telles propositions peuvent être incohérentes avec les déductions des règles *keep* que nous voulons appliquer à ce stade pour traiter seulement le problème du décor. C'est pourquoi nous retirons temporairement $prec(a)$, l'ensemble des règles de précondition de l'action a, du calcul de l'état mental (il sera réintroduit dans la phase suivante).

Toutes les incohérences capturées à ce stade correspondent à des révisions de croyances rationnelles dans le contexte de l'inertie du décor. Ce ne sont pas des erreurs humaines. Les états B_t^{frame} qui en résultent sont tous des états mentaux cohérents où les incohérences locales et les révisions de croyances « normales » ont été résolues.



La situation suivante illustre cette phase :

$$\begin{array}{lcl} \mathcal{I}nit & = & \{\mathrm{cloud}_0, \mathrm{sun}_0\} \\ Obs_1 & = & \{\neg\,\mathrm{cloud}_1\} \\ \mathcal{R} & = & \{\ R_1 \equiv [\neg\,\mathrm{cloud}_t \wedge \mathrm{sun}_t]\,\mathrm{GoOut}_t\ \} \\ \mathcal{T} & = & \{\mathrm{GoOut}_1\} \end{array}$$

Sortir (action GoOut_1) est un comportement rationnel dans cette situation, bien que cela crée une incohérence avec les

prédicats *known* et les propositions *keep* que nous avons introduites pour le Problème du Décor.
En effet, les pré-conditions de GoOut sont $\neg\,\mathrm{cloud}_1$ et sun_1 qui ne sont pas en contradiction avec les croyances et les observations, le MCS est donc vide pour l'incohérence locale et nous avons :

$$B_1^{local} = \{\mathrm{cloud}_0, \mathrm{sun}_0, R_1, \neg\,\mathrm{cloud}_1, \mathrm{GoOut}_1\}$$

Pour calculer B_1^{frame}, nous retirons la règle de précondition R_1 et ajoutons les $keep^{(v)}$:

$$\{\mathrm{cloud}_0, \mathrm{sun}_0, \neg\,\mathrm{cloud}_1, \mathrm{GoOut}_1, keep_{sun}^{(v)}, keep_{cloud}^{(v)}\}$$

Le MCS sur les *keep* contient $keep_{cloud}^{(v)}$ afin de rendre $\neg\,\mathrm{cloud}_1$ possible, et nous avons finalement :

$$B_1^{local} = \{\mathrm{cloud}_0, \mathrm{sun}_0, \neg\,\mathrm{cloud}_1, \mathrm{GoOut}_1, keep_{sun}^{(v)}\}$$

On a bien traité ici uniquement le problème du décor, en supprimant la règle d'inertie de la proposition cloud afin de lui permettre de changer conformément aux observations.

4.2.3 Incohérence de la distorsion du décor

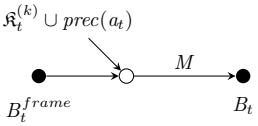
Pour chacun des états mentaux B_t^{frame} possibles, nous introduisons maintenant les $keep^{(k)}$, qui maintiennent l'état de connaissance des croyances (cela ne s'applique qu'aux croyances, pas aux propositions que l'on peut en dériver). L'analyse de cet ensemble de propositions nous permet de détecter les incohérences suivantes :

- — Un changement de croyance inattendu, que le problème du décor aurait dû éviter.
- — Un changement de croyance imposé par les préconditions de l'action effectuée ou par des désirs de l'agent.

Concrètement, nous calculons :

$$\begin{aligned} &B_t = (B_t^{frame} \cup prec(a) \cup \mathfrak{K}_t^{(k)}) \setminus M \\ &\text{avec } M \in \mathfrak{M}\big(B_t^{frame} \cup \mathfrak{K}_t^{(k)} \cup prec(a), \{a_t\}\big) \end{aligned} \tag{3}$$

Les états B_t résultants sont des états de croyances cohérents qui reflètent les éventuelles erreurs de décision capturées par les MCS.



L'exemple type est le crash du Mont-Saint-Odile présenté en Section 2.3. Les pilotes peuvent régler la vitesse verticale soit en pieds par minute (Vertical Speed) ou en degré d'angle de descente (Flight Path Angle). Quand l'indicateur est en FPA, un affichage de 33 veut dire que l'avion descend avec un angle de 3.3 degrés, ce qui correspond à environ 800 pieds par minute en termes de vitesse verticale. Quand l'indicateur est en VS, le même affichage veut dire que l'avion descend à la vitesse de 3300 pieds par minute (soit quatre fois plus vite) !

En voici une représentation simplifiée dans notre modèle :

$$\begin{aligned} \mathcal{I}nit &= \{\mathrm{onVS}_0, \neg\,\mathrm{onFPA}_0\} \\ Obs_1 &= \emptyset \\ \mathcal{R} &= \left\{ \begin{array}{ll} R_1 = & \mathrm{display}(33)_t \wedge \mathrm{onVS}_t \rightarrow \neg\,\mathrm{goodAngle}_t \\ R_2 = & \mathrm{display}(33)_t \wedge \mathrm{onFPA}_t \rightarrow \mathrm{goodAngle}_t \\ R_3 = & \mathrm{SetValue}(x)_t :: \mathrm{display}(x)_t \\ R_4 = & \mathrm{onVS}_t \leftrightarrow \neg\,\mathrm{onFPA}_t \end{array} \right\} \\ \mathcal{D} &= \{\mathrm{goodAngle}_t\} \\ \mathcal{T} &= \{\mathrm{SetValue}(33)_1\} \end{aligned}$$

L'enquête a montré que les pilotes savent initialement que l'indicateur est en VS (Vertical Speed) mais « oublient » cette information et règlent la valeur sur 33, ce qui aurait été la bonne valeur s'ils avaient été sur le mode FPA (Flight Path Angle). En appliquant notre algorithme sur ce modèle, nous avons un MCS vide pour l'incohérence locale car l'agent ne peut pas déduire $\neg\,\mathrm{goodAngle}_1$ vu qu'il n'observe pas onVS_1 au temps 1. Nous avons alors :

$$B_1^{local} = \left\{ \begin{array}{l} \mathrm{onVS}_0, \neg\,\mathrm{onFPA}_0, \mathrm{goodAngle}_0, \\ \mathrm{goodAngle}_1, \mathrm{SetValue}(33)_1, \\ R_1, R_2, R_3, R_4 \end{array} \right\}$$

Pour calculer B_1^{frame} nous ajoutons les $keep^{(v)}$, c'est-à-dire les clauses qui gardent la valeur de vérité des propositions entre deux pas de temps. Aucune incohérence n'est détectée du fait que $known_{onVS_1}$ est libre et peut être donc faux pour que le système soit toujours cohérent. Nous avons alors :

$$B_1^{frame} = \left\{ \begin{array}{l} \mathrm{onVS}_0, \neg\,\mathrm{onFPA}_0, \mathrm{goodAngle}_0, \\ \mathrm{goodAngle}_1, \mathrm{SetValue}(33)_1, \\ R_1, R_2, R_3, R_4, \\ keep_{\mathrm{onVS}_1}^{(v)}, keep_{\mathrm{onFPA}_1}^{(v)} \end{array} \right\}$$

Pour calculer B_1 en prenant en compte la distorsion du décor, nous ajoutons les $keep^{(k)}$, c'est-à-dire les clauses qui gardent la valeur de connaissance (*known*) entre deux pas de temps : $\{keep_{\mathrm{onVS}_1}^{(k)}, keep_{\mathrm{onFPA}_1}^{(k)}\}$ Nous avons alors une incohérence avec la proposition $\mathrm{goodAngle}_1$ car $\neg\,\mathrm{goodAngle}_1$ peut être maintenant déduite par R_1. Un MCS possible est alors de retirer $\{keep_{\mathrm{onVS}_1}^{(k)}, keep_{\mathrm{onFPA}_1}^{(v)}\}$ et ainsi avoir :

$$B_1 = \left\{ \begin{array}{l} \mathrm{onVS}_0, \neg\,\mathrm{onFPA}_0, \mathrm{goodAngle}_0, \\ \mathrm{goodAngle}_1, \mathrm{SetValue}(33)_1, \\ R_1, R_2, R_3, R_4, \\ keep_{\mathrm{onVS}_1}^{(v)}, keep_{\mathrm{onFPA}_1}^{(k)} \end{array} \right\}$$

Nous avons par cette dernière étape traité le problème de la distorsion du décor : l'inertie du décor n'est pas respectée par l'agent afin d'être cohérent avec son désir d'avoir un bon angle d'approche, en oubliant notamment qu'il était en mode Vertical Speed.

Dans cette section, nous avons illustré notre algorithme avec 3 exemples distincts mais sur une seule étape temporelle. Dans le cas général, les différents MCS obtenus à chacun des pas de temps créent des branches, ce qui produit pour des cas d'études réels des arbres d'états mentaux de grande taille, qui décrivent de nombreux scénarios possibles. Nous discutons de ce point dans les perspectives.

©AFIA2022

5 Travaux connexes

Le diagnostic en Intelligence Artificielle, c'est-à-dire la recherche d'explications à une situation en utilisant la modélisation logique, est étudié depuis les années 80 [19]. Toutefois à notre connaissance aucun des modèles proposés jusqu'ici n'est appliqué dans le contexte de l'analyse d'erreurs de prise de décision humaine. Bien que plusieurs travaux proposent des solutions pour diagnostiquer des systèmes dynamiques (*i.e* en prenant en compte des actions et des changements) [16, 24] tous supposent que les solutions doivent respecter l'inertie du décor. Le problème de la distorsion du décor qui apparaît lors de l'analyse des erreurs humaines n'est pas pris en compte. L'objectif de notre modèle est de dépasser cette limitation.

Pourtant, depuis quelques années, la recherche en IA s'est intéressée à la modélisation des erreurs de raisonnement humain ou, plus généralement, à ses limites, à des fins de prédiction en simulation. Par exemple, [26] utilise un automate fini pour simuler la dynamique d'opinion sur la vaccination. Il permet d'expliquer une décision de non-vaccination alors que l'ensemble des informations rationnelles à la disposition de l'agent devrait l'amener à prendre la décision d'accepter la vaccination. Dans un contexte différent, [12] propose les *Synthetic Cognitive Models* pour simuler la prise de décision dans un contexte militaire en prenant en compte la rationalité limitée de l'humain. Enfin, les auteurs de [2] utilisent le paradigme BDI pour implémenter des fonctions probabilistes qui mènent à des croyances erronées dans une situation de feux de forêt. Tous ces modèles proposent une solution viable pour simuler des erreurs de prise de décision par des humains mais ils ne peuvent pas être utilisés dans un objectif de diagnostic dans un cas général.

Une autre approche pour capturer les croyances et les raisonnements erronés consiste à s'affranchir de l'hypothèse d'*omniscience logique* telle que définie dans [9], c'est-à-dire la capacité à inférer toutes les conséquences d'une croyance φ. Par exemple, dans [23], les auteurs proposent un modèle basé sur les *mondes impossibles* (*i.e* les mondes qui ne sont pas fermés sous conséquences logiques) pour simuler des erreurs de raisonnement. Pour cela ils associent à chaque règle de raisonnement une *consommation de ressources*, ce qui limite l'application de longs raisonnements. Toutefois, le calcul de tous les *mondes impossibles* pour sélectionner le plus plausible nécessite une puissance de calcul exponentielle. De plus leur modèle ne considère pas les actions et les changements.

Toutes ces approches donnent des solutions intéressantes bien que partielles à notre problème : elles ne prennent pas en compte le problème de la distorsion du décor et ne sont pas adaptées pour un objectif de diagnostic. Notre modèle reprend les idées proposées par ces différents auteurs pour modéliser des erreurs de prise de décision et calculer des diagnostics qui prennent en compte les erreurs humaines. De plus, l'utilisation d'un solveur SMT nous permet de traiter à la fois des variables continues et des variables discrètes, et d'augmenter ainsi l'expressivité du modèle, comme l'a montré [7].

6 Conclusion et perspectives

Notre modèle utilise un diagnostic basé sur la révision de croyance pour calculer les suites d'états mentaux possibles qui peuvent expliquer des erreurs de prise de décision humaine. Ces état mentaux sont cohérents avec les observations et les actions effectuées par l'agent et prennent en compte le *problème de la distorsion du décor*, à savoir le fait que les croyances humaines peuvent être modifiées sans cause externe. Alors que le problème du décor stipule que les propositions doivent être maintenues quand elles ne sont pas modifiées par une action, l'analyse des erreurs humaines doit prendre en compte des changements spontanés dans le décor tout en maintenant un comportement rationnel de la part de l'agent.

Nous avons implémenté ce modèle à l'aide d'un solveur SMT. Notre algorithme construit un arbre où chaque chemin correspond à un scénario possible pour les actions observées.

Pour le moment, notre modèle calcule l'ensemble des scénarios possibles mais n'identifie pas le plus plausible. Par exemple, dans le modèle complet du crash Rio-Paris, nous trouvons plus de 6000 scénarios, ce qui est beaucoup pour une analyse par un expert humain. Pour pallier cette limitation, nous envisageons d'étendre notre algorithme de manière à filtrer l'ensemble des scénarios et extraire les erreurs humaines « classiques », identifiées dans la littérature en sciences humaines sous le terme de « biais cognitifs » [25]. Une première proposition a été faite dans [6] pour définir des motifs logiques permettant d'identifier quelques biais cognitifs dans les accidents. Notre proposition à terme est d'inclure ces motifs dans notre modèle et de les étendre pour capturer d'autres biais afin de donner un ordre de priorité aux scénarios présentés aux experts.

À plus long terme, notre objectif est de fournir des outils pour aider les experts à comprendre et anticiper les situations d'accident. Nous pensons qu'en utilisant la modélisation logique, nous pouvons générer des scénarios non anticipés par les experts humains. Nous voulons aussi que notre modèle permette de faire la distinction entre une conception ergonomique médiocre et susceptible de conduire à des erreurs (comme l'accident du Mont-Saint-Odile) et les erreurs humaines qui peuvent être identifiées et évitées par la formation. Ces erreurs peuvent provenir de la charge cognitive et peuvent être modélisées par la rationalité limitée. Nous avons l'intention d'étendre notre cadre logique pour capturer ce phénomène cognitif majeur.

Références

https://wdi.centralesupelec.fr/boulanger/downloads/Main/Refs_CNIA_2022.pdf

Un protocole de concessions monotones pour la formation distribuée de coalitions

J. Guéneron, G. Bonnet

Normandie Univ, UNICAEN, ENSICAEN, CNRS, GREYC, France

{prénom.nom}@unicaen.fr

Résumé

Nous étudions une adaptation au cadre de la formation de coalitions d'un protocole de négociation multilatérale initialement proposé par Ulle Endriss. Ce protocole utilise un mécanisme de concession monotone et nous proposons de nouvelles stratégies de concession prenant en compte la notion de coalition. Nous étudions par la suite comment différents critères influencent les performances du protocole, y compris en termes de types de concession décrivant les concessions acceptables pour les autres agents. Nous montrons expérimentalement que deux de nos stratégies sont efficaces lorsqu'elles sont associées à trois des sept types de concession.

Mots-clés

Formation distribuée de coalitions, Théorie des jeux, Négociation

Abstract

We study an adaptation, in the context of coalition formation, of a multilateral negotiation protocol originally proposed by Ulle Endriss. This protocol uses a monotonic concession mechanism and we propose new concession strategies that take into account the notion of coalition. We then study how different criteria influence the performance of the protocol (e.g. the concession types which describe the acceptable concessions for the other agents). We show experimentally that two of our strategies are efficient when they are associated with three of the seven types of concession.

Keywords

Distributed Coalition Formation, Game Theory, Negotiation

1 Introduction

Dans un système multi-agent (SMA), les agents individuels ne sont pas toujours capables de réaliser certaines tâches seuls. Lorsque le système est composé d'agents égoïstes et rationnels, une des réponses à ce problème est la formation de coalitions. Ici, les agents forment des groupes, appelés coalitions, afin de réaliser conjointement les tâches qui ne peuvent pas être traitées individuellement. La formation de coalitions est un processus en trois étapes : la recherche d'une structure de coalitions – c'est-à-dire d'un ensemble de coalitions acceptables (stable) pour tous les agents –, la formation de ces coalitions, et la répartition des gains entre les agents [9]. Toutefois, résoudre un problème de formation de coalitions de manière centralisé n'est pas viable pour certaines applications, telles que les chaînes logistiques ou les réseaux électriques intelligents. En effet, rechercher une structure de coalitions optimale, c'est-à-dire qui maximise le bien-être social et qui est stable, dans un cadre centralisé implique d'explorer le treillis des structures, dont la taille croît exponentiellement. Former des coalitions de manière distribuée, voire décentralisée, devient alors intéressant, même si cela implique des redondances ou des coûts de communication et de coordination. Dans la littérature, les travaux sur la formation distribuée de coalitions sont souvent spécifiques au contexte [15], ou comprennent des contraintes fortes [3]. Par exemple, certains travaux fixent une taille de coalition maximale [13], ou proposent des algorithmes pour des jeux spécifiques (par exemple ayant des propriétés particulières pour leur fonction caractéristique) [6]. D'autres travaux encore proposent des algorithmes distribués mais dont certaines parties sont toujours centralisées en raison de la présence d'un commisseur-priseur [14]. Une question qui se pose alors naturellement est celle de la formation distribuée de coalitions, sans contexte spécifique ni contraintes sur le modèle.

Nous proposons un protocole distribué fondé sur des concessions monotones. Il s'agit d'une adaptation pour la formation de coalitions d'un protocole de concessions monotones d'Ulle Endriss [5] pour la négociation multilatérale. Dans ce protocole, les agents font des propositions et ensuite, selon une stratégie de concession qui caractérise quel agent doit concéder, les agents peuvent concéder et faire une autre proposition. Cette dernière suit également une autre stratégie qui caractérise quelles propositions seront acceptables pour les autres agents. Le point clé de notre contribution réside dans le fait que le protocole originel ne considère des négociations qu'entre les agents individuels, alors que nous devons prendre en compte des groupes d'agents, c'est-à-dire les coalitions. Nous adaptons les stratégies de concession en fonction non seulement des gains individuels mais aussi du gain des coalitions. Nous analysons ensuite empiriquement notre protocole, en termes de partitions explorées, prix de la stabilité et optimalité.

©AFIA2022

Cet article est structuré comme suit. Dans la section 2, nous présentons les jeux de coalitions et les travaux relatifs à la formation distribuée de coalitions. Dans la section 3, nous faisons le lien entre négociation et formation de coalitions, puis nous décrivons notre protocole. Enfin, la section 4 est consacrée aux résultats expérimentaux.

2 Formation de coalitions

2.1 Approche classique

Quand les agents coopèrent, ils forment une *coalition*. Celle-ci produit un certain montant d'*utilité*. Une partition des agents en coalitions est une *structure de coalitions*.

Definition 1 (Jeu de coalitions) *Un* jeu de coalitions *est un tuple $\mathcal{G} = \langle N, v \rangle$ où $N = \{a_1, \ldots, a_n\}$ est un ensemble d'agents, et $v : 2^N \rightarrow \mathbb{R}$ est la fonction caractéristique qui indique l'utilité $v(C)$ de chaque coalition $C \subseteq N$.*

Une *solution* à un jeu de coalitions est définie comme suit.

Definition 2 (Solution) *Une* solution *à un jeu de coalitions $\mathcal{G}$ est un tuple $S_\mathcal{G} = \langle \mathcal{CS}, \vec{x} \rangle$ où $\mathcal{CS}$ est une structure de coalitions de N, $\vec{x} = \{x_1, \ldots, x_n\}$ est un vecteur de gains pour les agents où $x_i \geq 0$ est le gain de l'agent a_i.*

Les agents étant supposés égoïstes, quand une solution est proposée, tous les agents doivent l'accepter, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas vouloir former ou rejoindre une autre coalition où ils gagneraient plus. Une solution acceptable par tous les agents est dite *stable*. Différents critères de stabilité existent et l'ensemble des solutions à un jeu respectant un de ces critères est appelé un *concept de solution*.
Intéressons-nous au concept du *cœur* et sa généralisation, l'*ϵ-cœur* [7, 12]. Le cœur est l'ensemble des solutions $\langle \mathcal{CS}, \vec{x} \rangle$ pour lesquels il n'existe aucune autre coalition qui pourrait être formée et qui produirait une utilité supérieure à la somme des gains de ses agents dans $\vec{x}$. Si le cœur peut être vide, il existe une variante non vide, appelée ϵ-cœur.

Definition 3 (ϵ-cœur) *Une solution $(\mathcal{CS}, \vec{x})$ appartient à l'ϵ-cœur si et seulement si :*

$$\forall C \subseteq N, x(C) \geq v(C) - \epsilon \text{ avec } x(C) = \sum_{i \in C} x_i$$

Cette variante permet aux agents de réduire leur gain de la valeur ϵ pour rendre une solution stable. Nous considérons ici uniquement l'ϵ-cœur, car toute solution à un jeu est comprise dans un ϵ-cœur dès lors que l'on a un ϵ suffisamment grand, étant donné que ϵ représente la pire perte en termes de gain parmi les agents afin d'assurer la stabilité. Plus précisément, nous considérons le *dernier cœur*, i.e. l'ϵ-cœur ayant le plus petit ϵ pour lequel une solution existe [4].
Trouver de manière exacte une solution qui appartient à un concept de solution est un problème d'optimisation complexe. Classiquement, une solution approchée est acceptable. Le calcul se fait en deux étapes : (1) trouver une structure de coalitions qui maximise le bien-être social et qui est dite *optimale* ; (2) partager les gains entre agents selon une règle de répartition qui fait sens. L'approche classique pour trouver la structure de coalitions optimale, par exemple l'algorithme de Rahwan et Jennings [8], consiste à débuter l'exploration par la *grande coalition* (qui contient tous les agents) puis évaluer si une décomposition est bénéfique pour le bien-être social. Si c'est le cas, le bien-être social est enregistré puis la décomposition continue. Si la décomposition n'était pas bénéfique, l'algorithme revient en arrière et essaye une autre décomposition. Toutefois, cette approche soulève deux problèmes : le premier est que cette façon de faire n'est pas adéquate pour beaucoup d'applications réelles, et la seconde est que dans le concept de cœur, la structure maximisant le bien-être social n'est pas nécessairement stable [4] (par exemple quand le cœur est vide).

2.2 Approche distribuée

Il existe beaucoup de travaux sur la formation distribuée de coalitions, mais ils sont souvent spécifiques au contexte ou imposent des contraintes fortes sur le jeu. Nous pouvons trouver des contraintes sur la fonction caractéristique, où la forme de celle-ci est connue [6, 14], ou des contraintes sur les solutions possibles, qui limitent par exemple arbitrairement la taille des coalitions [13] ou les restreignent au sein d'un graphe [3, 15]. Certains modèles incluent un commisseur-priseur qui orchestre le processus, ce qui est une forme de recentralisation [6, 13, 14]. Par exemple, Shehory et Kraus [13] forment des coalitions pour des problèmes d'affectation de tâches. Ici, les agents ne connaissent que leur propre utilité et communiquent avec les autres agents pour calculer une utilité espérée pour chaque coalition. Le processus est le suivant : les agents créent une liste restreinte de coalitions de taille maximale fixée qu'ils souhaitent former. Ils contactent les agents impliqués afin d'estimer leurs valeurs. Chaque agent calcule localement une valeur appelée *poids*, fondée sur l'utilité espérée, le coût de formation et la taille de chaque coalition. Ensuite, la coalition avec le poids le plus faible est formée. Le processus est répété jusqu'à ce que tous les agents rejoignent une coalition. Les solutions sont stables tant que les coalitions formées peuvent réaliser leurs tâches, même si ce ne sont pas des solutions optimales.

3 Un protocole distribué

C'est dans un cadre différent qu'un protocole intéressant a été proposé par Ulle Endriss [5]. Son intérêt réside dans le fait qu'il ne possède pas d'entité centrale, est distribué, et n'émet pas d'hypothèse sur la structure du système.

3.1 Protocole de négociation monotone

Nous fondons donc notre protocole sur celui de Ulle Endriss [5]. En effet, un parallèle peut être fait entre l'*accord* dans le protocole de négociation et la stabilité dans la formation de coalitions. Chacun de ces termes caractérise le moment où les agents sont tous d'accord. Ainsi, les concessions représentent des agents qui acceptent un gain plus faible afin d'atteindre la stabilité, comme le concept de l'ϵ-cœur qui autorise d'abandonner une part de gains pour

éviter les déviations. Dans ce travail, les agents doivent se mettre d'accord sur une proposition commune et négocient en suivant un protocole de concessions monotones. Au premier tour, chaque agent fait une proposition initiale, en proposant celle qui lui rapporte le gain le plus élevé. À chaque tour suivant, les agents font des propositions simultanées, ensuite les agents peuvent maintenir leur proposition ou concéder, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un accord commun ou un conflit (aucun agent ne peut concéder) émerge. Les propositions sont définies comme suit.

Definition 4 (Proposition) *Une* proposition $p_{a_i} = \{x_1, \ldots, x_n\}$ *de l'agent* a_i *est un vecteur de gain où* $x_{a_j}(p_{a_i}) \geq 0$ *est le gain de* a_j.

Ensuite, la deuxième étape implique deux concepts importants : la *stratégie de concession* et le *type de concession*. La première décrit comment les agents décident qui doit concéder, et la seconde décrit comment les concessions (i.e. les nouvelles propositions) doivent être faites. Une des stratégies est *Willingness to Risk Conflict* (WRC). Cette stratégie décrit comment un agent juge le risque s'il concède, comparé à ce que les autres agents lui offrent. Autrement dit, l'agent qui concède est celui qui perd le moins de gain entre sa propre proposition et celles des autres.

Definition 5 (Willingness to Risk Conflict) *L'agent qui concède est l'agent* a_i *pour qui la valeur* Z_{a_i} *est la plus petite, où :*

$$Z_{a_i} = \begin{cases} 1 \ \textit{si} \ x_{a_i}(p_{a_i}) = 0 \\ \dfrac{x_{a_i}(p_{a_i}) - \min\limits_{\forall j \in N} x_{a_i}(p_{a_j})}{x_{a_i}(p_{a_i})} \quad \textit{sinon} \end{cases}$$

Les types de concession décrivent les différentes façons que les agents ont de concéder afin que leur nouvelle proposition soit acceptable pour les autres agents. Ces types sont fondés sur la différence entre le vecteur de gain de l'ancienne et celui de la nouvelle proposition. Les différents types sont les suivants : **fort** si le gain de tous les autres agents croît, **faible** si le gain d'un autre agent croît, **Pareto** si le gain des agents reste au moins égal et croît pour au moins un, **égalitaire** si le gain minimal des autres croît, **utilitaire** si la somme des gains des autres croît, **Nash** si le produit des gains des autres croît, et **égocentrique** si le gain du concédant décroît.

3.2 Propositions et gains

Désormais, une proposition est une solution : une structure de coalitions et un vecteur de gain.

Definition 6 (Proposition) *Étant donné un jeu* $\mathcal{G}$*, une* proposition *de l'agent* a_i*, notée* p_i*, est une solution* $S_{\mathcal{G}} = \langle \mathcal{CS}, \vec{x} \rangle$ *où* $\vec{x}$ *est un vecteur de gains* $\langle x_{a_j}^{C_j^i} \rangle$ *où* C_j^i *est la coalition de l'agent* a_j *dans la proposition* p_i.

Pour évaluer une proposition, nous devons définir comment les agents distribuent l'utilité produite par les coalitions. Nous supposons que les agents souhaitent négocier sur le gain qu'ils recoivent à la formation des coalitions. Notons que cet article s'intéresse au protocole distribué et non à la recherche de la meilleure distribution possible. Ainsi, nous considérons une règle de distribution des gains rationnelle et égalitariste. Cette règle est rationnelle car les coalitions proposées génèrent assez d'utilité pour payer à chaque agent l'utilité produite par sa coalition singleton. Le reste est appelé le *surplus*.

Definition 7 (Surplus) *Le* surplus S_C *d'une coalition* C *est :*

$$S_C = v(C) - \sum_{a \in C} v(a)$$

Par définition, les coalitions singleton ont un surplus de 0. La règle est égalitaire car le surplus est distribué également entre les agents.

Definition 8 (Part de surplus) *La* part de surplus $S_C^{a_i}$ *d'un agent* a_i *dans sa coalition* C*, est le surplus de* C *divisé par son nombre d'agents :*

$$S_C^{a_i} = \frac{S_C}{|C|}$$

Definition 9 (Règle de distribution) *Le gain de l'agent* a_i *appartenant à la coalition* C *avec un surplus* $S_C > 0$ *est défini comme :*

$$x_{a_i}^C = v(\{a_i\}) + S_C^{a_i}$$

3.3 Stratégies et types de concession

À chaque pas de temps, les agents font des propositions, et suivant une stratégie de concession, un ou plusieurs agents doivent abandonner leurs propositions et en faire de nouvelles. Pour ceci, nous utilisons et adaptons la stratégie WRC présente dans les travaux d'Endriss. Nous proposons trois adaptations que nous présentons ci-après : une stratégie est fondée sur les gains individuels des agents, une sur l'utilité des coalitions, et une dernière basée sur le surplus des coalitions. Nous les appelons respectivement *WRC-classic*, *WRC-coalitions* et *WRC-surplus*.

Definition 10 (WRC-Classic) *L'agent qui concède est l'agent* a_i *pour qui la valeur* Z_{a_i} *est la plus petite, où :*

$$Z_{a_i} = \frac{x_i(p_i) - \min\limits_{\forall j \in N} x_i(p_j)}{x_i(p_i)}$$

où $x_i(p_j)$ *est le gain de l'agent* a_i *dans la proposition* p_j.

Definition 11 (WRC-Coalitions) *L'agent qui concède est l'agent* a_i *pour qui la valeur* Z_{a_i} *est la plus petite, où :*

$$Z_{a_i} = \frac{x_{C_i}(p_i) - \min\limits_{\forall j \in N} x_{C_i}(p_j)}{x_{C_i}(p_i)}$$

où $x_{C_i}(p_j)$ *est la somme des gains de tous les agents dans la coalition* C_i *dans la proposition* p_j*, où* C_i *est la coalition dans laquelle l'agent* a_i *est dans sa propre proposition :*

$$x_{C_i}(p_j) = \sum_{k \in C_i} x_k(p_j)$$

©AFIA2022

Definition 12 (WRC-Surplus) *L'agent qui concède est l'agent a_i pour qui la valeur Z_{a_i} est la plus petite, où :*

$$Z_{a_i} = \frac{S_{C_i}(p_i) - \min_{\forall j \in N} S_{C_i}(p_j)}{S_{C_i}(p_i)}$$

où $S_{C_i}(p_j)$ est la somme des parts de surplus de tous les agents dans la coalition C_i dans la proposition p_j, où C_i est la coalition dans laquelle l'agent a_i est dans sa propre proposition :

$$S_{C_i}(p_j) = \sum_{k \in C_i} S^k_{C^j_k}$$

où C^j_k est la coalition de l'agent a_k dans la proposition p_j.

Dans toutes ces stratégies, la condition où $Z_{a_i} = 1$ (l'agent ne peut plus concéder) si l'agent a_i ne gagne rien dans sa propre proposition est modifiée pour que $Z_{a_i} = 1$ si l'agent a_i se propose lui-même dans sa coalition singleton ou dans toute coalition dont le surplus est nul. Cette règle représente l'absence de coopération car aucun agent n'acceptera d'être irrationnel. Enfin, quand un agent concède, il doit faire une nouvelle proposition selon un certain type. Nous n'avons pas besoin d'adapter ces types à la formation car ils s'appliquent très bien aux vecteurs de gains.

3.4 Étapes du protocole

Maintenant que les éléments du protocole sont définis et adaptés, nous pouvons détailler les étapes du protocole.

1. Chaque agent calcule le surplus des coalitions dont il peut faire partie,
2. Chaque agent crée une liste noire privée de coalitions et structures de coalitions,
3. Au premier tour, chaque agent fait une proposition initiale en choisissant sa coalition, notée C^*, parmi celles qui maximisent sa part de surplus, puis en choisissant la structure de coalitions qui maximise le bien-être social, notée $\mathcal{CS}^*$, et qui inclut la coalition choisie C^*,
4. À chaque tour suivant, chaque agent garde sa proposition ou concède, selon sa stratégie de concession,
5. Si un agent concède, la structure de coalitions précédente $\mathcal{CS}^*$ est ajoutée à la liste noire, et l'agent essaye de construire une nouvelle proposition satisfaisant son type de concession avec une autre structure de coalitions $\mathcal{CS}^{*'}$ qui inclut également sa coalition choisie C^*. Si une structure $\mathcal{CS}^{*'}$ ne satisfait pas un type de concession, elle est ajoutée à la liste noire. S'il n'y a plus de structure de coalitions possible avec la coalition C^*, cette dernière est ajoutée à la liste noire, et l'agent choisit une autre coalition, $C^{*'}$, qui maximise sa part de surplus. Un agent qui propose une coalition $C^{*'}$ dont le surplus est égal à 0 se retire du processus car il ne pourra pas gagner quoique ce soit.
6. Répéter à partir de l'étape (4) jusqu'à ce qu'un accord soit atteint ou qu'aucun agent ne reste dans le processus, c'est-à-dire qu'aucun agent ne puisse faire une proposition où il gagnerait quelque chose (nous appelerons ce cas un *conflit*).

Si aucun agent ne peut faire une nouvelle proposition, le processus s'arrête et le protocole retourne la structure de coalitions singleton. Le protocole est distribué au sens où les agents exécutent certaines étapes localement (construction des propositions, gestion des listes noires privées, calcul des concédants) tout en ayant une connaissance globale des propositions faites et donc de celles qu'il reste à faire.

3.5 Propriétés

Le protocole originel se positionne au regard de propriétés qui sont la **terminaison** si le protocole de négociation termine toujours, l'**absence de blocage** si aucun agent ne peut effectuer une action, alors le protocole est dans un état terminal, la **vérifiabilité** s'il est possible de vérifier que tous les agents respectent les règles du protocole, la **confidentialité** si les agents peuvent garder des informations privées, et la **compositionnalité** si la composition de deux propositions consécutives suivant le même type de concession est également une proposition simple du même type.

Notre protocole respecte les trois premières propriétés. Étant donné que le nombre de structures de coalitions et le nombre d'agents sont finis, et que les agents ne peuvent pas faire deux fois la même proposition grâce à la liste noire, la propriété de *terminaison* est respectée pour tout type de concession. Et ce même pour les concessions *faibles*, qui ne respectent pas la propriété dans le protocole originel en raison de boucles possibles sur les mêmes propositions.

La propriété d'*absence de blocage* est respectée car, à chaque pas de temps, au moins un agent doit concéder et, si un agent ne peut plus faire de proposition, celui-ci quitte le jeu. Si aucun agent ne reste dans le jeu, nous nous retrouvons dans l'état terminal de conflit, c'est-à-dire la formation de la structure de coalitions singleton.

La propriété de *vérifiabilité* est respectée car la fonction caractéristique et la règle de distribution sont connues, tout comme les types et stratégies de concession. Chaque agent peut donc vérifier les propositions des autres. Il peut aussi reconstituer leurs listes noires, ce qui a pour conséquence que la propriété de *confidentialité* n'est pas respectée.

Concernant la propriété de *compositionnalité*, celle-ci n'est pas respectée dans le cadre des concessions *faibles*. Prenons un exemple à trois agents a_1, a_2 et a_3. Supposons que a_1 fera deux concessions consécutives. Avant la première concession, a_2 est dans une coalition non-singleton. Lors de la première concession, a_2 est proposé dans sa coalition singleton (et donc baisse en gain) tandis que a_3 augmente en gain. Lors de la concession suivante, a_3 baisse en gain tandis que a_2 revient dans une autre coalition non-singleton (et donc récupère du gain). Cependant, rien n'empêche a_2 et a_3 d'avoir moins de gain dans la dernière proposition qu'avant les concessions, et donc que la *compositionnalité* n'est pas nécessairement respectée.

4 Expérimentations

Afin d'évaluer si notre protocole est efficace, et surtout pour comparer les différents types et stratégies de concession, nous procédons empiriquement. Nous générons des jeux aléatoires avec différentes fonctions caractéristiques et appliquons le protocole plusieurs fois sur chaque jeu, avec différents paramètres pour les agents. Ces paramètres sont le type et la stratégie de concession utilisés.

4.1 Protocole expérimental

Nous construisons 100 jeux différents avec des fonctions caractéristiques uniques, pour 8 agents [1]. Il est fait l'hypothèse que les agents sont homogènes [2], c'est-à-dire qu'ils utilisent tous les mêmes stratégies et types de concession qui paramètrent le protocole. Le protocole sera exécuté sur chacun des jeux avec chaque couple de stratégie et type de concession possible.

Les fonctions caractéristiques sont tirées selon le modèle NDCS (*Normally Distributed Coalition Structures)* [10]. Ce modèle permet d'avoir des fonctions caractéristiques structurées, mais sans contraindre fortement le modèle comme avec des structures monotones ou superadditives [4]. Ainsi, l'utilité $v(C)$ de chaque coalition $C \subseteq N$ est tirée selon une loi normale $\mathcal{N}(|C|, \sqrt{|C|})$. La fonction caractéristique est ensuite normalisée sur l'invervalle $[0, 1]$.

4.2 Mesures de performance

Afin d'évaluer notre modèle, nous définissons quatre mesures empiriques, respectivement fondées sur le dernier cœur, sur le meilleur ϵ-cœur atteignable par notre protocole, le bien-être social, et le nombre de Bell, c'est-à-dire le nombre de partitions possibles pour un nombre d'agents donné [2, 11]. Les deux premières mesurent la distance entre les solutions trouvées par le protocole par rapport au dernier cœur, ce dernier comprenant les meilleures solutions stables que l'on puisse trouver. Ces mesures nous permettent d'évaluer la perte de stabilité due à la négociation et à notre règle de distribution spécifique du surplus. La troisième est le *prix de la stabilité* [1, 9], qui mesure le gain que les agents doivent abandonner, par rapport au bien-être social maximal, afin de former une structure stable. La dernière mesure le nombre de structures de coalitions qui ont été explorées, c'est-à-dire le nombre de structures qui ont été sélectionnées à un moment dans le protocole, sans être nécessairement proposées. Afin d'avoir des données commensurables et comparables, chaque mesure est un ratio, avec des valeurs comprises sur l'intervalle $[0, 1]$.

La première mesure est le ratio entre la valeur ϵ de l'ϵ-cœur auquel appartient la solution trouvée par le protocole et la valeur ϵ du dernier cœur, c'est-à-dire le minimum atteignable. Ainsi, si le dernier cœur n'est pas un 0-cœur, les solutions du protocole ne seront pas désavantagées contrairement à une comparaison directe au 0-cœur.

Definition 13 (Ratio au dernier cœur) *Étant donné un jeu $\mathcal{G}$, soient $\epsilon^*(\mathcal{G})$ la valeur ϵ du dernier cœur, et $\epsilon^p(\mathcal{G})$ la valeur ϵ de l'ϵ-cœur auquel appartient la solution retournée par le protocole. Le ratio au dernier cœur, noté $R^*(\mathcal{G})$, est défini par :*

$$R^*(\mathcal{G}) = \frac{1 - \epsilon^p(\mathcal{G})}{1 - \epsilon^*(\mathcal{G})}$$

La seconde est le ratio entre la valeur ϵ de l'ϵ-cœur auquel appartient la solution trouvée par le protocole et la valeur ϵ du meilleur ϵ-cœur (c'est-à-dire ayant la valeur ϵ la plus faible) atteignable par notre protocole s'il couvre toutes les partitions possibles, selon notre règle de distribution.

Definition 14 (Ratio à l'optimal-protocole) *Étant donné un jeu $\mathcal{G}$, soient $\epsilon^{p^*}(\mathcal{G})$ la valeur ϵ de l'ϵ-cœur optimal selon notre protocole et la règle de distribution, et $\epsilon^p(\mathcal{G})$ la valeur ϵ de l'ϵ-cœur auquel appartient la solution retournée par le protocole. Le ratio à l'optimal-protocole, noté $R^p(\mathcal{G})$, est défini par :*

$$R^p(\mathcal{G}) = \frac{1 - \epsilon^p(\mathcal{G})}{1 - \epsilon^{p^*}(\mathcal{G})}$$

La troisième [1] est le ratio entre le bien-être social de la solution trouvée par le protocole, qui est stable, et le bien-être social maximal pour le jeu.

Definition 15 (Prix de la stabilité) *Étant donné un jeu $\mathcal{G}$, soient $\Pi(\mathcal{G})$ l'ensemble de toutes les structures de coalitions pour $\mathcal{G}$, et $S^p_\mathcal{G} = \langle \mathcal{CS}^p, \vec{x}^p \rangle$ une solution au jeu $\mathcal{G}$ retournée par le protocole. Le* prix de la stabilité *pour cette solution, noté $PS(S^p_\mathcal{G})$, est défini par :*

$$PS(S^p_\mathcal{G}) = \frac{\sum_{C \in \mathcal{CS}^p} v(C)}{\max_{\pi \in \Pi(\mathcal{G})} \sum_{C' \in \pi} v(C')}$$

La dernière est la proportion de structures de coalitions explorées par le protocole, c'est-à-dire qui ont été proposées ou sélectionnées puis mises dans la liste noire durant le protocole, comparé au nombre total de structures possibles, donné par le nombre de Bell. Étant donné que chaque agent peut proposer chaque partition une seule fois, et que leur liste noire est individuelle, le treillis des structures de coalitions peut être exploré autant de fois qu'il y a d'agents.

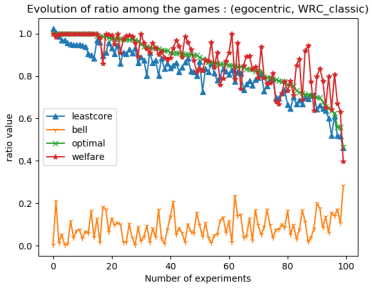
Definition 16 (Ratio de Bell) *Étant donné le nombre de partitions explorées par l'agent a_i et le nombre de Bell, respectivement notés p^i_e et B_n (avec $n = |N|$), le ratio de Bell, noté $B^\%$, est :*

$$B^\% = \frac{\sum_{i \in N} p^i_e}{n \times B_n} \text{ avec } B_{m+1} = \sum_{k=0}^{m} \binom{m}{k} B_k$$

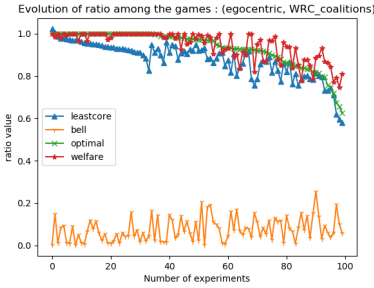
1. La limitation du nombre d'agents n'est pas liée à la complexité du protocole mais au calcul combinatoire de la solution optimale pour le jeu afin de comparer notre protocole à celle-ci.

2. Il est nécessaire que les agents aient la même stratégie de concession afin qu'ils soient tous d'accord sur qui concède, mais ce n'est pas le cas pour le type de concession. Cependant nous nous contentons de cette homogénéité pour cette première étude.

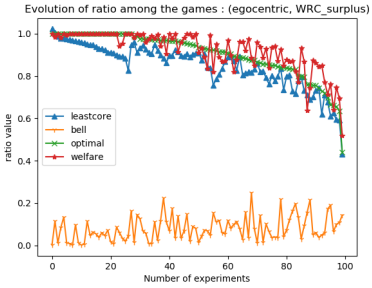
©AFIA2022



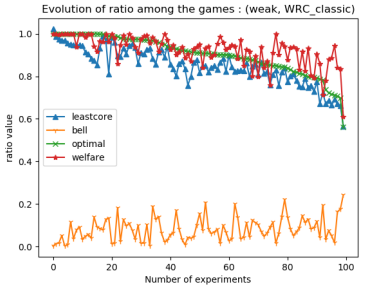
(a) Égocentrique / WRC-Classic



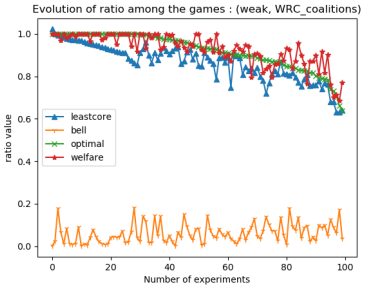
(b) Égocentrique / WRC-Coalitions



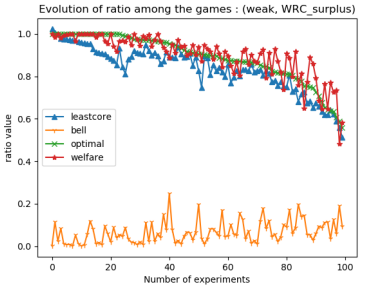
(c) Égocentrique / WRC-Surplus



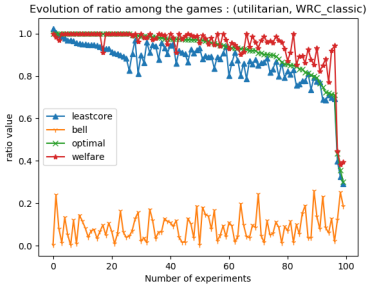
(d) Faible / WRC-Classic



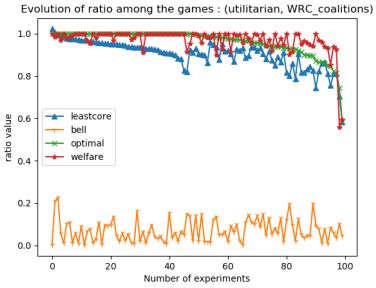
(e) Faible / WRC-Coalitions



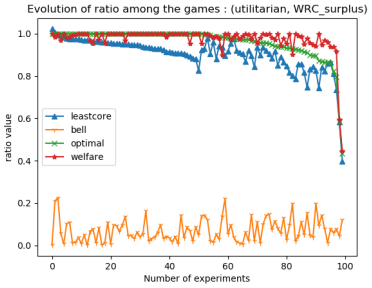
(f) Faible / WRC-Surplus



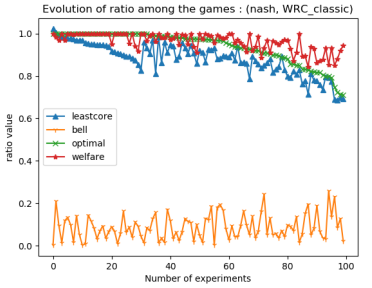
(g) Utilitaire / WRC-Classic



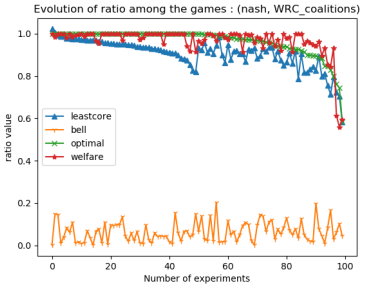
(h) Utilitaire / WRC-Coalitions



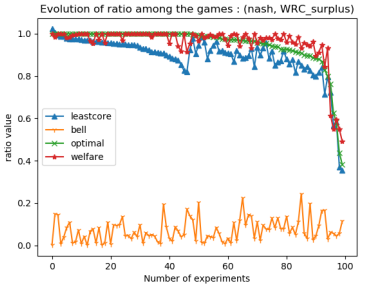
(i) Utilitaire / WRC-Surplus



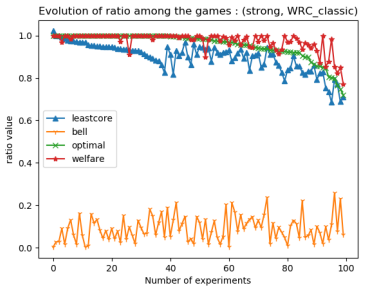
(j) Nash / WRC-Classic



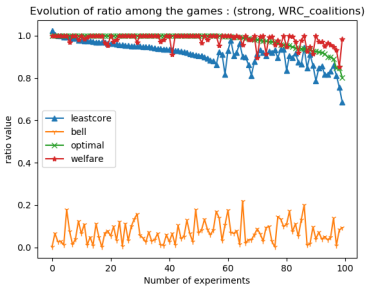
(k) Nash / WRC-Coalitions



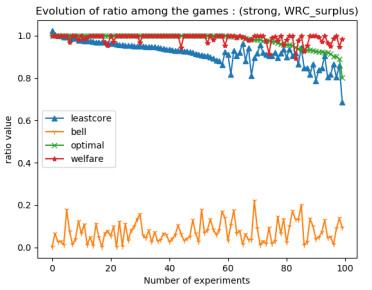
(l) Nash / WRC-Surplus



(m) Fort / WRC-Classic

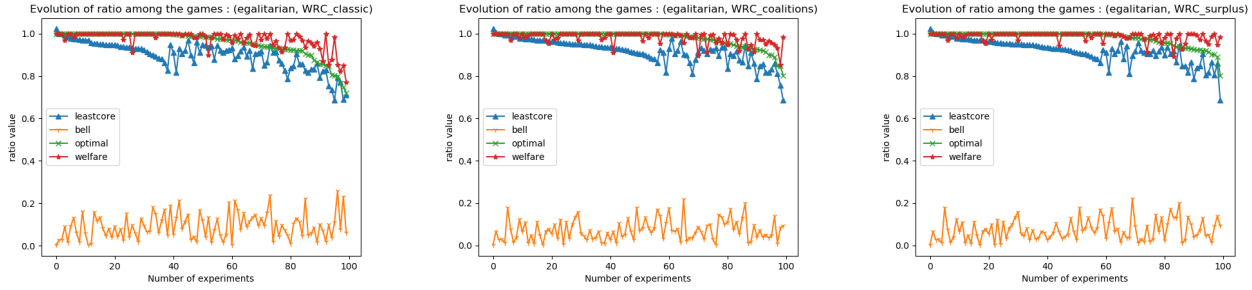


(n) Fort / WRC-Coalitions

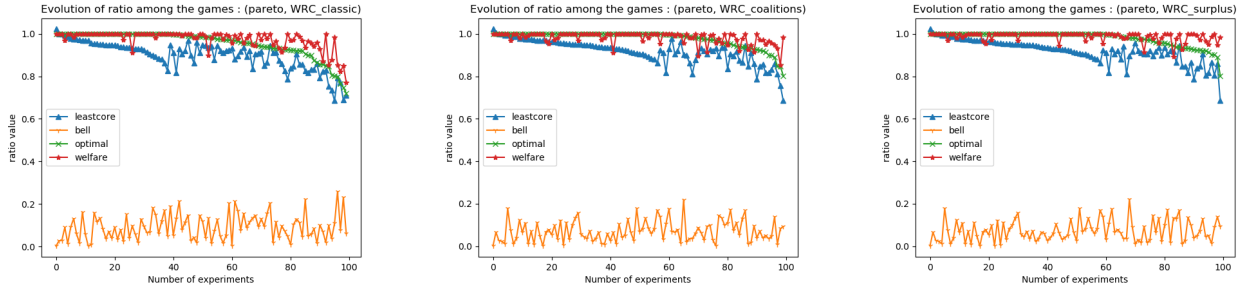


(o) Fort / WRC-Surplus

FIGURE 1 – Différents ratios pour un couple (Type / Stratégie) de concession

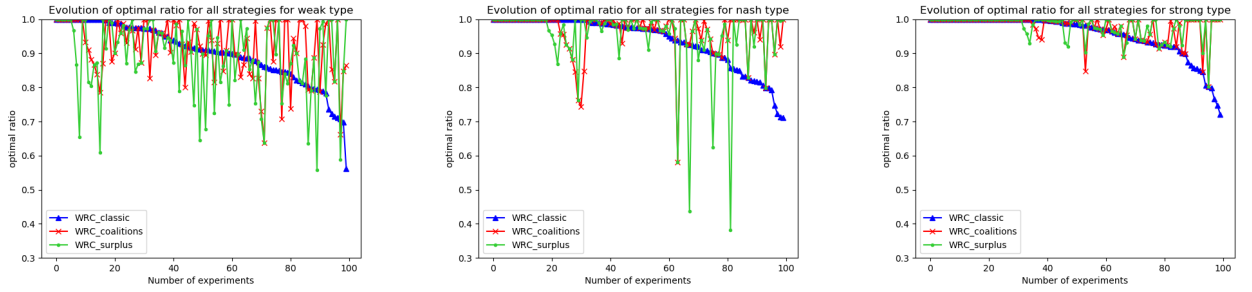


(a) Égalitaire / WRC-Classic (b) Égalitaire / WRC-Coalitions (c) Égalitaire / WRC-Surplus



(d) Pareto / WRC-Classic (e) Pareto / WRC-Coalitions (f) Pareto / WRC-Surplus

FIGURE 2 – Différents ratios pour un couple (Type / Stratégie) de concession



(a) Faible (b) Nash (c) Fort

FIGURE 3 – Exemples de différences entre stratégies

4.3 Résultats

Les figures 1 et 2 montrent le ratio au dernier cœur, le ratio à l'optimal-protocole, le prix de la stabilité et le ratio de Bell pour chaque stratégie de concession possible. La figure 1 porte sur les types de concession *faible*, *égocentrique*, *Nash*, *utilitaire* et *fort*, et la figure 2 sur les types *égalitaire* et *Pareto*. Les données sont triées sur le ratio de l'optimal-protocole du plus grand au plus petit, et les autres mesures suivent ce tri pour rester liées au jeu correspondant. Nous présentons les figures dans un ordre permettant de constater les différences selon les types de concession, de ce qui semble empiriquement le moins bon, vers le meilleur. Plus le ratio de Bell, noté `bell`, est proche de 0, moins il y a eu de partitions explorées. Pour les autres mesures, la meilleure valeur est 1. Pour le ratio au dernier cœur, noté `least-core`, et le ratio à l'optimal-protocole, noté `optimal`, cela signifie que les solutions du protocole sont respectivement présentes dans le dernier cœur, et dans le dernier cœur sachant la règle de distribution. Pour le prix de la stabilité, noté `welfare`, cela signifie que les solutions du protocole maximisent le bien-être social. Plus ces mesures s'éloignent de 1, plus il y a perte d'efficacité.

Tout d'abord, la courbe du ratio de Bell a une forme similaire pour toutes les paires (type, stratégie). Nous estimons l'exploration moyenne sur tous les jeux à 10%, indépendemment du type et de la stratégie de concession. Il n'y a pas de corrélation apparente entre exploration et efficacité, ni l'inverse. Pour le ratio à l'optimal-protocole, les stratégies et les types de concession influent sur les résultats. Pour les types *égocentrique*, *faible*, *utilitaire* et *Nash*, ce ratio atteint des pertes de 40%, avec parfois des effrondements atteignant les 60% pour certains paramètres. Bien qu'elle comprenne les plus gros effondrements, WRC-surplus obtient, avec WRC-coalitions, le meilleur taux de

©AFIA2022

valeurs optimales. Pour les types *fort*, *égalitaire* et *Pareto*, WRC-classic atteint des pertes maximales d'environ 30%, contre 20% pour les deux autres stratégies. Ces dernières ont donc les meilleurs résultats, avec environ 60% des jeux avec un ratio à l'optimal-protocole de 1. Le ratio au dernier cœur et le prix de la stabilité se comportent de la même manière, à savoir qu'ils présentent des pics d'effondrement sur les mêmes jeux. Pour les types *faible* et *égocentrique*, il y a de grandes pertes d'efficacité (au-dessus de 30%), et ce pour toutes les stratégies. En s'intéressant aux différences entre stratégies sur ces types, nous remarquons que les pertes sont plus limitées avec WRC-coalitions. Les valeurs entre WRC-classic et WRC-surplus sont proches, bien que cette dernière semble décroître un peu moins. Pour les types *Nash* et *utilitaire*, les pertes sont moins grandes. Elles sont de l'ordre de 20%, bien qu'il y ait des effondrements autour de 60%, comme avec le ratio à l'optimal-protocole. Pour le type *Nash*, les pertes de bien-être social sont réduites avec WRC-classic, mais WRC-coalitions est légèrement meilleure pour le ratio au dernier cœur. Pour le type *utilitaire*, ce sont WRC-coalitions et WRC-surplus qui minimisent les pertes. Enfin, pour les trois derniers types (*fort*, *égalitaire* et *Pareto*), elles semblent toutes similaires. Il y a en réalité des différences mineures sur le nombre de partitions explorées et le nombre de concessions effectuées, mais les résultats du protocole sont identiques. Ce phénomène vient, à notre avis, de la règle de distribution choisie, qui contraint davantage ces types de concession et les rapproche donc sémantiquement. Toutefois, ces trois types sont empiriquement meilleurs que les autres, et ce notamment avec les stratégies WRC-coalitions et WRC-surplus, où les pertes sur le ratio au dernier cœur atteignent moins souvent 20%, et où le prix de la stabilité excède très rarement 10% tout en étant souvent à 0%, c'est-à-dire optimal. La figure 3 compare le ratio à l'optimal-protocole des trois stratégies sur trois différents types de concession : *faible*, *Nash* et *fort*. Nous montrons ici seulement ces trois types car, comme vu précemment, la tendance des courbes est semblable pour certains types : *faible* et *égocentrique*, *Nash* et *utilitaire*, *égalitaire*, *fort* et *Pareto*. Les résultats sont triés de la plus grande à la plus petite valeur de ratio à l'optimal-protocole avec WRC-classic, et les valeurs pour les autres stratégies suivent ce tri en restant liées au jeu correspondant. La figure 3.a montre des valeurs qui varient beaucoup, mais celles-ci décroissent moins et moins souvent pour WRC-coalitions. WRC-surplus semble être la moins bonne stratégie de ce cas. Concernant le type *Nash*, WRC-surplus semble également la pire stratégie avec des pertes atteignant 60%, et WRC-coalitions semble être la meilleure. Pour le type *fort*, les valeurs s'effondrent moins, avec une perte maximale de 30% environ. Ici, WRC-coalitions et WRC-surplus semblent proches, et presque toujours plus efficaces que WRC-classic. Pour résumer, trois types de concession minimisent les pertes : *fort*, *égalitaire* et *Pareto*. Pour les stratégies, WRC-coalitions a les meilleurs résultats, suivie de près par WRC-surplus (sauf pour certains types). Ces résultats sont cohérents : une perte d'optimalité due à la distribution et des stratégies adaptées plus efficaces.

5 Conclusion

Nous avons proposé un protocole distribué pour la formation de coalitions, fondé sur un protocole de négociations monotones, avec de nouvelles stratégies de concession. Ces stratégies, et notamment WRC-coalitions, sont plus performantes que la stratégie originelle pour certains types de concession qui minimisent les pertes (*fort*, *égalitaire* et *Pareto*). Cependant, notre approche distribuée nécessite l'exploration d'un grand nombre de structures de coalitions par chaque agent. Il serait donc intéressant de décentraliser totalement le protocole, et d'analyser les pertes d'efficacité dues à cette décentralisation.

Références

[1] E. Anshelevich, A. Dasgupta, J. Kleinberg, É. Tardos, T. Wexler, and T. Roughgarden. The price of stability for network design with fair cost allocation. *SICOMP*, 38(4) :1602–1623, 2008.

[2] E. T. Bell. The iterated exponential integers. *Ann. Math*, pages 539–557, 1938.

[3] F. Bistaffa, A. Farinelli, J. Cerquides, J. Rodríguez-Aguilar, and S. D. Ramchurn. Algorithms for graph-constrained coalition formation in the real world. *TIST*, 8(4) :1–24, 2017.

[4] G. Chalkiadakis, E. Elkind, and M. Wooldridge. Computational aspects of cooperative game theory. *Synth. Lect. Artif. Intell. Mach. Learn.*, 5(6) :1–168, 2011.

[5] U. Endriss. Monotonic concession protocols for multilateral negotiation. In *5th AAMAS*, pages 392–399, 2006.

[6] L. Khalouzadeh, N. Nematbakhsh, and K. Zamanifar. A decentralized coalition formation algorithm among homogeneous agents. *JATIT*, 22(1), 2010.

[7] R. Mochaourab and E. A. Jorswieck. Coalitional games in miso interference channels : Epsilon-core and coalition structure stable set. *IEEE Trans. Signal Process.*, 62(24) :6507–6520, 2014.

[8] T. Rahwan and N. R. Jennings. An improved dynamic programming algorithm for coalition structure generation. In *7th AAMAS*, pages 1417–1420, 2008.

[9] T. Rahwan, T. Michalak, M. Wooldridge, and N. R. Jennings. Coalition structure generation : A survey. *AI*, 229 :139–174, 2015.

[10] T. Rahwan, S. D. Ramchurn, N. R. Jennings, and A. Giovannucci. An anytime algorithm for optimal coalition structure generation. *JAIR*, 34 :521–567, 2009.

[11] G. Rota. The number of partitions of a set. *Am. Math. Mon.*, 71 :498–504, 1964.

[12] L. S. Shapley and M. Shubik. Quasi-cores in a monetary economy with nonconvex preferences. *Econometrica*, pages 805–827, 1966.

[13] O. Shehory and S. Kraus. Methods for task allocation via agent coalition formation. *AI*, 101(1-2) :165–200, 1998.

[14] M. Sims, C. V. Goldman, and V. Lesser. Self-organization through bottom-up coalition formation. In *2nd AAMAS*, pages 867–874, 2003.

[15] P. Tošić and C. Ordonez. Distributed protocols for multi-agent coalition formation : a negotiation perspective. In *8th AMT*, pages 93–102, 2012.

DAGOBAH: Annotation sémantique de données tabulaires par comparaison du contexte des tables et d'un graphe de connaissances

Viet-Phi Huynh[1], Jixiong Liu[1,2], Yoan Chabot[1], Frédéric Deuzé[1],
Thomas Labbé[1], Pierre Monnin[1], Raphaël Troncy[2]

[1] Orange, France
[2] EURECOM, Sophia Antipolis, France

Résumé

Cet article présente les améliorations apportées à DAGOBAH, un système effectuant un pré-traitement automatique et une interprétation sémantique de données tabulaires à l'aide d'un graphe de connaissances. Nous détaillons les optimisations des mécanismes de recherche de candidats et les nouvelles techniques d'étude du contexte des nœuds du graphe de connaissances qui nous ont permis d'obtenir les meilleures performances lors du challenge SemTab 2021 en terme de précision. Nous décrivons également le déploiement des algorithmes DAGOBAH au sein de l'entreprise Orange via l'API TableAnnotation et une interface utilisateur. Ces deux méthodes d'accès permettent d'accélérer l'adoption de solutions d'interprétation de tables au sein de l'entreprise pour répondre à des besoins industriels.

Mots-clés

Interpretation sémantique de tables, DAGOBAH, SemTab

Abstract

In this paper, we present the latest improvements of the DAGOBAH system that performs automatic pre-processing and semantic interpretation of tables. In particular, we report promising results obtained in the SemTab 2021 challenge thanks to optimisations in lookup mechanisms and new techniques for studying the context of nodes in the knowledge graph. We also present the deployment of DAGOBAH within the Orange company via the TableAnnotation API and a front-end called DAGOBAH UI. These two access methods enable to accelerate the adoption of Semantic Table Interpretation solutions within the company.

Keywords

Semantic Table Interpretation, DAGOBAH, SemTab

1 Introduction

Les données tabulaires constituent une source importante de connaissances, une grande partie des gisements internes des entreprises et du Web étant représentée sous cette forme. Par conséquent, il existe un vif interêt pour le domaine de l'interprétation automatique de données tabulaires (en anglais *Semantic Table Interpretation* ou STI). Ce domaine est caractérisé par le développement de méthodes d'interprétation automatique de tables à l'aide d'un graphe de connaissances via trois tâches principales. La tâche *Cell-Entity Annotation* (CEA) consiste à associer chaque cellule de la table avec une entité du graphe de connaissances. Par exemple, la mention "Belfort" de la Figure 1 sera annotée avec l'entité Q171545 (Belfort) du graphe de connaissances Wikidata. La tâche *Column-Type Annotation* (CTA) vise à annoter chaque colonne avec une classe. Ainsi, la première colonne "City" de la Figure 1 sera annotée avec l'entité Q484170 (commune française). Enfin, la tâche *Columns-Property Annotation* (CPA) vise à associer chaque paire de colonnes à une propriété. La relation entre les colonnes "City" et "Region" dans la Figure 1 pourra typiquement être associée à la propriété P361 (fait partie de). Les annotations ainsi générées peuvent être utilisées dans de nombreux cas d'utilisation, de l'indexation des jeux de données et leur recommandation jusqu'à l'enrichissement de graphes de connaissances.

Les algorithmes de STI DAGOBAH, développés conjointement par Orange et EURECOM, ont été évalués lors des différentes éditions du challenge international SemTab [1] [8, 14, 13], colocalisé avec la conférence ISWC. Cet évènement centré sur les problématiques d'annotations de données tabulaires a attiré près de 50 équipes participantes au cours des trois dernières éditions. Comme démontré lors de ce challenge, nos outils ont atteint un niveau de maturité permettant de répondre à des problématiques industrielles dans le groupe. En effet, Orange est une multinationale opérant dans un grand nombre de domaines métiers (e.g. télécommunications, contenu multimédia, cybersécurité, etc.). Par conséquent, Orange produit de grands volumes de données tabulaires hétérogènes. A l'aide des techniques de STI, ces données peuvent être exploitées stratégiquement, par exemple, en structurant les connaissances dormantes dans ces données et en les rendant exploitables par le biais de moteurs de type questions-réponses [4].

Le challenge SemTab 2021 et les besoins industriels mentionnés ci-dessus ont motivé des travaux de recherche qui constituent le cœur des algorithmes utilisés par le système DAGOBAH SL présenté en 2020 [10] et amélioré en 2021 [11]. En particulier, le calcul de scores et le classement des entités ont été optimisés grâce à :

1. Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching : http://www.cs.ox.ac.uk/isg/challenges/sem-tab/

©AFIA2022

— Une amélioration des stratégies d'indexation et de mise en correspondance des entités pour améliorer la qualité et la couverture de la recherche de candidats (i.e. *lookup*) ;
— Une meilleure représentation et désambiguïsation des entités en exploitant plus efficacement leurs contextes (i.e. voisinage) dans le graphe de connaissances ;
— Un algorithme de notation (i.e. *scoring*) des entités amélioré et plus flexible exploitant à la fois des informations locales et des informations globales à la table étudiée.

Ces nouvelles contributions ont donné naissance au système DAGOBAH SL 2021 décrit dans la Section 3. Nous présentons les résultats de l'évaluation menée dans le cadre du challenge dans la Section 4. La Section 5 introduit les efforts autour de l'utilisabilité des systèmes d'annotation avec en particulier la mise à disposition d'une API REST `TableAnnotation` ainsi qu'une interface utilisateur nommée `DAGOBAH UI`. Enfin, la Section 6 offre des éléments de réflexions autour du challenge SemTab et de l'adoption des outils de STI au sein des entreprises.

2 Etat de l'art

L'approche courante pour réaliser la tâche de CEA consiste à effectuer des opérations de recherche syntaxique (e.g. Levenshtein), d'alignement d'ontologies ou d'exploitation de plongements [15]. La désambiguïsation des entités candidates est ensuite traitée comme une tâche de classement des candidats, en utilisant des heuristiques, des algorithmes tels que PageRank [9] ou des modèles basés sur les graphes [12]. Les principales approches sur le typage de colonnes (CTA) infèrent des classes à partir des entités produites par la tâche CEA. Des heuristiques plus ou moins complexes construites autour du vote majoritaire sont utilisées [17]. Enfin, l'extraction de relations (CPA) est généralement réalisée par la recherche de paires d'éléments en colonnes, *i.e.* types et entités préalablement choisis [19].
Récemment, le challenge SemTab a permis d'accélérer le développement des approches de STI. Une majorité d'entre elles prennent la forme de systèmes basés sur la recherche de candidats dans DBpedia et Wikidata, le calcul d'une similarité syntaxique et des votes majoritaires [1, 5, 7]. MTab4Wikidata [18] adopte la correspondance floue et la "recherche à deux cellules" pour améliorer la prise en charge des fautes d'orthographe et des ambiguïtés dans le contenu des tableaux. Ce système a remporté le premier prix des défis SemTab 2019 et SemTab 2020.

3 Système DAGOBAH SL 2021

DAGOBAH est un processus de bout en bout annotant des tables relationnelles avec des éléments d'un graphe de connaissances tel que Wikidata. Ce processus se compose de six étapes exécutées en séquence tel qu'illustré dans la Figure 1. Etant donné une table relationnelle en entrée, l'étape de pré-traitement détermine un ensemble de métadonnées de la table ainsi que les cibles de l'annotation (Section 3.1). Le module de recherche de candidats collecte ensuite des entités candidates dans le graphe de connaissances pour chaque cellule cible de la table (Section 3.2). Le module de notation préliminaire évalue chacun de ces candidats afin de déterminer un score de confiance (Section 3.3). Les étapes suivantes visent à générer les annotations CTA ainsi que les annotations CPA (Section 3.4). Enfin, les annotations précédentes sont mises à contribution pour générer les annotations CEA (Section 3.4).

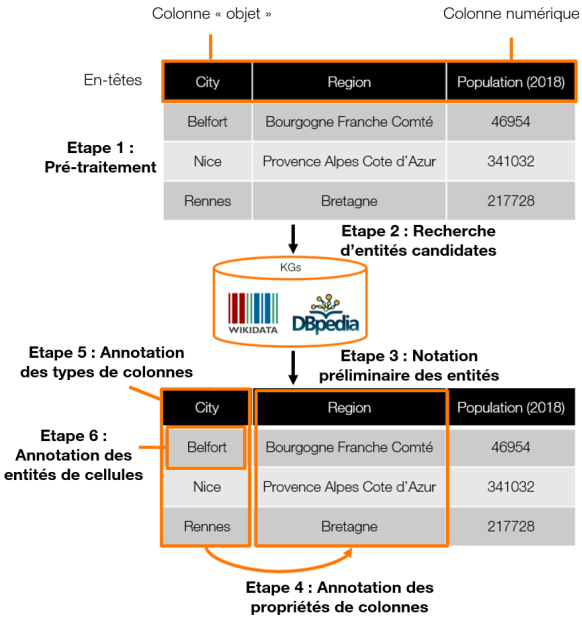


FIGURE 1 – Vue d'ensemble du processus d'annotation.

3.1 Pré-traitement des données tabulaires

Dans des cas d'utilisation réels, l'annotation des tables se révèle complexe en partie à cause de l'absence d'informations préalables sur leur structure et leur contenu. Ainsi, leur pré-traitement peut faciliter leur annotation. C'est pourquoi DAGOBAH propose des méthodes de pré-traitement visant à générer des métadonnées sur les tables via quatre tâches principales : la détection d'orientation, l'extraction d'en-têtes, l'identification de colonne clé [2] et le typage primitif des colonnes. Le typage primitif permet de détecter des entités nommées (e.g. localisation, organisation, personne), des littéraux avec unités (e.g. distance, vitesse, température) ou des littéraux divers (e.g. email, URL, adresse IP) [2].

3.2 Recherche d'entités candidates

L'étape de pré-traitement (et plus particulièrement le typage primitif) permet d'identifier les colonnes d'une table éligibles à l'étape de recherche d'entités candidates. Soit e_m une cellule d'une colonne éligible. L'étape de recherche d'entités candidates extrait un ensemble d'entités candidates pertinentes $\mathcal{E}_c(e_m)$ d'un graphe cible. Le service de

2. Actuellement, seul l'identification d'une colonne clé unique est supportée par l'outil.

recherche de candidats de DAGOBAH est basé sur ElasticSearch et supporte actuellement Wikidata et DBpedia pour lesquels des indexes ont été générés :

Entités Wikidata. Le service de recherche de candidats collecte les items et les propriétés ainsi que leurs labels et alias dans toutes les langues disponibles. Pour augmenter la couverture du service, les alias associés à chaque entité sont enrichis avec 11 propriétés supplémentaires telles que P2561 (name), P1705 (native label) ou P742 (pseudonym).

Entités DBpedia. Le service collecte les ressources en anglais ainsi que leurs labels dans toutes les langues disponibles. Pour augmenter la couverture, les labels sont enrichis avec les valeurs de 25 propriétés telles que abbreviation, birthName ou originalTitle. En complément, les labels et les alias de toutes les entités redirigées sont également inclus.

Nous faisons la moyenne des distances d'édition sur les caractères et sur les tokens [3] pour évaluer la similarité entre une mention contenue dans une cellule et l'ensemble des labels de chaque entité candidate. Ce mode de fonctionnement permet de traiter au mieux les chaines de caractère présentant des ordonancements des sous-chaînes différents (e.g. "Elon Musk" et "Musk Elon").

3.3 Notation préliminaire des candidats

L'étape de notation préliminaire évalue la pertinence des entités candidates $e_c \in \mathcal{E}_c(e_m)$ d'une cellule e_m à l'aide d'un score :

$$PSc(e_c, e_m) = Sc_{context}(\mathcal{N}_{graph}(e_c), \mathcal{N}_{table}(e_m)) \times e^{\gamma(Sc_{sim}(e_c,e_m)-1)} \quad (1)$$

Ce score préliminaire est le produit d'un score de contexte et d'un score syntaxique $Sc_{sim}(e_c, e_m)$. Ce dernier facteur renvoie le plus haut ratio de correspondance, basé sur la distance de Levenshtein, entre la cellule et les labels et alias du candidat étudié. Les alias sont pénalisés avec un ratio pondéré par 0.9 car nous considérons que les labels ont plus d'importance pour la désambiguisation. Le facteur d'amplification $\gamma \in \mathbb{N}^+$ définit l'importance de la similarité syntaxique dans le calcul du score préliminaire. Nous avons déterminé, de manière empirique, que la valeur 2 était appropriée pour une utilisation du système sur les corpus du challenge SemTab 2021.

Les améliorations du système DAGOBAH SL 2021 se concentre principalement sur le score de contexte, définit comme suit :

$$Sc_{context}(\mathcal{N}_{graph}(e_c), \mathcal{N}_{table}(e_m)) = \frac{\sum_i w_i \times sn_i}{\sum_i w_i} \quad (2)$$

où $\mathcal{N}_{table}(e_m)$ est l'ensemble des cellules voisines de e_m sur la même ligne et $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$ est l'ensemble des nœuds voisins de l'entité e_c dans le graphe de connaissances [4]. Pour chaque cellule voisine $n_i \in \mathcal{N}_{table}(e_m)$, sn_i est un score de correspondance défini par rapport à $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$. DAGOBAH SL 2021 résout deux problèmes de DAGOBAH SL 2020 inhérents au calcul du score de contexte :

Evaluation coûteuse. Chaque sn_i était évalué en itérant sur l'ensemble des nœuds dans $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$ pour trouver la meilleure correspondance. Par conséquent, un problème de performance survient lorsque l'algorithme doit noter une entité très générique du graphe de connaissances présentant des centaines voire des milliers de propriétés. Par exemple, considérons la cellule "Belfort" dans la Figure 1 et l'entité Wikidata candidate Q171545. Pour vérifier si la cellule "Bourgogne Franche Comté" est dans le contexte de Q171545, nous devons effectuer une comparaison avec chacun des $\sim$ 1000 nœuds de $\mathcal{N}_{graph}(Q171545)$ ce qui inclus Q142 (France), Q3371185 (Paul Faivre), etc. (Figure 2a).

Contexte du graphe à un saut. $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$ est l'ensemble des nœuds situés à un saut de e_c dans le graphe. Par conséquent, une cellule voisine $n_i \in \mathcal{N}_{table}(e_m)$ correspondant à un nœud situé à deux sauts de e_c n'était pas prise en compte dans le contexte de e_c. Par exemple, soit le contexte à un saut de Q171545 (Belfort) dans la Figure 2a, nous considérions, à tort, que Bourgogne Franche Comté n'avait pas de relations avec Belfort bien qu'il s'agisse de la région du Territoire de Belfort dont la capitale est Belfort.

DAGOBAH SL 2021 améliore l'efficacité du calcul et l'expressivité du score de contexte en évitant une notation exhaustive et en exploitant des contextes d'entités plus expressifs via la considération de nœuds à deux sauts.

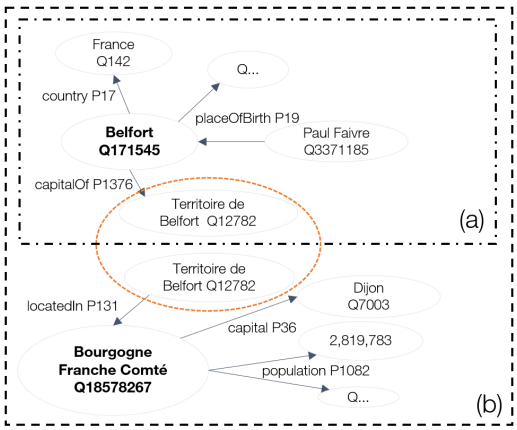


FIGURE 2 – Contexte (i.e. voisinage) de l'entité Q171545 (Belfort) dans le graphe Wikidata. (a) Contexte à un saut de Q171545. (b) Le contexte est étendu via l'intersection de sous-graphe.

3. https://github.com/seatgeek/thefuzz

4. Les nœuds voisins sont connectés à e_c via des chemins de prédicats dans le graphe de connaissances, quelque soit la direction des prédicats.

©AFIA2022

3.3.1 Exploitation du contexte des entités du graphe de connaissances

Le score de correspondance du voisinage sn_i défini dans l'Equation (2) indique si une cellule voisine n_i de e_m correspond à un nœud voisin de e_c. Le calcul de sn_i peut se résumer à la recherche d'une entité candidate pour n_i dans $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$ et à l'évaluation de sa similarité. Dans notre exemple précédent, Q18578267 est une entité candidate pour la cellule "Bourgogne Franche Comté" dans le contexte à deux sauts $\mathcal{N}_{graph}(Q171545)$ (Figure 2b). A partir de cette observation, nous proposons une méthode pour calculer efficacement le score sn_i. L'étape de recherche d'entités candidates (Section 3.2) génère des entités candidates $\mathcal{E}_c(e_m)$ pour une cellule cible e_m mais également des entités candidates $\mathcal{E}_c(n_i)$ pour des cellules voisines n_i. Par conséquent, nous vérifions si une entité candidate $e_i \in \mathcal{E}_c(n_i)$ est dans $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$. Dans ce cas, sn_i est simplement calculé en comparant les labels de la cellule voisine n_i et le nœud correspondant e_i. Ce point permet d'éviter des comparaisons additionnelles avec d'autres nœuds de $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$.

Pour vérifier si $e_i \in \mathcal{E}_c(n_i)$ est dans $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$, nous vérifions si e_i est connecté à e_c via un chemin de prédicats dans le graphe de connaissances. Le calcul de ces chemins est un élément important dans le calcul du score. Pour trouver efficacement un chemin de prédicats entre e_c et e_i, nous extrayons les sous-graphes à un saut $\mathcal{G}_{e_c}$ et $\mathcal{G}_{e_i}$ de e_c et e_i. Si un nœud intermédiaire v est présent dans $\mathcal{G}_{e_c}$ et $\mathcal{G}_{e_i}$, les chemins pointant sur v dans les deux sous-graphes sont concaténés. Dans notre exemple, le chemin de prédicats suivant a été identifié : Belfort $\xrightarrow{\text{capitalOf}}$ Territoire de Belfort $\xrightarrow{\text{locatedIn}}$ Bourgogne Franche Comté. Seuls les sous-graphes à un saut étant pris en compte, les chemins de prédicats résultant ont une longueur maximum de deux. Cette approche permet d'enrichir les informations sur une entité en incluant non seulement les voisins directs mais également les voisins indirects à une distance de deux sauts. Ces contextes enrichis du graphe permettent d'augmenter les chances de correspondance avec une cellule voisine $n_i \in \mathcal{N}_{table}(e_m)$ et rendent ainsi le score de contexte plus précis. Après des tests, nous faisons l'hypothèse que pour l'interprétation de tables avec Wikidata, des chemins de taille supérieure à deux sont peu significatifs et apportent du bruit pouvant impacter négativement la pertinence du score de contexte.

3.3.2 Notation souple du contexte

Dans l'Equation (2), les scores de correspondances du voisinage sn_i sont pondérés pour calculer le score final d'une entité. En effet, chaque cellule voisine $n_i \in \mathcal{N}_{table}(e_m)$ contribue à un niveau différent à l'annotation de la cellule cible e_m avec un poids w_i défini par l'Equation (3) :

$$w_i = \underbrace{\frac{\overbrace{se_i}^{(3a)}}{\sqrt{d(col_i)+1}}}_{(3b)} \times \overbrace{cnt(col_i)}^{(3c)} \times \overbrace{\tau(e_i)}^{(3d)}. \qquad (3)$$

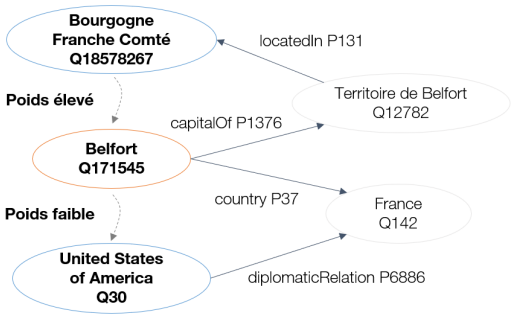


FIGURE 3 – Les nœuds voisins de Belfort (Q171545) contribuent de manière différente à son contenu informationnel.

(3a) Les cellules contenant des entités devraient avoir une plus grande importance que les cellules contenant des littéraux (e.g. date, mesure avec ou sans unités, nombre) compte tenu du manque de méthodes de désambiguïsation des littéraux (e.g. normalisation des dates, détection des unités/normalisation/conversion). C'est la raison pour laquelle nous fixons la valeur de se_i à 1.0 dans le cas où la cellule voisine n_i contient une entité et à 0.15 si n_i contient un littéral.

(3b) Une cellule voisine sur la partie gauche de la table a plus de chance d'être un contexte significatif pour la cellule cible. Par conséquent, $d(col_i)$ est la distance entre la colonne col_i et la première colonne de type "entité" de la table.

(3c) Les cellules n_i appartenant à une colonne voisine très connectée à la colonne cible devrait avoir un plus grand poids dans le contexte. Par conséquent, nous prenons en compte la connectivité $cnt(col_i)$ d'une cellule voisine par rapport à la colonne cible. La connectivité est définie ici comme le nombre d'occurrence de la propriété la plus souvent observée entre les deux colonnes.

(3d) Les nœuds voisins de l'entité candidate e_c dans $\mathcal{N}_{graph}(e_c)$ peuvent fournir différents contenus informationnels étant donné que certains voisins peuvent être "sémantiquement plus proches" de e_c que d'autres. Par exemple, si nous considérons le contexte à deux sauts de l'entité Q171545 (Belfort) présenté dans la Figure 3, Q18578267 (Bourgogne Franche Comté) est plus pertinent que Q30 (United States of America) car le chemin Belfort $\xrightarrow{\text{capitalOf}}$ Territoire de Belfort $\xrightarrow{\text{locatedIn}}$ Bourgogne Franche Comté porte davantage d'informations que le chemin Belfort $\xrightarrow{\text{country}}$ France $\xleftarrow{\text{diplomaticRelation}}$ United States of America.

La valeur de vérité $\tau(e_i)$ [6] d'un nœud voisin e_i rend compte de cette différence en mesurant la capacité discriminative d'un chemin $\tau(e_c \xrightarrow{p_1} v \xrightarrow{p_2} e_i)$

et est défini comme suit :

$$\tau(e_i) = \tau(e_c \xrightarrow{p_1} v \xrightarrow{p_2} e_i) = \frac{1}{1 + log(g(v))} \quad (4)$$

où $g(v)$ est la généricité du nœud intermédiaire v, i.e. le nombre de ses relations entrantes et sortantes dans le graphe de connaissances. Il est à noter que les voisins directs (i.e. les chemins de longueur 1) obtiennent toujours une valeur de vérité de 1.0.

3.4 Tâches d'annotation

3.4.1 Annotation des propriétés de colonnes (CPA)

La tâche de CPA identifie la relation sémantique r la plus adaptée pour une paire ordonnée de colonnes. Nous adoptons une stratégie de vote majoritaire reposant sur les occurrences et les scores de confiance cumulés des lignes pour r (pour plus de détails, voir [10]). Il est à noter que, conformément à la Section 3.3, r peut être un chemin de prédicats de longueur 1 (i.e., $\xrightarrow{p}$), un chemin unidirectionnel de longueur 2 (i.e. $\xrightarrow{p1}\xrightarrow{p2}$ ou $\xleftarrow{p1}\xleftarrow{p2}$) ou un chemin bidirectionnel de longueur 2 (i.e. $\xrightarrow{p1}\xleftarrow{p2}$ ou $\xleftarrow{p1}\xrightarrow{p2}$).

3.4.2 Annotation des types de colonnes (CTA)

La tâche de CTA a pour but d'identifier le type le plus représentatif et le plus spécifique d'une colonne donnée. Pour cela, les types des entités candidates de la colonne sont collectés et une stratégie de vote majoritaire est appliquée pour déterminer le type le plus précis (voir [10] pour plus de détails sur les méthodes d'enrichissement de type et les calculs de scores).

3.4.3 Annotation des entités de cellules (CEA)

La tâche de CEA sélectionne pour une cellule e_m l'entité la plus pertinente parmi les entités candidates $e_c \in \mathcal{E}_c(e_m)$ collectées dans le graphe de connaissances. Cette étape s'appuie à la fois sur la notation préliminaire des entités et sur les informations fournies par le CTA et le CPA pour calculer la note finale des entités candidates. En effet, la notation préliminaire d'une entité candidate e_c tient uniquement compte des informations locales, i.e. les informations de la ligne à laquelle elle appartient. La prise en compte du type de colonne fourni par le CTA et de la propriété identifiée par le CPA permet de prendre en compte des informations globales. Par conséquent, le score final $Sc(e_c, e_m)$ d'une entité candidate e_c est calculé comme suit :

$$Sc(e_c, e_m) = \frac{(PSc(e_c, e_m) + \alpha \times score_{CTA} + \beta \times \overline{score_{CPA}})}{1 + \alpha + \beta} \quad (5)$$

Si e_c appartient au type généré par le CTA pour la colonne, alors $score_{CTA}$ est égal au score attribué à ce type et 0 dans le cas contraire. Via $\overline{score_{CPA}}$, nous calculons la moyenne des scores des relations identifiées par le CPA impliquant la colonne de e_c. Pour chaque relation, si e_c appartient au domaine ou au co-domaine (selon l'orientation de la relation), alors nous considérons le score de cette relation, sinon, le score est fixé à 0. Pour renforcer (resp. affaiblir) un CTA/CPA fréquent (resp. peu fréquent) lors de la mise à jour de $Sc(e_c, e_m)$, un coefficient α (resp. β) est utilisé et défini par $\frac{occurrence(CTA)}{2}$ (resp. $\frac{\overline{occurrence(CPA)}}{2}$). Il est à noter que le nombre d'occurrences du CTA/CPA est divisé par 2 pour accorder davantage d'importance au score préliminaire $PSc(e_c, e_m)$.

4 Evaluation

4.1 Configurations

Afin d'évaluer l'apport des contextes de graphe à un et à deux sauts ainsi que de la notation de contexte souple définis dans la Section 3, nous définissons quatre configurations pour les expériences :

Configuration 1 Le score de contexte d'une entité est calculé en utilisant uniquement le voisinage à un saut du graphe de connaissances. Les poids w_i ne sont pas calculés à l'aide de l'Equation (3) mais fixés à 1.0 pour les entités et 0.15 pour les littéraux.

Configuration 2 Le score de contexte d'une entité est calculé en utilisant le voisinage à deux sauts du graphe de connaissances. Les poids w_i ne sont pas calculés à l'aide de l'Equation (3) mais sont fixés à 1.0 pour les voisins à un saut, 0.25 pour les voisins à deux sauts et 0.15 pour les littéraux.

Configuration 3 Le score de contexte d'une entité est calculé en utilisant le voisinage à deux sauts du graphe de connaissances. Les poids w_i sont calculés à l'aide de l'Equation (3). Cette configuration permet de tester si des contextes plus riches associés à une notation stricte permet de générer de meilleures annotations.

Configuration 4 Ce paramétrage restreint la configuration 3 au voisinage à un saut et aux voisins liés par un chemin unidirectionnel de longueur 2 dans le graphe. Cette configuration permet d'évaluer l'impact des chemins bidirectionnels qui semblent être moins informatifs (et amenant parfois du bruit) mais utiles dans certains cas bien ciblés.

4.2 Résultats

4.2.1 Evaluation expérimentale

Les résultats pour les quatre configurations définies précédemment sont donnés dans la Table 1. Il est à noter que les performances de DAGOBAH se sont continuellement améliorées tout au long du challenge SemTab 2021. Ainsi, les résultats de l'évaluation sont basés sur la dernière version de DAGOBAH mais nous indiquons également les résultats soumis lors des différentes phases du challenge dans les cellules grisées ainsi que le meilleur score parmi les participants du challenge [5], pour comparaison. Afin de valider la pertinence des modifications proposées dans les Sections 3.2 et 3.3, nous incluons également les scores du système DAGOBAH 2020 pour les tables du Round 1 annotées

5. Résultats complets : http://www.cs.ox.ac.uk/isg/challenges/sem-tab/2021/index.html#results

©AFIA2022

à l'aide de Wikidata. Les configurations des soumissions {1,2,3,4}* sont similaires aux configurations {1,2,3,4} définies précédemment avec quelques adaptations sur l'initialisation des scores et des poids. Cela n'impacte toutefois pas les scores de CEA mais a en revanche un impact sur les performances du CTA. En effet, le CTA est très sensible aux scores d'entités et aux poids attribués à la taxonomie pour la sélection du type le plus spécifique parmi l'ensemble des types possibles pour les entités (types directs, parents, etc.).

DAGOBAH obtient d'excellents résultats sur les jeux de données synthétiques (Round 2) tandis que les jeux de données générés manuellement et présentant des dispositions plus complexes semblent être traités de manière moins satisfaisante (Rounds 1 et 3). Sur le corpus HardTable, l'utilisation de contextes plus riches et de la technique de notation souple ne semble pas amener de gain. Cela peut s'expliquer par le fait que les tableaux de ce corpus sont presque entièrement représentés dans le graphe de connaissances et que les colonnes peuvent donc être désambiguisées seulement à partir de leur contenu. A l'inverse, le corpus BioTable contient des ambiguités plus complexes avec des chevauchements de contenu entre les colonnes empêchant leur désambiguisation (e.g. la colonne "Gene" peut être confondue avec la colonne "Protein", les valeurs étant souvent similaires). L'annotation semble donc bénéficier de contextes de graphes plus riches. Pour BioDivTable, la configuration 4 est celle obtenant les scores les plus bas, tandis que la configuration 1 est comparable à la configuration 3. Nous supposons que les chemins unidirectionnels de longueur 2 apportent du bruit pouvant expliquer les faibles performances de la configuration 4.

En règle général, les configurations 2, 3 et 4 sont plus précises pour le CEA que la configuration 1. La récupération du contexte de graphe à deux sauts semble donc être un ajout bénéfique permettant de récupérer des informations pertinentes. Les meilleures performances des configurations 3 et 4 vis à vis de la configuration 2 montre l'efficacité de la notation de contexte souple. Nous notons que la configuration 3 atteint des performances proches de la configuration 4. Ainsi, les chemins unidirectionnels (i.e. $\xrightarrow{p_1}\xrightarrow{p_2}$ et $\xleftarrow{p_1}\xleftarrow{p_2}$) apportent suffisamment d'informations et permettent d'obtenir des résultats équivalents par rapport à la configuration considérant à la fois les chemins unidirectionnels et bidirectionnels. De plus, l'influence négative du bruit apporté par les chemins bidirectionnels (e.g. Belfort $\xrightarrow{\text{country}}$ France $\xleftarrow{\text{diplomaticRelation}}$ United States of America) est limitée par le calcul de score de contexte souple qui évite une dégradation de la qualité de l'annotation. Cela permet aux chemins bidirectionnels pertinents de contribuer positivement au score de l'entité. On peut observer que les performances du CTA et du CPA ne sont pas aussi élevées qu'envisagé sur la plupart des corpus, et ce, malgré de bonnes performances de CEA. Le développement de stratégies plus performantes pour la sélection du type et des relations fera l'objet de travaux futurs.

TABLE 1 – Comparaison des configurations expérimentales et des performances du système DAGOBAH sur les Rounds 1, 2, et 3 du challenge SemTab 2021 (dans les cellules grisées). "F1" signifie F1-score, "P" signifie Precision. Les meilleurs résultats sont mis en valeur en gras.

Corpus	Configuration	CTA		CEA		CPA	
		F1	P	F1	P	F1	P
R1 WDTable	Config 1	0.793	0.793	0.913	0.913	-	-
	Config 2	0.790	0.790	0.923	0.923	-	-
	Config 3	0.783	0.783	**0.926**	**0.926**	-	-
	Config 4	0.783	0.783	0.924	0.924	-	-
	DAGOBAH2020	0.743	0.743	0.830	0.841	-	-
	Config 2*	**0.832**	**0.832**	0.923	0.923	-	-
	Top 1 SemTab21	0.728	0.73	0.907	0.907	-	-
R1 DBPTable	Config 1	0.25	0.25	0.935	0.935	-	-
	Config 2	0.27	0.27	0.946	0.946	-	-
	Config 3	0.274	0.274	**0.947**	**0.947**	-	-
	Config 4	0.274	0.274	**0.947**	**0.947**	-	-
	Config 2*	0.422	0.424	0.945	0.946	-	-
	Top 1 SemTab21	**0.46**	**0.468**	0.692	0.692	-	-
R2 BioTable	Config 1	0.874	0.874	0.882	0.882	0.898	**0.901**
	Config 2	0.911	0.911	0.916	0.916	**0.899**	0.899
	Config 3	0.915	0.915	0.950	0.951	**0.899**	0.899
	Config 4	0.916	0.916	**0.970**	**0.970**	**0.899**	0.899
	Config 4*	0.916	0.916	0.970	0.970	0.899	0.899
	Top 1 SemTab21	**0.956**	**1**	0.964	0.964	0.899	0.899
R2 HardTable	Config 1	0.968	0.969	0.975	0.976	0.996	0.997
	Config 2	0.968	0.969	0.976	0.976	0.996	0.997
	Config 3	0.968	0.969	0.976	0.976	0.996	0.997
	Config 4	0.968	0.968	0.976	0.976	0.996	0.997
	Config 3*	0.976	0.976	0.975	0.976	0.996	0.996
	Top 1 SemTab21	**0.977**	**0.977**	**0.985**	**0.985**	**0.997**	**0.998**
R3 BioDivTable	Config 1	0.338	0.339	0.619	0.64	-	-
	Config 2	0.335	0.335	0.60	0.62	-	-
	Config 3	0.344	0.345	**0.62**	**0.641**	-	-
	Config 4	0.343	0.343	0.475	0.491	-	-
	Config 4*	0.381	0.382	0.496	0.497	-	-
	Top 1 SemTab21	**0.593**	**0.595**	0.602	0.611	0.947	1
R3 HardTable	Config 3*	**0.99**	**0.99**	**0.974**	**0.974**	0.991	**0.995**
	Top 1 SemTab21	0.984	0.984	0.968	0.968	**0.993**	0.994
R3 GitTables DBP	Mapping	**0.07**	**0.117**	-	-		-
	Top 1 SemTab21	0.041	0.042	-	-	-	-
R3 GitTables SCH	Mapping	0.183	0.185	-	-	-	-
	Top 1 SemTab21	**0.205**	**0.943**	-	-	-	-

4.2.2 Corpus BioDivTab et GitTables

Il est à noter que pour les corpus BioDivTab et GitTables, nous avons adapté les algorithmes DAGOBAH présentés dans cet article. En effet, pour le corpus BioDivTab, les types primitifs générés par le pré-traitement ont été utilisés pour discriminer les colonnes "entités" et les colonnes contenant des littéraux. Une colonne contient des littéraux si elle contient des valeurs numériques, des dates, des unités ou des valeurs diverses. Sinon, la colonne est considérée comme une colonne d'entités et ses mentions peuvent donc être utilisées par le module de recherche de candidats. Pour le corpus GitTables, des règles de correspondance ont été définies entre les types primitifs et des classes de Schema.org et de l'ontologie DBpedia.

5 Mise en pratique industrielle

Pour améliorer la pertinence de DAGOBAH sur des cas d'utilisation industriels réels, nous avons adopté une approche Test & Learn. Dans cette optique, les algorithmes

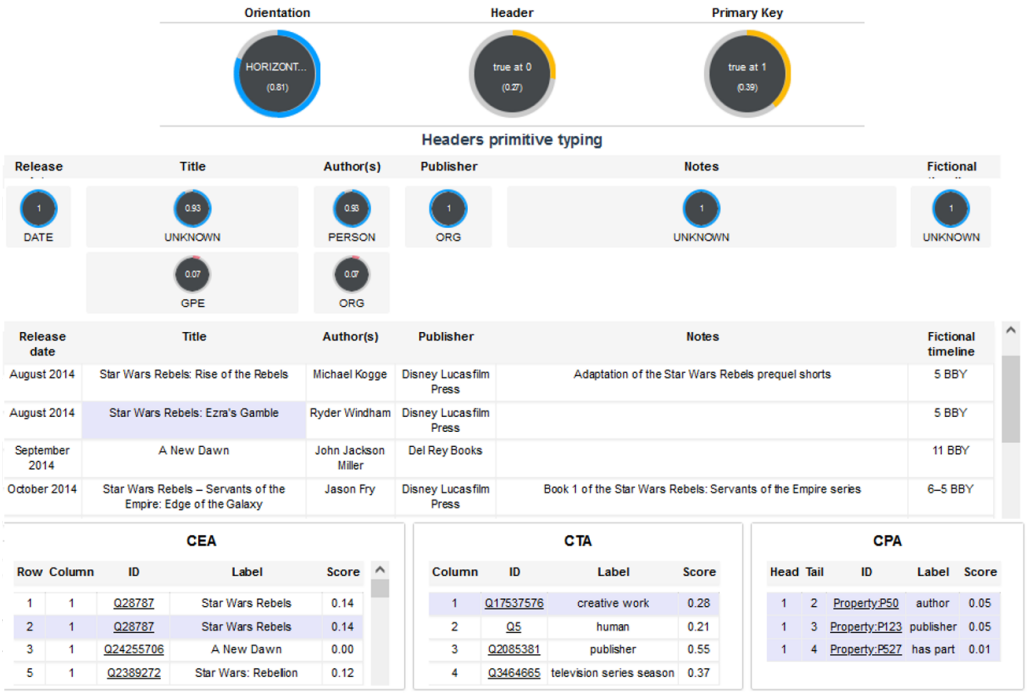


FIGURE 4 – `DAGOBAH UI` permet d'afficher les résultats générés par les outils de pré-traitement et d'annotation. En partie haute, l'outil affiche les informations de pré-traitement (e.g. orientation, en-têtes) ainsi que la table nettoyée. En partie basse, une vue interactive permet à l'utilisateur de naviguer dans les annotations CEA, CTA et CPA.

de DAGOBAH sont mis à disposition au sein de l'entreprise pour permettre aux collaborateurs internes de tester les outils d'annotation. Cette mise à disposition s'effectue via deux vecteurs : une API REST nommée `TableAnnotation` et une interface graphique nommée `DAGOBAH UI`.

5.1 API TableAnnotation

Cette API REST est déployée sur le portail Orange Developer. [6] Elle fournit des services de pré-traitement de données tabulaires, d'annotation sémantique et également de recherche d'entités candidates permettant, à partir d'une mention, de collecter des entités Wikidata ou DBpedia potentiellement correspondantes. Cette API est accessible à l'ensemble des collaborateurs des entités R&D du groupe ainsi que des unités d'affaires, sur invitation. Nous planifions d'ouvrir plus largement l'accès à cette API dans un futur proche.

5.2 DAGOBAH UI

Cette interface graphique permet à des collaborateurs non familiers avec le développement ou l'intelligence artificielle d'utiliser les fonctions de l'API `TableAnnotation` sur leurs tables et de visualiser les résultats sous une forme intelligible et ergonomique. Les utilisateurs ont la possibilité de charger des tables à partir du système de fichier local ou à partir de corpus de référence comme SemTab puis de lancer le pré-traitement de ces dernières ainsi que l'annotation sémantique. Les résultats de ces processus peuvent ensuite être visualisés (Figure 4). `DAGOBAH UI` est un outil très puissant pour démontrer la valeur des techniques d'interprétation automatique de tables au sein du groupe Orange mais également auprès de prospects externes. Une vidéo de démonstration de l'interface graphique est disponible `https://tinyurl.com/dagobah-ui`. Les développements récents sur cette interface permettent *(i)* l'enrichissement de graphes de connaissances à partir d'éléments de la table non présents dans le graphe, *(ii)* l'enrichissement de la table à partir du graphe de connaissances afin de compléter des valeurs manquantes ou d'ajouter de nouvelles colonnes, et *(iii)* la visualisation interactive du graphe de connaissances cible avec une mise en valeur des annotations résultants des étapes de CEA, CTA, CPA ainsi que des nouveaux triplets générés à partir de la table.

Cette interface utilisateur permet aux collaborateurs de saisir l'interêt de l'annotation sémantique pour des cas d'utilisation industriels. Inversement, l'équipe de recherche DAGOBAH peut identifier les défis associés à ces cas d'utilisation, ce qui constitue un apport précieux pour la feuille de route du projet. Bien que le déploiement et l'adoption des méthodes de STI chez Orange n'en soient qu'à leurs débuts, des tests sur différents cas d'utilisation ont lieu depuis plus d'un an via l'API `TableAnnotation` qui a répondu à plus de 200 000 requêtes. Plusieurs domaines sont envisagés comme cibles prioritaires pour l'annotation sémantique, incluant le divertissement (e.g. annotation de catalogues de films), la gouvernance des données ou la santé.

6. `https://developer.orange.com`

©AFIA2022

6 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les améliorations apportées au système DAGOBAH [3]. Grace à un mécanisme de recherche de candidats optimisé, l'enrichissement des contextes du graphe et la notation souple, DAGOBAH a obtenu la meilleure performance lors du challenge SemTab 2021. Les corpus de données proposés cette année par le challenge ont permis de prendre en compte une plus grande variété de problématiques associées à l'interprétation automatique de données tabulaires. Cette édition a notamment intégré de nouveaux domaines de connaissances (e.g. biomédical et données Git) et a ajouté de nouvelles contraintes sur l'annotation avec le support de graphes de connaissances multiples et l'annotation à l'aide de schémas uniquement (Schema.org et l'ontologie DBpedia). Ces challenges nous ont permis d'améliorer les stratégies d'annotation du système DAGOBAH avec notamment l'exploitation des types primitifs générés par le pré-traitement et l'utilisation de contextes de graphes enrichis.
Néanmoins, de nouvelles directions de recherche peuvent encore être explorées pour faire face à l'hétérogénéité des types de tableaux publiés sur le Web et dans les entreprises. Ainsi, la structure des tableaux et les relations internes pourraient être prises en compte (e.g. orientation des tableaux, cellules imbriquées, cellules à valeurs multiples, sujets répartis dans plusieurs colonnes, etc). [16] propose une classification reflétant cette hétérogénéité ainsi qu'un inventaire exhaustif des méthodes, à base de règles et d'heuristiques, ou à base d'apprentissage profond pour l'interprétation sémantique de données tabulaires. Les travaux futurs auront également pour objectif de progresser sur l'interprétation de tables où une grande part des mentions d'une colonne ne trouve pas de correspondance, ou avec peu de lignes et donc peu de contexte. Dans ces cas difficiles, nous cherchons à tirer profit des modèles de langage et des méthodes de plongement de graphes qui pourraient apporter un complément intéressant aux stratégies de calcul de score de contexte.

Références

[1] Nora Abdelmageed and Sirko Schindler. JenTab Meets SemTab 2021's New Challenges. In *Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching (SemTab)*, 2021.

[2] Yoan Chabot et al. DAGOBAH : An End-to-End Context-Free Tabular Data Semantic Annotation System. In *Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching (SemTab)*, 2019.

[3] Yoan Chabot et al. DAGOBAH : Un système d'annotation sémantique de données tabulaires indépendant du contexte. In *31es Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC)*, Angers, France, 2020.

[4] Yoan Chabot et al. A Framework for Automatically Interpreting Tabular Data at Orange. In *20th International Semantic Web Conference (ISWC), Posters, Demos and Industry Tracks*, 2021.

[5] Shuang Chen et al. Linkingpark : An integrated approach for semantic table interpretation. In *Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching (SemTab)*, 2020.

[6] Giovanni Luca Ciampaglia et al. Computational fact checking from knowledge networks. *PloS one*, 10(6), 2015.

[7] Marco Cremaschi et al. MantisTable SE : an Efficient Approach for the Semantic Table Interpretation. In *Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching (SemTab)*, 2020.

[8] Vincenzo Cutrona et al. Results of SemTab 2021. In *CEUR Workshop Proceedings*, volume 3103, 2021.

[9] Vasilis Efthymiou et al. Matching web tables with knowledge base entities : From entity lookups to entity embeddings. In *16th International Semantic Web Conference (ISWC)*, pages 260–277, 2017.

[10] Viet-Phi Huynh et al. DAGOBAH : enhanced scoring algorithms for scalable annotations of tabular data. In *Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching (SemTab)*, 2020.

[11] Viet-Phi Huynh et al. DAGOBAH : Table and Graph Contexts For Efficient Semantic Annotation Of Tabular Data. In *Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching (SemTab)*, 2021.

[12] Yusra Ibrahim et al. Making sense of entities and quantities in Web tables. In *International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM)*, pages 1703–1712, 2016.

[13] Ernesto Jiménez-Ruiz et al. Results of SemTab 2020. volume 2775, pages 1–8, 2020.

[14] Ernesto Jiménez-Ruiz et al. SemTab 2019 : Resources to Benchmark Tabular Data to Knowledge Graph Matching Systems. In *European Semantic Web Conference (ESWC)*, pages 514–530. Springer, 2020.

[15] Girija Limaye et al. Annotating and searching web tables using entities, types and relationships. In *36th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB)*, pages 1338–1347, 2010.

[16] Jixiong Liu et al. From Tabular Data to Knowledge Graphs : A Survey of Semantic Table Interpretation Tasks and Methods. *To appear in the Journal of Web Semantics*, 2022.

[17] Varish Mulwad et al. Using linked data to interpret tables. In *1st International Workshop on Consuming Linked Data (COLD)*, 2010.

[18] Phuc Nguyen et al. SemTab 2021 : Tabular Data Annotation with MTab Tool. In *Semantic Web Challenge on Tabular Data to Knowledge Graph Matching (SemTab)*, 2021.

[19] Chenwei Ran et al. Domain-specific knowledge base enrichment using wikipedia tables. In *IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, pages 349–358, 2016.

Apports des méthodologies et techniques de développement logiciel pour l'ingénierie des ontologies: Retour d'expérience des contributions au développement de l'ontologie ETSI SAREF

Maxime Lefrançois[1], Raúl García-Castro[2], María Poveda-Villalón[2], Omar Qawasmeh[3]

[1] Mines Saint-Étienne, Univ Clermont Auvergne, INP Clermont Auvergne, CNRS, UMR 6158 LIMOS, F - 42023 Saint-Étienne France
[2] Open Engineering Group, Universidad Politécnica de Madrid, Spain
[3] Hybrid Intelligence, Capgemini Engineering, 69007 Lyon, France

maxime.lefrancois@emse.fr, rgarcia@fi.upm.es, mpoveda@fi.upm.es, omar.alqawasmeh@capgemini.com

Résumé

L'ingénierie logicielle a toujours eu une grande influence dans l'ingénierie des ontologies. Cet article a pour objectif d'identifier ces influences pour certains des grands thèmes de l'ingénierie logicielle moderne : 1. Ingénierie des besoins ; 2. Modèles de cycle de vie du développement logiciel ; 3. Modularisation ; 4. Patrons ; 5. Environnements de développement ; 6. Nommage des versions ; 7. Contrôle des versions et workflow d'édition ; 8. Automatisation ; 9. Intégration et déploiement continu. Pour chaque thème nous identifions des travaux du domaine de l'ingénierie des ontologies qui s'y rapportent, et apportons un retour d'expérience de notre travail de spécification du cadre de développement et du flux de travail de l'ontologie ETSI Smart Applications REFerence (SAREF), et développement du portail communautaire SAREF.

Mots-clés

Ingénierie logicielle, Agile, DevOps, Ingénierie des Ontologies, SAREF

Abstract

Software engineering has always had a strong influence in ontology engineering. This article aims to identify these influences for some of the major themes of modern software engineering : 1. Requirements engineering ; 2. Software development life cycle models ; 3. Modularization ; 4. Patterns ; 5. Development environments ; 6. Version naming ; 7. Version control and editing workflow ; 8. Automation ; 9. Continuous Integration and Deployment. For each theme we identify work in the field of ontology engineering that relates to it, and provide lessons learned from our work on the specification of the ETSI Smart Applications REFerence ontology (SAREF) development framework and workflow, and development of the Community SAREF Portal for user engagement

Keywords

Software Engineering, Agile, DevOps, Ontology Engineering, SAREF

1 Introduction

L'ontologie Smart Applications REFerence (SAREF) est constituée d'un ensemble modulaire d'ontologies versionnées. SAREF a été promue par la Commission européenne en collaboration avec l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) dans le but de disposer d'un modèle de données commun pour limiter la fragmentation de l'internet des objets (IoT). L'ontologie SAREF est développée au sein du comité technique SmartM2M de l'ETSI, et est destinée à permettre l'interopérabilité entre les solutions de différents fournisseurs et entre divers secteurs d'activité de l'IoT, contribuant ainsi au développement du marché numérique mondial. Dans cet article nous présentons des résultats du projet ETSI *Specialist Task Force* (STF) 578 récemment terminé, intitulé : "Spécification du cadre de développement et du flux de travail de SAREF, et développement du portail communautaire SAREF pour la participation des utilisateurs". Ce projet avait pour objectif de spécifier le cadre de développement de SAREF et le flux de travail pour accélérer le développement de SAREF et de ses extensions, et développer un logiciel qui sera utilisé pour automatiser la génération du contenu du portail de l'ontologie à partir des sources de SAREF sur la forge ETSI `https://saref.etsi.org/sources/` . La vision finale du projet est de faire en sorte que les industriels utilisateurs de SAREF soient capables d'apporter leur contribution à SAREF et de maintenir SAREF, sans nécessiter de compétences poussées en ingénierie des ontologies ni d'un soutien spécial de l'ETSI, mais juste avec une révision des membres de l'ETSI, et en particulier de SmartM2M.

L'ingénierie logicielle a toujours eu une grande influence dans l'ingénierie des ontologies. Cet article a pour objectif d'identifier ces influences pour certains des grands

©AFIA2022

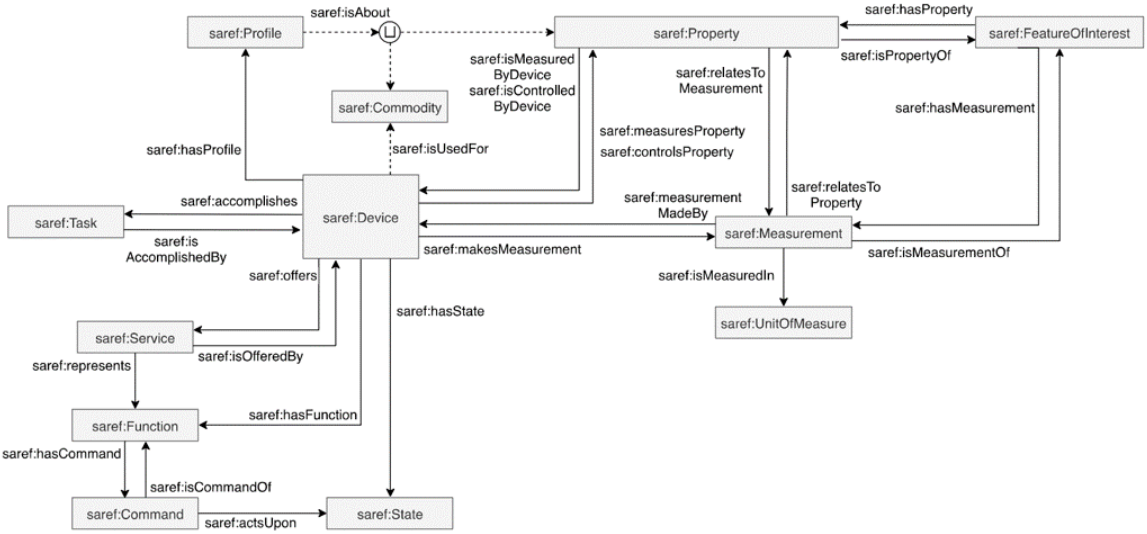


FIGURE 1 – Aperçu des concepts principaux de la version V3.1.1 du module SAREF Core (Source : [23])

thèmes de l'ingénierie logicielle moderne, et d'apporter un retour d'expérience de nos contributions au développement de l'ontologie ETSI SAREF. Nous identifions enfin des difficultés rencontrées ou des directions de travail futures possibles. Nous nous sommes appuyés sur des documents de référence dans le domaine de l'ingénierie logicielle pour sélectionner les thèmes abordés : le *Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOK) v3* [36], et le *Systems and Software Engineering Vocabulary (SEVOCAB)* [37]. Ainsi, nous aborderons les thèmes suivants séquentiellement dans cet article : 1. Ingénierie des besoins ; 2. Modèles de cycle de vie du développement logiciel ; 3. Modularisation ; 4. Patrons ; 5. Environnements de développement ; 6. Nommage des versions ; 7. Contrôle des versions et workflow d'édition ; 8. Automatisation ; 9. Intégration et déploiement continu. Il est à noter que de nombreux travaux démontrent les apports des ontologies pour différents sous-domaines de l'ingénierie logicielle, par exemple pour l'élicitation des besoins [40], cependant nous considérons ces travaux hors du cadre de cet article.

2 Ingénierie des besoins

L'ingénierie des besoins en ingénierie logicielle se rapporte à l'élicitation, l'analyse, la spécification, et la validation des besoins logiciels. Dès Grüninger et Fox en 1995 [32], On-To-Knowledge [61] en 2001, eXtreme ontology method [35] en 2002, les méthodologies d'ingénierie des ontologies comportent habituellement une phase de spécification des besoins sous forme de questions de compétences [64], sous une forme textuelle, de logique du premier ordre, ou sous forme d'une requête SPARQL. L'étude des techniques d'élicitation des connaissances pour dériver des questions de compétences a été étudiée par exemple par Rao et. al. [58]. Le concept de *Software Specification Document* a été transposé aux ontologies : le *Ontology Requirement Specification Document* [62]. La thèse récente de Alba Fernández Izquierdo [38] porte sur la spécification et l'évaluation automatique des besoins pour l'ingénierie des ontologies.

Dans le contexte du projet STF 578 de l'ETSI, nous recommandons la présence d'un document spécifiant les besoins pour tout projet d'ontologie SAREF [22, Clause 9], sous forme d'un document CSV avec trois colonnes : un identifiant, une catégorie, et un besoin exprimé sous forme d'une affirmation ou d'une question de compétences. Ces besoins sont ensuite évalués avec l'outil Themis [25].

3 Modèles de cycle de vie du développement logiciel

De nombreuses méthodologies d'ingénierie des ontologies ont été proposées au fil du temps, dont METHONTOLOGY [26], On-To-Knowledge [61], DILIGENT [54], le "Ontology Development 101" [50], NeOn [29]. Certaines transposent directement des méthodologies d'ingénierie logicielle, par exemple UPON Lite [10] est basé sur Rational Unified Process. Les récentes méthodologies s'inspirent toutes des principes d'ingénierie logicielle Agile. AMOD [1] et CD-OAM [63] sont basés sur SCRUM, XPOD [59] et eXtreme ontology method [35] sont basés sur eXtreme Programming, Lean Ontology Development (LOD) [9] s'inspire de l'approche Lean, SAMOD [53] se base sur les concepts de stories, itérations, et développement dirigé par les tests. Le développement des ontologies SAREF suit la méthodologie LOT [55], qui adopte une approche de type V-model avec des retours conditionnels à des étapes de développement amont.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais démontre que le domaine de l'ingénierie logicielle inspire et influence celui de l'ingénierie des ontologies. Il est donc pertinent de surveiller les évolutions du premier domaine pour continuer à améliorer le second.

4 Modularisation

La modularité est définie comme *le degré selon lequel un système ou un programme informatique est composé d'éléments distincts, de sorte que la modification d'un élément a un impact minimal sur les autres éléments* [37]. Une transposition aux ontologies et un premier algorithme de modularisation ont été proposés dans [31]. Le sujet intéresse la communauté, voir par exemple les séries de workshops WoMO (Workshop on Modular Ontologies, de 2006 à 2013) et WOMoCoE (Workshop on Ontology Modularity, Contextuality, and Evolution, de 2016 à 2020). Beaucoup d'ontologies sont aujourd'hui publiées sous forme de réseau d'ontologies, composé de modules faiblement dépendants qui utilisent le mécanisme d'import de OWL [48, Sec. 3.4]. Une ontologie noyau n'importe aucune autre ontologie du réseau, des ontologies périphériques importent l'ontologie noyau et potentiellement d'autres ontologies périphériques, enfin des modules d'alignement importent au moins une ontologie du réseau et une ontologie externe.

Comme illustré sur la figure 2, la suite d'ontologies ETSI SAREF est composée d'ontologies définissant des patrons génériques comme SAREF4SYST [21], d'une ontologie noyau SAREF Core [23] illustrée dans la figure 1, et de différentes extensions développées pour des domaines verticaux distincts : SAREF4ENER pour l'energie [12], SAREF4ENVI pour l'environement [14], SAREF4BLDG pour les bâtiments intelligents [14], SAREF4CITY pour les villes intelligentes [15], SAREF4INMA pour les l'industrie manufacturière [16], SAREF4AGRI pour l'agriculture [17], SAREF4AUTO pour l'automobile [18], SAREF4EHAW pour la e-santé et le bon vieillissement [19], SAREF4WEAR pour les wearables [20], SAREF4WATR pour la gestion de l'eau [13], SAREF4LIFT pour les ascenseurs intelligents [24].

Deux choix de conception sont récurrents dans ces réseaux d'ontologies : (1) la définition des espaces de noms pour chaque module, et (2) le choix du module dans lequel un terme est défini. Choisir un espace de nom distinct pour chaque module permet d'identifier facilement de quel module un terme est issu. Cela simplifie également la publication des ontologies dans le respect de la bonne pratique qui consiste à rendre une description de chaque terme accessible à son IRI (des IRI de type hash '#' peuvent être utilisées). Cependant, cette approche pose trois problèmes :

Premièrement, il est parfois difficile en tant qu'utilisateur de ces ontologies, de se souvenir quel est l'espace de nom pour chaque concept. Nous avons par exemple une variété de sous-classes de saref:Property réparties dans les espaces de noms des différentes extensions, selon là où on a eu besoin de les définir en premier : saref:Temperature, saref:Humidity, saref:Power, s4ener:Power, s4ener:PowerMax, s4ener:PowerStandardDeviation, s4inma:Size, saref:Light, s4envi:LightProperty, ainsi que les instances de saref:Property suivantes : s4envi:Frequency, s4wear:SoundLevel, s4wear:BatteryRemainingTime, s4watr:Conductivity, s4wear:Temperature. Une approche alternative aurait consisté à utiliser un espace de nom unique et des IRIs de type slash '/', et implémenter des redirections de l'IRI de chaque terme vers le document qui décrit l'ontologie où il est défini.

Deuxièmement, l'expérience montre qu'il peut être pertinent de déplacer un terme d'un module vers un autre. Par exemple SAREF4CITY V1.1.1 a introduit le concept de s4city:FeatureOfInterest, et il a été décidé lors du développement de SAREF Core V3.1.1 que ce concept devait être déplacé dans l'ontologie noyau. Il est donc maintenant identifié par saref:FeatureOfInterest, et les implémentations de SAREF4CITY ont dû être modifiées. Ce problème ne se serait pas posé si une approche basée sur un espace de nom unique et des IRIs de type slash avait été adoptée.

Enfin, ce que montre la liste des classes et instances de saref:Property, c'est qu'au sein même de la communauté des développeurs de SAREF, des choix de modélisation et de nommage sont parfois variés. Il nous apparaîtrait donc important de re-baser le développement de SAREF sur des patrons d'ontologies pour harmoniser son développement.

5 Patrons

En ingénierie logicielle, un patron est défini comme une *spécification abstraite d'une composition d'objets qui fait que toute instance de la composition possède une propriété donnée.* [37]. Le concept a été transposé à l'ingénierie des ontologies avec les *Ontology Design Patterns* [27, 6, 28]. C'est le sujet par exemple de l'état de l'art [7].

Un des livrables du projet STF 556 de l'ETSI est le rapport technique TR 103 549 nommé "Consolidation de SAREF et de sa communauté d'utilisateurs industriels, sur la base de l'expérience du projet EUREKA ITEA 12004 SEAS". Ce rapport identifie les patrons implicitement existant dans SAREF, et qu'il pourrait convenir de formaliser pour aboutir à une version consolidée de l'ontologie SAREF [11]. Par exemple dans la version V2.1.1 de SAREF Core, les fonctions de détection, d'actionnement et de mesure sont des types de fonctions. Habituellement, une fonction (par exemple saref:StartStopFunction) a une ou plusieurs commandes pour la déclencher (par exemple, pour saref:StartStopFuncton, ce devrait être soit une saref:StartCommand soit une saref:StopCommand). Certaines commandes agissent sur certains états (saref:StartStopCommand agit sur un certain saref:StartStopState). Il conviendrait par exemple de s'assurer que toutes les sous-classes de la classe saref:Command soient décrites de la même manière. Par exemple, des sous-classes de saref:Command avaient des instances génériques, associées à aucune réelle action. SAREF avait aussi une commande nommée saref:PauseCommand, qui n'était associée à aucune fonction.

Des patrons peuvent être instanciés avec les éléments pris dans un ou plusieurs dimensions orthogonales. Par exemple, SAREF4ENER définit s4ener:EnergyMax, s4ener:EnergyMin, s4ener:EnergyExpected, s4ener:EnergyStandardDeviation, s4ener:PowerMax, s4ener:PowerMin, s4ener:PowerExpected, s4ener:PowerStandardDeviation. Gérer manuellement l'ajout par exemple d'un

©AFIA2022

nouveau type d'agrégat *Average* implique de créer de nombreuses propriétés, comme s4ener:EnergyAverage, s4ener:PowerAverage.
Une solution partielle à ce problème consiste à découpler les dimensions. Dans l'exemple ci-dessus : le type de propriété, et le type d'agrégat. Dans les ontologies SEAS [45] nous avons proposé une modélisation qui vise à éviter ces situations, en découplant les dimensions. Une entité d'intérêt est liée à une seule instance de la classe seas:Property par le biais d'une relation qui serait nommée seas:hasElectricConsumption par exemple. Cette instance de propriété peut alors être d'un type générique seas:PowerProperty, et des évaluations de cette propriété peuvent être définies et multi-typées. Par exemple seas:Evaluation, seas:MinEvaluation, seas:AverageEvaluation, seas:SumEvaluation.
De plus, vouloir modifier généralement comment sont décrites les sous-classes d'une classe principale comme saref:Property peut s'avérer fastidieux, car chaque instance du patron doit être revue manuellement. Parmi les travaux récents qui permettent d'automatiser la génération des ontologies à partir de patrons et de description des instances, on peut citer le système *Reasonable Ontology Template* OTTR [1] [60], *Generic Ontology Design Patterns* [43, 44], ou *Dead Simple OWL Design Patterns* (DOS-DPs) [52]. OTTR permet de déclarer des patrons d'ontologie, et de générer automatiquement des instances de ces patrons à partir d'un document externe, par exemple un document Excel écrit par les experts de domaine.
L'ontologie SAREF4SYST [21], illustrée sur la figure 3 et inspirée de SEAS, est la première ontologie de patron incorporée à SAREF. Elle définit un modèle d'ontologie qui peut être instancié pour différents domaines. SAREF4SYST définit les systèmes, les connexions entre les systèmes et les points de connexion auxquels les systèmes peuvent être connectés. Ces concepts de base peuvent être utilisés de manière générique pour définir la topologie des entités d'intérêt, et peuvent être spécialisés pour de multiples domaines. Par exemple, pour décrire des zones à l'intérieur d'un bâtiment (systèmes), qui partagent une frontière (connexions). Les propriétés des systèmes sont généralement des variables d'état (par exemple, la population des agents, la température), tandis que les propriétés des connexions sont généralement des flux (par exemple, le flux de chaleur). SAREF4SYST a deux objectifs principaux : d'une part, étendre SAREF avec la capacité de représenter la topologie générale des systèmes et comment ils sont connectés ou interagissent et, d'autre part, illustrer comment les patrons d'ontologie peuvent aider à assurer une structure homogène de l'ontologie SAREF globale et accélérer le développement d'extensions.

1. https://ottr.xyz/

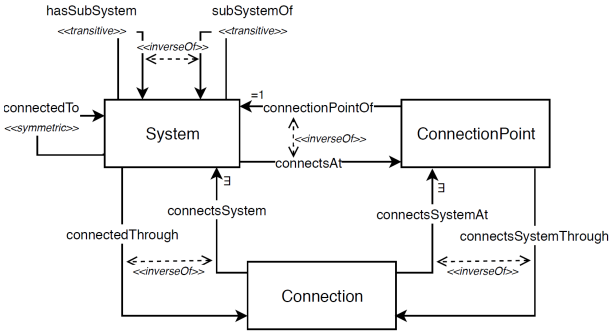


FIGURE 3 – Aperçu du patron d'ontologie SAREF4SYST (Source : [21])

6 Environnement de développement

Différents logiciels spécialisés existent pour l'édition des ontologies [2], Stanford Protégé [49] étant probablement le plus connu et utilisé. Des logiciels professionnels existent comme TopBraid Enterprise Vocabulary Net [2] par exemple, qui est une extension de l'environnement de développement intégré Apache Eclipse.

Pour l'édition du code source avec la syntaxe Turtle 1.1 par exemple, des plugins commencent à fleurir pour la plupart des éditeurs de texte multi-langage. Par exemple le plugin *Linked Data syntaxes* [3] pour Sublime Text [4], ou l'extension

2. https://www.topquadrant.com/the-topbraid-evn-ontology-editor/
3. https://github.com/blake-regalia/linked-data.syntaxes
4. https://www.sublimetext.com/

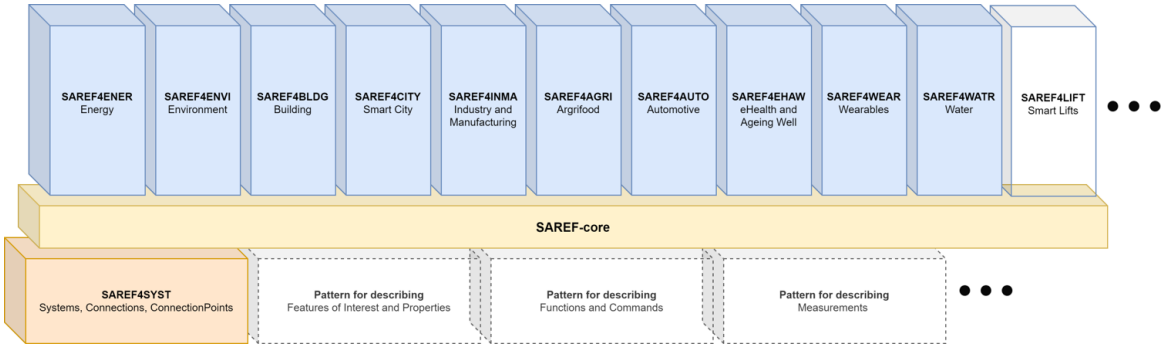


FIGURE 2 – L'ontologie SAREF et ses différents modules

Stardog RDF Grammars [5] pour Visual Studio Code [6]. Ces extensions permettent la coloration syntaxique des fichiers RDF, et ainsi d'identifier rapidement des erreurs de syntaxe. Des fonctionnalités supplémentaires peuvent être attendues d'un environnement de développement intégré d'ontologies. Nous avons *forké* par exemple le plugin *Linked Data syntaxes* pour implémenter l'exécution de règles SPARQL-Generate [46] avec la combinaison de touche CTRL+B [7]. Un récent projet de nos étudiants [8] consistait à implémenter une fonctionnalité de navigation dans des projets contenant de nombreux fichiers RDF : un contrôle-clic sur un terme RDF permet de naviger vers là où est défini le terme en question : soit un fichier local, soit une URL dans le navigateur. Lorsque l'on écrit une IRI préfixée, le système peut également vérifier que le préfixe est déclaré, et éventuellement insérer automatiquement le nouveau préfixe dans l'entête si il est connu de la base de données `prefix.cc` [9].

Le *Linting*, dont le nom vient d'une commande UNIX de pré-processeur pour le langage C, est une approche qui consiste à analyser statiquement le code source d'un logiciel pour détecter des erreurs, bugs, ou erreurs de style. Développer un *linter* pour supporter le processus d'édition des ontologies permettrait de limiter la difficulté d'éditer des ontologies de qualité. Par exemple avec Jena Eyeball, [10], ou RDFLint [11]. Ce dernier est intégré dans l'extension *RDF language support via rdflint* [12] de Visual Studio Code, et permet entre autre d'exécuter des requêtes SPARQL, de valider des contraintes SHACL, ou de valider que les littéraux sont bien formés. Bien que le développement de tels outils soit difficile à valoriser d'un point de vue de la recherche, ils nous semblent extrêmement importants pour contribuer à abaisser le niveau de compétence nécessaire pour développer des ontologies d'une bonne qualité.

7 Nommage des versions

Les ontologie sont amenées à évoluer, pendant le travail de développement potentiellement collaboratif, mais également après une première publication si des évolutions sont nécessaires. Différentes pratiques de nommage des versions existent pour les logiciels, les plus connus étant le *Semantic Versioning* [13] et le *Calendar Versioning* [14]. Une transposition de semver aux ontologies a été proposée [65], et est assez communément utilisé aujourd'hui.

Le langage OWL définit deux types d'identifiants pour les ontologies : un identifiant de série d'ontologie (l'instance de owl:Ontology), et l'identifiant de version d'ontologie (l'objet de la métadonnée owl:versionIRI) [48, Sec. 3.3]. Les utilisateurs peuvent alors choisir d'importer une ontologie par son identifiant de série et ainsi suivre les évolutions de l'ontologie, ou son identifiant de version et s'assurer que rien ne cassera en cas d'évolution non rétrocompatible.

Une erreur de conception commune même à certaines ontologies du W3C consiste à inclure l'identifiant de version, ou la date de publication dans l'identifiant de série d'ontologie. Par exemple, QUDT V1.1 avait l'identifiant `http://qudt.org/1.1/schema/qudt#` (corrigé depuis la version 2). Les identifiants de RDF, RDFS, et OWL, contiennent respectivement `1999/02/22`, `2000/01`, et `2002/07`. Il n'est dans ce cas possible de conserver l'identifiant pour la version suivante de l'ontologie sans créer une incohérence. RDFS 1.1 publié en 2014 conserve l'année 2000 dans son identifiant.

L'évolution d'une ontologie peut avoir différents impacts sur les artefacts (ontologies, bases de connaissances, logiciels) qui l'utilisent. Dans sa thèse, Omar Alqawasmeh [5, 57] étudie ces différents problèmes et propose des contremesures. Une recommandation adoptée dans le travail de développement des ontologies SAREF est par exemple de s'assurer que l'on importe des ontologies par leur IRI de version, et non pas par l'identifiant de série d'ontologie. Par exemple, SAREF4LIFT V1.1.1 importe SAREF Core V3.1.1, SAREF4SYST V1.1.2, et SAREF4BLDG V1.1.2.

Avec SAREF, nous allons plus loin dans l'adoption du *Semantic Versioning*. Chaque module de l'ontologie possède une version distincte, composée de trois numéros : un *MAJOR*, un *Minor*, et un *patch*. L'incrémentation du *MAJOR* indique une coupure de la rétrocompatibilité. L'incrémentation du *Minor* indique l'ajout de fonctionnalités. L'incrémentation du *patch* indique la correction d'un bug. On pourrait donc importer un module SAREF, par exemple SAREF Core, avec différentes IRI, exprimant différents choix : 1. `https://saref.etsi.org/core/` redirigera vers la dernière version Vx.y.z 2. `https://saref.etsi.org/core/v3` redirigera vers la dernière version V3.y.z 3. `https://saref.etsi.org/core/v3.1` redirigera vers la dernière version V3.1.z . On pourrait également proposer un schéma général d'IRI, s'appuyant sur l'expression d'une spécification de version comme le *Maven Dependency Version Range* [15] pour Java, ou PEP440 [16] pour Python.

8 Contrôle des versions et workflow d'édition

Le logiciel de gestion de versions distribuées git s'est rapidement imposé dans l'édition collaborative de logiciels, et les plateformes de type GitHub ou Gitlab ont démocratisé différents flux opérationnels (*workflows*) basés sur

5. `https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=stardog-union.stardog-rdf-grammars`
6. `https://visualstudio.microsoft.com/`
7. `https://w3id.org/sparql-generate/sublime.html`
8. `https://github.com/clement000/linked-data.syntaxes`
9. `https://prefix.cc/`
10. `https://jena.apache.org/documentation/archive/eyeball/eyeball-manual.html`
11. `https://github.com/imas/rdflint`
12. `https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=takemikami.vscode-rdflint`
13. `https://semver.org`
14. `https://calver.org`
15. `https://cwiki.apache.org/confluence/display/MAVENOLD/Dependency+Mediation+and+Conflict+Resolution`
16. `https://peps.python.org/pep-0440/#version-specifiers`

©AFIA2022

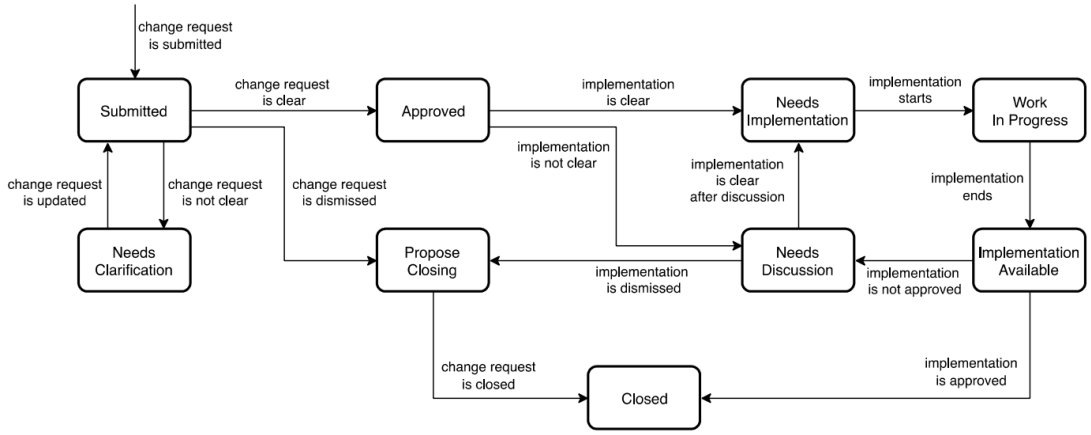


FIGURE 4 – Exemple du flux opérationnel pour l'édition d'une version de SAREF (Source : [22])

les branches (fonctionnalité offerte par git), les forks, tickets, jalons, et requêtes de fusion (*pull request* pour Github, *merge request* pour Gitlab).

Des retours d'expérience de workflows sur Github et identification des meilleures pratiques commencent à être publiés [8, 3]. Pour l'édition des ontologies SAREF, nous utilisons le portail publique ETSI Forge `https://saref.etsi.org/sources/`, et avons publié une spécification technique établissant différents flots de travail pour (1) la création d'une version d'ontologie, (2) le développement d'une version d'ontologie, (3) la publication d'un projet [22, Clauses 6.1, 7.1, 8.1]. Nous utilisons quatre type de branches : des branches `issue-x` pour le travail sur un ticket, des branches `develop-vx.y.z` pour le travail sur une version, des branches `prerelease-vx.y.z` pour le travail de validation final de l'ontologie, et des branches `release-vx.y.z` pour les versions publiées. Des règles de protection sont définies pour interdire aux développeurs d'une ontologie de pousser directement des changements sur les branches `develop-vx.y.z`, ou d'accepter directement des *merge request* sur les branche `prerelease-vx.y.z`. Les tickets sont disponibles à l'adresse `https://labs.etsi.org/rep/groups/saref/-/issues`.

Agec git, une version d'un logiciel, nommé *commit*, contient zéro ou plusieurs *commit* parent, la liste des fichiers modifiés dans ce commit, les versions compressées des nouvelles versions de ces fichiers, et d'autres métadonnées comme la date et l'identifiant de l'auteur du *commit*. Instaurer l'état d'un logiciel pour un commit donné consiste donc à parcourir l'arbre de ses ancêtres, et décompresser pour chaque commit ancêtre les fichiers qui n'ont pas été modifiés ultérieurement.

Git peut se baser sur différents algorithmes de calcul des différences entre fichiers texte (*diff*), défini par la variable `diff.algorithm`. Pour l'édition des ontologies, ceci pose un problème car les éditeurs spécialisés peuvent complètement transformer la sérialisation d'une ontologie, puisque chacun se base sur une librairie de sérialisation différente (Apache RIOT pour Protégé, RDF4J RIO pour Topbraid-Composer). En pratique, cela rend très difficile l'évaluation des changements implémentés lorsqu'il faut valider une Pull Request, puisque tout semble avoir été changé.

Il serait théoriquement possible de modifier l'algorithme qu'utilise git pour la détection de différences entre deux versions, par exemple pour Promptdiff [51], Ecco [30], ou OWLDiff [42]. Cependant il faudrait que le serveur GitHub ou GitLab puisse utiliser le même algorithme pour visualiser le résultat du *diff*. Une approche alternative proposée par exemple dans [33] consiste à utiliser les crochets *hooks* [17], qui s'assurent que le même outil de serialisation est utilisé avant chaque commit.

Deux pratiques principales existent pour identifier des versions de logiciels avec git : les étiquette (*tag*) de version, et les branches de sortie (*release branch*). Le développement des ontologies SAREF utilise cette deuxième approche, qui permet de continuer à faire évoluer la documentation ou les exemples même lorsque l'on fige une ontologie.

9 Automatisation

L'automatisation est un sujet majeur en développement logiciel et a pour objectif d'accélérer la production et la qualité des logiciels, éviter les tâches redondantes, et limiter les mauvaises versions de logiciels. Différentes tâches peuvent être automatisées en ingénierie des ontologies, par exemple avec les outils de *linting* présentés dans la section 6, ou l'interface en ligne de commande disponible dans des frameworks comme Apache Jena [18]. L'outil ROBOT développé par la communauté OBO [39] permet d'exécuter automatiquement un certain nombre de tâches pour convertir, raisonner, importer, extraire des modules, filtrer des axiomes, requêter ou vérifier la bonne exécution de requêtes SPARQL pour évaluer des tests unitaires, générer un rapport d'erreurs, réparer si possible, instancier des patrons, et assembler ces tâches dans des workflows.

Pour les projets de développement d'ontologies qui utilisent

17. `https://git-scm.com/book/fr/v2/Personnalisation-de-Git-Crochets-Git`
18. `https://jena.apache.org/documentation/tools/index.html`

git, il est possible d'extraire automatiquement des informations à injecter dans les métadonnées de l'ontologie. Par exemple les trois commandes suivantes trouvent pour une ontologie `onto.ttl` : 1. la date de premier commit, ce qui peut permettre de renseigner la propriété dct:created, 2. la date de dernière modification (propriété dct:modified), 3. les auteurs classés par ordre décroissant de nombre de modifications (propriété owl:contributor).

```
git log --diff-filter=A --format='%ad' --date=short -- onto.ttl
git log -1 --format='%ad' --date=short -- onto.ttl
git log -- onto.ttl | grep Author | sort | uniq -c | sort -n -r
```

Dans le projet STF 578, nous avons spécifié un ensemble de règles auxquelles un dépôt d'ontologie SAREF doit se conformer dans la spécification technique ETSI TS 103 673 [22, Clause 9], et avons développé l'application SAREF Pipeline qui permet d'évaluer chacune de ces règles avec un niveau d'exigence. voici une liste non exhaustive des points évalués : (a) Structure du répertoire de dépôt, (b) présence d'un fichier de licence défini, (c) spécification des besoins de l'ontologie, (d) présence d'un fichier `/saref4[a-z]{4}.ttl/` bien formé, (e) déclaration de préfixes conformes, (f) présence d'une déclaration d'ontologie, avec une IRI de série et une IRI de version conformes au nommage de la branche git (ex : `develop-v2.1.1`, (g) imports éventuels d'autres ontologies SAREF par leur IRI de version, (h) présence des créateurs et contributeurs, (i) convention de nommage pour les classes, propriétés, instances, (j) présence de métadonnées pour les termes, (k) l'ontologie doit être OWL 2 DL, (l) l'ontologie doit être consistante, (m) chaque classe doit être satisfiable (n) aucun pitfall détecté par OOPS ! [56], (o) présence de tests, (p) présence et qualité des exemples, (q) existence des termes utilisés.

Certains de ces tests utilisent des shapes SHACL [41], d'autres les fonctionnalités de OWLAPI après avoir cloné les dépôts nécessaires. Le dossier des messages de l'application donne une vue globale de toutes les erreurs qui peuvent être identifiées [19]. Cette application peut être utilisée avec une interface graphique (figure 5) ou en ligne de commande (figure 6). Le rapport d'erreur est formatté en markdown, ce qui permet d'ouvrir rapidement un ticket pour traiter le problème collaborativement (figure 7). Finalement, l'application génère différentes sérialisations pour les ontologies et les exemples, et une documentation HTML inspirée de LODE et réécrite avec SPARQL-Generate [46]. Voir par exemple `https://saref.etsi.org/core` ou `https://saref.etsi.org/core/Command`.

Cette application est monolithique et peut difficilement être réutilisée pour d'autres projets d'ingénierie d'ontologie. Nous travaillons sur des améliorations pour les tâches d'ingénierie des ontologies pour les projets ANR HyperAgents (ANR-19-CE23-0030-01) et ANR CoSWoT (ANR-19-CE23-0012-04).

19. `https://labs.etsi.org/rep/saref/saref-pipeline/-/tree/master/src/main/resources/messages`

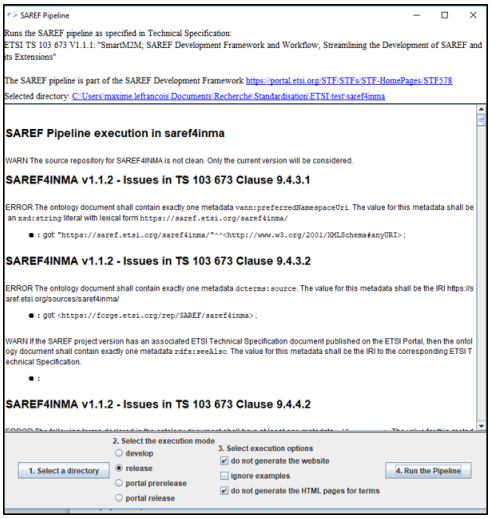


FIGURE 5 – Exécution du pipeline SAREF avec l'interface graphique `https://saref.etsi.org/sources/saref-pipeline/`

```
saref-pipeline/target$ java -jar saref-pipeline.jar
usage: java -jar saref-pipeline.jar <mode> [<options>] [<target>]

Runs the SAREF pipeline as specified in Technical Specification:
  ETSI TS 103 673 V1.1.1: "SmartM2M; SAREF Development Framework and
            Workflow, Streamlining the Development of SAREF and its
            Extensions"

<mode> can take the following values:
  develop    Run the SAREF pipeline in relax mode in the target SAREF
             project
  release    Run the SAREF pipeline in strict mode in the target SAREF
             project
  prerelease-portal    Operate a strict check and generate the portal for
             pre-release or release branches of each source in the
             configuration file `.saref-repositories.yml`
  release-portal    Operate a strict check generate the portal for release
             branches of each source in the configuration file
             `.saref-repositories.yml`
  clean      Remove all files generated by the previous executions
  help       Displays this message

<target> points to the target directory. By default, target is the current
             directory.

<options> can take the following values:
 -e,--no-examples   Do not check examples
 -s,--no-site       Do not generate the static portal
 -t,--no-terms      Do not generate the static portal for terms
```

FIGURE 6 – Exécution du pipeline SAREF en ligne de commande `https://saref.etsi.org/sources/saref-pipeline/`

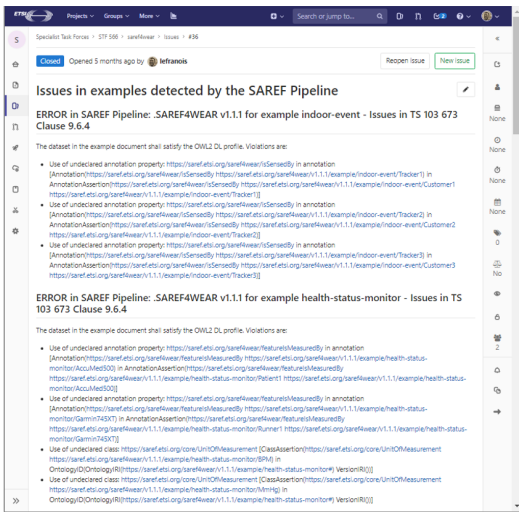


FIGURE 7 – La sortie du pipeline SAREF est formatée en markdown et peut être utilisée pour créer un ticket

©AFIA2022

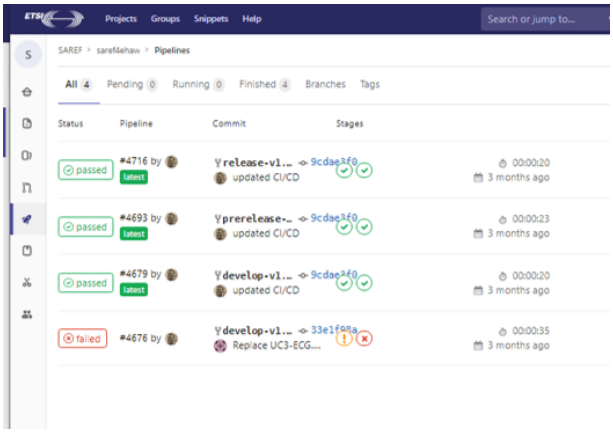


FIGURE 8 – Aperçu des pipeline d'intégration et de déploiement continu : *Snapshot*, *Staging*, *Manual release*. Source : `https://saref.etsi.org/sources/saref4ehaw/-/pipelines`

10 Intégration et deploiement continu

A l'instar des méthodes Agile qui visent à améliorer les collaborations entre les clients d'un projet logiciel et les développeurs, les méthodes DevOps améliorent les collaborations entre les développeurs et les professionnels des opérations informatiques. Jenkins [20], Travis CI [21], Circle CI [22], Gitlab CI/CD [23], Github Actions [24], sont tous des frameworks qui permettent de spécifier des pipelines de tâches qui seront exécutés automatiquement lorsque par exemple un commit est poussé sur le serveur. Avant la démocratisation de ces frameworks, quelques approches préliminaires ont été proposées dans la communauté de l'ingénierie des ontologies en utilisant les applications Github [25]. Par exemple VoCol [34] ou OnToology [4]. *Ontology Development Kit* (ODK) [47] utilise Travis CI pour exécuter des workflows avec ROBOT.
Dans le projet STF 578, nous avons configuré Gitlab CI/CD dans chaque dépôt des ontologies SAREF, pour qu'il exécute le pipeline SAREF différemment selon le type de branche où est poussé un commit (issue, develop, prerelease, release), et pousse finalement automatiquement les fichiers de sortie vers le portail de documentation de SAREF `https://saref.etsi.org/`. La figure 8 illustre l'exécution automatique des pipelines SAREF.

11 Conclusion

Dans cet article nous avons montré que les méthodologies et techniques de développement logiciel ont eu des répercussions importantes en ingénierie de l'ontologie, au moins pour les neuf thématiques identifiées. Nous avons illustré comment le framework de développement et de publication de l'ontologie ETSI SAREF a été spécifié pour tirer partie des dernières méthodologies et techniques disponibles. Nous appliquons et améliorons actuellement ces travaux dans les tâches d'ingénierie des ontologies pour les projets ANR HyperAgents (ANR-19-CE23-0030-01) et ANR CoSWoT (ANR-19-CE23-0012-04)

20. `https://www.jenkins.io/`
21. `https://travis-ci.org/`
22. `https://circleci.com/`
23. `https://docs.gitlab.com/ee/ci/`
24. `https://github.com/features/actions`
25. `https://docs.github.com/en/developers/apps`

Références

[1] Abdelghany Salah Abdelghany, Nagy Ramadan Darwish, and Hesham Ahmed Hefni. An agile methodology for ontology development. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 12(2) :170–181, 2019.

[2] Emhimed Salem Alatrish. Comparison of ontology editors. *eRAF Journal on Computing*, 4 :23–38, 2012.

[3] Dean Allemang, Pawel Garbacz, Przemyslaw Gradzki, Elisa Kendall, and Robert Trypuz. An infrastructure for collaborative ontology development, lessons learned from developing the financial industry business ontology (FIBO). In *Formal Ontology in Information Systems*. IOS Press, 2022.

[4] Ahmad Alobaid, Daniel Garijo, María Poveda-Villalón, Idafen Santana-Perez, Alba Fernández-Izquierdo, and Oscar Corcho. Automating ontology engineering support activities with ontoology. *Journal of Web Semantics*, 57 :100472, 2019.

[5] Omar Alqawasmeh. *Towards a collaborative framework for ontology engineering : Impact on ontology evolution and pitfalls in ontology networks and versioned ontologies*. Theses, Université de Lyon, September 2020.

[6] Eva Blomqvist and Kurt Sandkuhl. Patterns in ontology engineering : Classification of ontology patterns. In *International Conference on Enterprise Information System*, pages 413–416, 2005.

[7] Giuseppe Cota, Marlena Daquino, and Gian Luca Pozzato. *Applications and Practices in Ontology Design, Extraction, and Reasoning*, volume 49. IOS Press, 2020.

[8] Robert Crystal-Ornelas, Charuleka Varadharajan, Ben Bond-Lamberty, Kristin Boye, Madison Burrus, Shreyas Cholia, Michael Crow, Joan Damerow, Ranjeet Devarakonda, Kim S Ely, et al. A guide to using github for developing and versioning data standards and reporting formats. *Earth and Space Science*, 8(8), 2021.

[9] Joel Cummings and Deborah Stacey. Lean ontology development : An ontology development paradigm based on continuous innovation. In *Knowledge Engineering and Ontology Development*, pages 365–372, 2018.

[10] Antonio De Nicola and Michele Missikoff. A lightweight methodology for rapid ontology engineering. *Communications of the ACM*, 59(3) :79–86, 2016.

[11] ETSI. SmartM2M ; Guidelines for consolidating SAREF with new reference ontology patterns, based on the experience from the ITEA SEAS project. ETSI Technical Report 103 549 V1.1.1., 07 2019.

[12] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 1 : Energy Domain. ETSI Technical Specification 103 410-1 V1.1.2., 05 2020.

[13] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 10 : Water Domain. ETSI Technical Specification 103 410-10 V1.1.1., 07 2020.

[14] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 2 : Environment Domain. ETSI Technical Specification 103 410-2 V1.1.2., 05 2020.

[15] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 4 : Smart Cities Domain. ETSI Technical Specification 103 410-4 V1.1.2., 05 2020.

[16] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 5 : Industry and Manufacturing Domain. ETSI Technical Specification 103 410-5 V1.1.2., 05 2020.

[17] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 6 : Smart Agriculture and Food Chain Domains. ETSI Technical Specification 103 410-6 V1.1.2., 05 2020.

[18] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 7 : Automotive Domain. ETSI Technical Specification 103 410-7 V1.1.1., 07 2020.

[19] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 8 : eHealth/Ageing-well Domain. ETSI Technical Specification 103 410-8 V1.1.1., 07 2020.

[20] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 9 : Wearables Domain. ETSI Technical Specification 103 410-9 V1.1.1., 07 2020.

[21] ETSI. SmartM2M ; SAREF consolidation with new reference ontology patterns, based on the experience from the SEAS project. ETSI Technical Specification 103 548 V1.1.2., 06 2020.

[22] ETSI. SmartM2M ; SAREF Development Framework and Workflow, Streamlining the Development of SAREF and its Extensions. ETSI Technical Specification 103 673 V1.1.1., 2020.

[23] ETSI. SmartM2M ; Smart Applications ; Reference Ontology and oneM2M Mapping. ETSI Technical Specification 103 264 V3.1.1., 02 2020.

[24] ETSI. SmartM2M ; Extension to SAREF ; Part 11 : Lift Domain. ETSI Technical Specification 103 410-11 V1.1.1., 07 2021.

[25] Alba Fernández-Izquierdo and Raúl García-Castro. Themis : a tool for validating ontologies through requirements. In *Software Engineering and Knowledge Engineering*, pages 573–753, 2019.

[26] Mariano Fernández-López, Asunción Gómez-Pérez, and Natalia Juristo. Methontology : from ontological art towards ontological engineering. 1997.

[27] Aldo Gangemi. Ontology design patterns for semantic web content. In *International semantic web conference*, pages 262–276. Springer, 2005.

[28] Aldo Gangemi and Valentina Presutti. Ontology design patterns. In *Handbook on ontologies*, pages 221–243. Springer, 2009.

[29] Asunción Gómez-Pérez and Mari Carmen Suárez-Figueroa. Neon methodology : scenarios for building networks of ontologies. In *16th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management Knowledge Patterns (EKAW 2008). Conference Poster*, 2008.

[30] Rafael S Gonçalves, Bijan Parsia, and Ulrike Sattler. Ecco : A hybrid diff tool for owl 2 ontologies. In *OWLED*, volume 849. Citeseer, 2012.

[31] Bernardo Cuenca Grau, Bijan Parsia, Evren Sirin, and Aditya Kalyanpur. Modularity and web ontologies. In *Knowledge Representation*, pages 198–209, 2006.

[32] Michael Grüninger and Mark S Fox. Methodology for the design and evaluation of ontologies. 1995.

[33] Lavdim Halilaj, Irlán Grangel-González, Maria-Esther Vidal, Steffen Lohmann, and Sören Auer. Proactive prevention of false-positive conflicts in distributed ontology development. In *Knowledge Engineering and Ontology Development*, pages 43–51, 2016.

[34] Lavdim Halilaj, Niklas Petersen, Irlán Grangel-González, Christoph Lange, Sören Auer, Gökhan Coskun, and Steffen Lohmann. Vocol : An integrated environment to support version-controlled vocabulary development. In *European Knowledge Acquisition Workshop*, pages 303–319. Springer, 2016.

[35] Maia Hristozova and Leon Sterling. An extreme method for developing lightweight ontologies. In *In Workshop on Ontologies in Agent Systems, 1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Citeseer, 2002.

[36] IEEE. *Guide to the Software engineering body of knowledge v3.0*. IEEE Computer society, 2014.

[37] ISO/IEC/IEEE. Systems and software engineering — vocabulary. Standard ISO/IEC/IEEE 24765:2017, 2017.

[38] Alba Fernández Izquierdo. Ontology verification based on lexico-syntactic patterns, November 2020.

[39] Rebecca C Jackson, James P Balhoff, Eric Douglass, Nomi L Harris, Christopher J Mungall, and James A Overton. Robot : a tool for automating ontology workflows. *BMC bioinformatics*, 20(1) :1–10, 2019.

[40] Haruhiko Kaiya and Motoshi Saeki. Using domain ontology as domain knowledge for requirements elicitation. In *14th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'06)*, pages 189–198. IEEE, 2006.

[41] Holger Knublauch and Dimitris Kontokostas. Shapes Constraint Language (SHACL). W3C Recommendation, W3C, July 20 2017.

 ©AFIA2022

[42] Petr Kremen, Marek Smid, and Zdenek Kouba. Owldiff : A practical tool for comparison and merge of owl ontologies. In *2011 22nd International Workshop on Database and Expert Systems Applications*, pages 229–233. IEEE, 2011.

[43] Bernd Krieg-Brückner and Till Mossakowski. Generic ontologies and generic ontology design patterns. In *WOP@ ISWC*, 2017.

[44] Bernd Krieg-Brückner, Till Mossakowski, and Mihai Codescu. Generic ontology design patterns : Roles and change over time. *Advances in Pattern-Based Ontology Engineering*, 51 :25, 2021.

[45] Maxime Lefrançois. Planned ETSI SAREF extensions based on the W3C&OGC SOSA/SSN-compatible SEAS ontology paaerns. In *Workshop on semantic interoperability and standardization in the IoT, SIS-IoT*, page 11p, 2017.

[46] Maxime Lefrançois, Antoine Zimmermann, and Noorani Bakerally. A SPARQL extension for generating RDF from heterogeneous formats. In *European Semantic Web Conference*, pages 35–50. Springer, 2017.

[47] Nicolas Matentzoglu, Chris Mungall, and Damien Goutte-Gattat. Ontology development kit, July 2021. If you use this software, please cite it as below.

[48] Boris Motik, Peter F Patel-Schneider, Bijan Parsia, Conrad Bock, Achille Fokoue, Peter Haase, Rinke Hoekstra, Ian Horrocks, Alan Ruttenberg, Uli Sattler, et al. Owl 2 web ontology language : Structural specification and functional-style syntax. W3c recommendation, W3C, 2009.

[49] Mark A Musen. The protégé project : a look back and a look forward. *AI matters*, 1(4) :4–12, 2015.

[50] Natalya F Noy, Deborah L McGuinness, et al. Ontology development 101 : A guide to creating your first ontology, 2001.

[51] Natalya Fridman Noy, Mark A Musen, et al. Promptdiff : A fixed-point algorithm for comparing ontology versions. *AAAI/IAAI*, 2002 :744–750, 2002.

[52] David Osumi-Sutherland, Melanie Courtot, James P Balhoff, and Christopher Mungall. Dead simple owl design patterns. *Journal of biomedical semantics*, 8(1) :1–7, 2017.

[53] Silvio Peroni. Samod : an agile methodology for the development of ontologies. In *Proceedings of the 13th OWL : Experiences and Directions Workshop and 5th OWL reasoner evaluation workshop (OWLED-ORE 2016)*, pages 1–14, 2016.

[54] Helena Sofia Pinto, Steffen Staab, and Christoph Tempich. Diligent : Towards a fine-grained methodology for distributed, loosely-controlled and evolving engineering of ontologies. In *ECAI*, volume 16, page 393. Citeseer, 2004.

[55] María Poveda-Villalón, Alba Fernández-Izquierdo, Mariano Fernández-López, and Raúl García-Castro. Lot : An industrial oriented ontology engineering framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 111 :104755, 2022.

[56] María Poveda-Villalón, Asunción Gómez-Pérez, and Mari Carmen Suárez-Figueroa. Oops !(ontology pitfall scanner !) : An on-line tool for ontology evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, 10(2) :7–34, 2014.

[57] Omar Qawasmeh, Maxime Lefrançois, Antoine Zimmermann, and Pierre Maret. Pitfalls in networked and versioned ontologies. In *Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management - 11th International Joint Conference, IC3K 2019, Vienna, Austria, September 17-19, 2019, Revised Selected Papers*, volume 1297 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 185–212. Springer, 2019.

[58] Lila Rao, Han Reichgelt, and Kweku-Muata Osei-Bryson. Knowledge elicitation techniques for deriving competency questions for ontologies. In *International Conference on Enterprise Information System*, pages 105–110, 2008.

[59] Amir Azim Sharifloo and Mehrnoush Shamsfard. Using agility in ontology construction. In *Formal Ontologies Meet Industry*, volume 174 of *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, pages 109–119. IOS Press, 2008.

[60] Martin G Skjæveland, Henrik Forssell, Johan W Klüwer, Daniel Lupp, Evgenij Thorstensen, and Arild Waaler. Pattern-based ontology design and instantiation with reasonable ontology templates. *A Higher-Level View of Ontological Modeling*, page 69, 2019.

[61] Steffen Staab, Rudi Studer, H-P Schnurr, and York Sure. Knowledge processes and ontologies. *IEEE Intelligent systems*, 16(1) :26–34, 2001.

[62] Mari Carmen Suárez-Figueroa, Asunción Gómez-Pérez, and Boris Villazón-Terrazas. How to write and use the ontology requirements specification document. In *OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems"*, pages 966–982. Springer, 2009.

[63] Akkharawoot Takhom, Sasiporn Usanavasin, Thepchai Supnithi, and Prachya Boonkwan. A collaborative framework supporting ontology development based on agile and scrum model. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 103(12) :2568–2577, 2020.

[64] Mike Uschold and Michael Gruninger. Ontologies : Principles, methods and applications. *The knowledge engineering review*, 11(2) :93–136, 1996.

[65] Max Volkel, Wolf Winkler, York Sure, S Ryszard Kruk, and Marcin Synak. Semversion : A versioning system for rdf and ontologies. In *Proc. of ESWC*, 2005.

Raisonner sur l'éthique avec un cadre d'argumentation fondé sur une logique modale normale

C. Leturc[1] et G. Bonnet[2]

[1] Inria, Université Côte d'Azur, CNRS, I3S, France
[2] Normandie Univ, UNICAEN, ENSICAEN, CNRS, GREYC, France

christopher.leturc@inria.fr, gregory.bonnet@unicaen.fr

Résumé

Le comportement d'agents artificiels autonomes peut soulever des questions éthiques lorsque leurs actions ont un impact sur les humains, questions que les agents doivent prendre en compte dans leur raisonnement. Si certaines approches représentent le raisonnement moral avec des logiques déontiques, utilisant des opérateurs modaux, d'autres décrivent le raisonnement éthique avec un cadre d'argumentation valué. Cependant, il n'existe pas à notre connaissance de cadre qui combine à la fois logique modale et argumentation pour raisonner sur l'éthique. Dans cet article, nous proposons donc un cadre d'argumentation où les arguments sont construits à partir d'un cadre général de logique modale normale. Celui-ci permet d'exprimer et de raisonner sur un ensemble de valeurs morales via des opérateurs déontiques dyadiques (voire n-aires). Toutefois comme n'y a pas de contradiction nécessaire entre les opérateurs modaux et certaines attaques classiques ne peuvent pas être déduites. Nous proposons alors un mécanisme pour décrire les formes que doivent prendre les contradictions.

Mots-clés

Argumentation, Éthique artificielle, Logique modale.

Abstract

When the actions of artificial agents impact humans, autonomous behaviors may rise ethical issues that agents must consider in their reasoning. Some approaches represent moral reasoning with deontic logics, which use modal operators, while reasoning about ethics may be represented with a value-based argumentation framework as it has been proposed in the literature. However, there is no work that combines both modal logic and argumentation to reason about ethics. In this article, we propose an argumentation framework where arguments are built from a general normal modal logic framework. It allows to express different kinds of modal operators of interest in ethical reasoning, such as moral worth operators, dyadic (or n-ary) deontic operators. However since there is no necessary contradiction between modal operators, some classical argumentative attacks cannot be characterized. To solve this problem, we define attacks based on modal logic thank to a description of how the contradictions must arise.

Keywords

Argumentation, Computational ethics, Modal logic.

1 Introduction

Les comportements des agents artificiels peuvent soulever des questions éthiques lorsque leurs actions ont un impact sur les humains, questions qu'ils doivent représenter et intégrer dans leur raisonnement. À cette fin, de nombreux cadres ont été développés pour permettre la conception d'agents autonomes intégrant des concepts éthiques explicites [5, 12, 18, 19]. Si ces approches modélisent certains aspects spécifiques du raisonnement éthique, elles ne rendent pas entièrement compte de la manière dont les êtres humains effectuent un tel raisonnement. En effet, lorsqu'un être humain prend une décision, il tient compte de ses désirs, de ses croyances sur une situation, de ses émotions ou de valeurs morales [15, 23]. Cependant, dans certaines situations, il n'est pas capable de donner une évaluation différente entre deux options, chacune soutenue par une valeur morale différente et chacune apportant un regret après leur execution. Pour résoudre ces dilemmes moraux, les êtres humains recherchent des arguments qui soutiendront certaines valeurs morales, considérées comme importantes dans la situation [17]. Dans cet article, nous avons pour but de modéliser un tel processus de raisonnement éthique en considérant différentes valeurs morales et en les confrontant les unes aux autres à travers un cadre d'argumentation (AF) [14]. Plus précisement, nous utilisons un cadre d'argumentation fondé sur des valeurs (VAF) [6]. Dans un VAF, les arguments sont associés à une valeur qui peut correspondre à une valeur morale. Par exemple, un véhicule autonome dans une situation d'urgence peut se représenter deux arguments pour savoir si celui-ci doit dépasser la limitation vitesse pour arriver plus vite à l'hopital. Un premier argument pourrait indiquer que selon la loi, « il est interdit de dépasser la limite de vitesse ». Cet argument promeut une valeur *respecter la loi*. Un second peut indiquer qu'« une passagère mourante doit arriver à l'hôpital le plus vite possible » et peut promouvoir une valeur *préserver la vie*. Cependant, dans un VAF, les associations entre arguments et valeurs sont données a priori. C'est pourquoi nous proposons d'aller plus loin en considérant un VAF

©AFIA2022

fondé sur une logique modale. En effet, nous affirmons que le raisonnement selon les valeurs peut être représenté par une logique modale puisque les opérateurs modaux sont bien adaptés pour exprimer des notions de désirs (valeurs égoïstes ou hédoniques) ou de mondes idéaux déontiques. De plus, la logique modale est également adaptée pour exprimer et raisonner sur les connaissances et les croyances d'un agent. Par exemple, dans l'exemple précédent, nous pouvons considérer un autre argument qui exprimerait que « la passagère n'est pas mourante pas car elle souffre d'une luxation de l'épaule ». Un tel argument ne promeut aucune valeur morale mais attaque clairement l'argument précédent. Ainsi, la principale contribution de cet article est de fournir un cadre d'argumentation où les arguments et les relations d'attaque sont sémantiquement définis du point de vue des logiques modales.

2 Application

L'exemple ci-après a pour objectif de modéliser le raisonnement éthique d'un agent devant décider d'un mode de transport. Pour prendre sa décision, nous faisons l'hypothèse que l'agent considère un ensemble de valeurs, a une préférence sur elles et connait les différents itinéraires associés au mode de transport choisi : prendre sa voiture, son vélo, les transports publics ou aller à pied. Nous supposons aussi que l'agent ne prend que des décisions rationnelles fondés ses préférences. L'exemple 1 introduit quelques éléments formels qui seront repris dans la suite de cet article.

Exemple 1. *Nous considérons un ensemble de valeurs $\mathcal{V}al$, constitué d'une valeur écologique associée au respect de l'environnement (ν_{env}), une valeur économique associée à la maximisation de son intérêt personnel (ν_{eco}), une valeur associée au respect de consignes données par une autorité gouvernementale (ν_{aut}) ainsi qu'une valeur associée au respect de sa santé (ν_{health}). Nous considérons donc que l'agent doit décider entre plusieurs actions représentées par les symboles suivants :*

- $\triangle_{car}$ *:= "prendre sa voiture"*
- $\triangle_{p.t.}$ *:= "prendre les transports publics"*
- $\triangle_{bike}$ *:= "prendre son vélo"*
- $\triangle_{walk}$ *:= "partir à pied"*

Nous représentons par $\mathcal{P}$ un ensemble de variables propositionnelles décrivant des informations sur la situation et l'agent. $\mathcal{P}$ contient les éléments suivants :

- has_{bike} *:= "l'utilisateur possède un vélo"*
- has_{car} *:= "l'utilisateur possède une voiture"*
- $crisis_{health}$ *:= "il y a une crise sanitaire"*
- $congestion$ *:= "il y a un embouteillage"*
- $emergency$ *:= "il s'agit d'une urgence médicale"*

3 Notions préliminaires

Dans un premier temps, nous introduisons des notions élémentaires sur l'argumentation valuée. Dans un second temps, nous présentons la littérature qui combine à la fois logiques modales et argumentation.

3.1 Argumentation valuée

Un VAF étend le cadre de l'argumentation abstraite introduit par Dung [14]. Ce dernier l'étend en introduisant des concepts de valeurs, et de préférences sur les valeurs [6].

Définition 1 (VAF). *Un* VAF *est un tuple $\langle \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{V}al, \mu, \succ \rangle$ tel que : $\mathcal{A}$ est un ensemble non vide d'arguments, $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{A} \times \mathcal{A}$ est une relation binaire décrivant la notion d'attaque entre arguments de $\mathcal{A}$, $\mathcal{V}al$ est un ensemble non vide de valeurs ; $\mu : \mathcal{A} \to \mathcal{V}al$ est une fonction associant à chaque argument une valeur, et $\succ \subseteq \mathcal{V}al \times \mathcal{V}al$ est une relation transitive de préférence entre les valeurs.*

Un argument en écarte un autre s'il l'attaque et que l'argument attaqué n'est à l'argument attaquant au regard des valeurs qui leur sont respectivement associées.

Définition 2 (Écart). *Soit $\langle \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{V}al, \mu, \succ \rangle$ un VAF. Un argument $A \in \mathcal{A}$* écarte *un argument $B \in \mathcal{A}$, noté $A\ \mathcal{R}_{vaf}\ B$ si, et seulement si, $A\mathcal{R}B$ i.e. A attaque B, et $\mu(B) \not\succ \mu(A)$ i.e. la valeur $\mu(B)$ n'est pas préférée à la valeur $\mu(A)$.*

Définition 3 (Sans conflit et acceptabilité). *Soient $\mathcal{R}_{vaf}$ une attaque VAF sur $\langle \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{V}al, \mu, \succ \rangle$, et $S \subseteq \mathcal{A}$. S est un ensemble d'argument* sans conflit *par rapport à $\mathcal{R}_{vaf}$ si, et seulement si, $\nexists A, B \in S$ t.q. $A\ \mathcal{R}_{vaf}\ B$. Pour tout $A \in \mathcal{A}$, A est* acceptable *pour S si, et seulement si, $\forall B \in \mathcal{A}$ si $B\ \mathcal{R}_{vaf}\ A$, alors $\exists C \in S, C\ \mathcal{R}_{vaf}\ B$.*

Pour caractériser des arguments dits « admissibles », nous utilisons la notion de sémantique d'admissibilité ou extensions [14]. Nous donnons ci-dessous les principales :

Définition 4 (Extensions). *Soit $S \subseteq \mathcal{A}$. S est une* extension admissible *ssi S est sans conflit et tout argument $A \in S$ est acceptable pour S. S est une* extension complète *ssi S est admissible et contient tous les arguments acceptables pour S. S est une* extension préférée *ssi S est une extension admissible maximale pour $\subseteq$. S est une* extension stable *ssi S est sans conflit, et $\forall A \in \mathcal{A} \setminus S$, $S\ \mathcal{R}_{vaf}\ A$.*

Dans la suite, nous ne faisons pas de supposition sur la sémantique utilisée.

3.2 L'argumentation fondée sur la logique

Pour combiner logique et argumentation, certains travaux utilisent la logique pour modéliser l'argumentation formelle [11, 16, 22] et d'autres considèrent l'argumentation comme une structure issue d'une logique [1, 4, 7, 8, 10, 20]. La première approche ne permet pas d'exprimer des arguments fondés sur des états mentaux ou des modalités déontiques car la relation d'accessibilité dans ces modèles représentent une relation d'attaque entre arguments. C'est pourquoi, nous nous intéressons uniquement à la seconde approche. Par exemple, [8] définit une argumentation fondée sur la logique propositionnelle : un argument est un couple (prémisse, conclusion) ; la relation d'attaque est définie sur les contradictions déduites dans la logique. Pour aller plus loin, [10] propose une argumentation fondée sur le calcul des hyperséquents et une logique modale S5. Ici,

$A = (\Gamma, \phi)$ est un argument avec Γ un ensemble de formules de S5 supportant la conclusion ϕ si, et seulement si, $\Gamma \Rightarrow \phi$ est un séquent prouvé. Cependant, il n'y a qu'un type de modalité et [10] ne fournit pas de sémantique à leur opérateur. Enfin, plutôt que de considérer une sémantique particulière associée à une logique, [1] propose une généralisation de l'argumentation en considérant une fonction $\mathcal{C}$ représentant l'opérateur de conséquence syntaxique $\vdash$ (i.e. ce qui peut être déduit d'un système de preuve). Cependant, toutes ces approches ne fournissent pas de sémantique associé aux opérateurs de preuves syntaxiques. À notre connaissance, si certains travaux introduisent une sémantique de logique du premier ordre pour les arguments comme [7], aucun ne propose un cadre d'argumentation fondé sur la sémantique des logiques modales normales.

4 Logique multimodale n-aire

Pour exprimer certaines logiques de la morale comme DL-MA [19] ou les logiques déontiques dyadiques [21], nous considérons un cadre de logique multimodal normal avec des opérateurs n-aires [9]. Pour ce faire, nous devons tout d'abord définir la notion de type de similarité.

Définition 5 (Type de similarité)**.** *Un* type de similarité *est un couple $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ où $\mathcal{O}$ représente un ensemble non vide de symboles pour chaque opérateur modal et $\rho : \mathcal{O} \to \mathbb{N}$ associe une arité à chaque opérateur modal.*

Un type de similarité représente un ensemble d'opérateurs modaux avec une arité ≥ 0 qui lui est assignée. Les éléments de $\mathcal{O}$ sont usuellement représentés par un « triangle » comme $\triangle_0$, $\triangle_1$, ... pour les opérateurs modaux d'arité 0 (appelés opérateurs nullaires). Ces opérateurs peuvent être vus comme des variables propositionnelles au niveau du cadre de Kripke et pas au niveau d'un modèle.

Exemple 2. *Considérons $\triangle_{car}$, $\triangle_{p.t.}$, $\triangle_{bike}$, $\triangle_{walk}$ les choix de l'agent de respectivement prendre sa voiture, prendre les transports publics, partir en vélo, ou partir à pieds. Ces opérateurs nullaires représentent donc les choix.*

Pour les arités supérieures, par convention l'ensemble $\mathcal{O}$ contient seulement des modalités de type « diamants ». Ainsi, si un $\triangle$ est un opérateur monadique, i.e. $\rho(\triangle) = 1$, alors il s'agit de l'opérateur standard $\Diamond$, i.e. une modalité de type « existence » (noté $\exists$-type). Pour $\rho(\triangle) > 1$, un opérateur n-aire $\triangle$ signifie qu'il existe un N-uplet de mondes accessibles où chaque formule à l'interieur des paramètres est vraie. Nous représentons par ∇ le dual de $\triangle$. Quand ∇ est un opérateur monadique, il est équivalent à l'opérateur standard $\Box$. Pour un τ donné, nous notons $\mathcal{O}_{dual}$ l'ensemble des opérateurs duaux dans $\mathcal{O}$, i.e. tous les types « pour tout » (noté $\forall$-type). Pour les modalités d'arité supérieure, ∇ signifie que quelque soit les N-uplet de mondes accessibles, au moins une formule contenue dans les paramètres de la modalité est vérifiée. Notons que les valeurs peuvent être soit représentées par des opérateurs nullaires (pour exprimer des valeurs promues dans un monde) ou par des opérateurs d'arité supérieure pouvant être interprété comme des obligations déontiques au nom d'une valeur spécifique.

Exemple 3. *Nous pouvons représenter « prendre son vélo promeut la valeur environnementale » soit en considérant un opérateur nullaire $\triangle_{env}$ qui est vrai pour chaque monde où $\triangle_{bike}$ est vrai, ou avec un opérateur déontique monadique de SDL e.g. $\nabla_{env}(\triangle_{bike})$, ou de façon plus expressive, avec un opérateur n-aire. Dans la suite, nous considérons des opérateurs dyadiques [21] dont un paramètre représente le contexte d'application d'une règle déontique et le second paramètre représente ce qui devrait être dans un monde idéal associé à ce contexte. Intuitivement, ces opérateurs représentent une contrainte sur trois mondes (w, v, u) où w est un monde dans lequel une norme (v, u) peut s'appliquer, norme signifiant que u est un monde idéal pour un monde v où le contexte est vérifié.*

Contrairement à [9], nous considérons des sémantiques alternatives pour $\triangle$ et ∇ : un opérateur n-aire, noté $\Box$, est défini comme pour tout N-uplet de mondes accessibles, chaque formule à l'intérieur de $\Box$ est vérifiée. $\Box$ a aussi sa modalité duale, notée $\Diamond$, qui est définie comme il existe un N-uplet tel que au moins une formule est vraie dans son monde respectif. Les ensembles des $\Diamond$ et $\Box$ sont représentés respectivement par $\mathcal{O}^*$ et $\mathcal{O}^*_{dual}$. Pour lier chaque opérateur modal avec son dual et ses sémantiques alternatives, nous notons $\mathcal{O}^\Omega = \mathcal{O} \cup \mathcal{O}_{dual} \cup \mathcal{O}^* \cup \mathcal{O}^*_{dual}$ l'ensemble de tous les opérateurs modaux et une fonction $\varrho : \mathcal{O}^\Omega \to \mathcal{O} \times \mathcal{O}_{dual} \times \mathcal{O}^* \times \mathcal{O}^*_{dual}$ qui associe à chaque modalité son dual et ses alternatives. Dans la suite, nous considérons que le domaine de ρ est étendu à $\mathcal{O}^\Omega$, i.e. $\rho : \mathcal{O}^\Omega \to \mathbb{N}^*$ et ρ est telle que : $\forall \triangle \in \mathcal{O}$, si $\varrho(\triangle) = (\triangle, \nabla, \Diamond, \Box)$, alors $\rho(\triangle) = \rho(\nabla) = \rho(\Diamond) = \rho(\Box)$.

Définition 6 (Langage des logiques modales)**.** *Soit $\mathcal{P}$ un ensemble d'atomes propositionnels et $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ un type de similarité. Nous considérons le langage des formules bien formées (fbf) généré par la grammaire sous forme de Backus-Naur, pour tout $p \in \mathcal{P}$, $\triangle \in \mathcal{O}, \star \in \varrho(\triangle)$:*

$$\phi ::= p \mid \neg\phi \mid \phi \wedge \phi \mid \star(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$$

De façon standard, nous avons $\top := \neg\bot$, $\phi \vee \psi := \neg(\neg\phi \wedge \neg\psi)$, et $\phi \Rightarrow \psi := \neg\phi \vee \psi$. De plus si $\rho(\triangle) > 0$:

— $\nabla(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) := \neg\triangle(\neg\phi_1, \ldots, \neg\phi_{\rho(\triangle)})$
— $\Box(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) := \neg\Diamond(\neg\phi_1, \ldots, \neg\phi_{\rho(\triangle)})$

Nous ne considérons ici qu'une sémantique de système K car elle fournit un cadre minimaliste, sans contrainte sur les relations d'accessibilité. Cependant, elle pourrait être étendue en contraignant les relations d'accessibilité.

Définition 7 (Sémantique des logiques multi-modales normales n-aires)**.** *Soit $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ un type de similarité. Un τ-*modèle *est un N-uplet $\mathcal{M} = \langle \mathcal{W}, \{\mathcal{R}_\triangle\}_{\triangle \in \mathcal{O}}, \mathcal{V} \rangle$ tel que :*

— *$\mathcal{W}$ est un ensemble non vide de mondes,*
— *$\forall \triangle \in \mathcal{O}, \mathcal{R}_\triangle$ est une relation $(\rho(\triangle) + 1)$-aire* [1]*,*
— *$\mathcal{V} : \mathcal{P} \to 2^\mathcal{W}$ est une fonction de valuation.*

*$\mathcal{C} = \langle \mathcal{W}, \{\mathcal{R}_\triangle\}_{\triangle \in \mathcal{O}} \rangle$ est un τ-*cadre *et $\mathcal{M}$ est un modèle dans $\mathcal{C}$ ssi $\mathcal{M}$ appartient à la classe des modèles $\mathcal{C}_\mathbb{M} = \{\mathcal{M} : \exists \mathcal{V}, \mathcal{M} = \langle \mathcal{C}, \mathcal{V} \rangle\}$. Pour tout $w \in \mathcal{W}$, et $\phi, \psi \in \mathcal{L}$, $\triangle \in \mathcal{O}$, $\varrho(\triangle) = (\triangle, \nabla, \Diamond, \Box)$, et $p \in \mathcal{P}$:*

1. Chaque $\star \in \varrho(\triangle)$ est défini sur la même relation $(\rho(\triangle) + 1)$-aire.

©AFIA2022

1. $\mathcal{M}, w \not\models \bot$
2. $\mathcal{M}, w \models p$ *ssi* $w \in V(p)$
3. $\mathcal{M}, w \models \neg\phi$ *ssi* $\mathcal{M}, w \not\models \phi$
4. $\mathcal{M}, w \models \phi \wedge \psi$ *ssi* $\mathcal{M}, w \models \phi$ *et* $\mathcal{M}, w \models \psi$

Pour les cas où $\rho(\triangle) \geq 1$ *:*

5. $\mathcal{M}, w \models \triangle(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$ *ssi* $\exists(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)}) \in \mathcal{W}^{\rho(\triangle)}$ *:* $w\mathcal{R}_\triangle(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)})$ *et* $\forall k \in \mathbb{N}^*, k \leq \rho(\triangle)$, $v_k \models \phi_k$
6. $\mathcal{M}, w \models \nabla(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$ *ssi* $\forall(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)}) \in \mathcal{W}^{\rho(\triangle)}$ *: si* $w\mathcal{R}_\triangle(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)})$ *alors* $\exists k \in \mathbb{N}^*, k \leq \rho(\triangle)$, $v_k \models \phi_k$
7. $\mathcal{M}, w \models \Box(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$ *ssi* $\forall(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)}) \in \mathcal{W}^{\rho(\triangle)}$ *: si* $w\mathcal{R}_\triangle(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)})$ *alors* $\forall k \in \mathbb{N}^*, k \leq \rho(\triangle)$, $v_k \models \phi_k$
8. $\mathcal{M}, w \models \Diamond(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$ *ssi* $\exists(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)}) \in \mathcal{W}^{\rho(\triangle)}$ *:* $w\mathcal{R}_\triangle(v_1, \ldots, v_{\rho(\triangle)})$ *et* $\exists k \in \mathbb{N}^*, k \leq \rho(\triangle)$, $v_k \models \phi_k$

Pour les cas où $\rho(\triangle) = 0$ *:*

9. $\mathcal{M}, w \models \triangle$ *ssi* $w \in \mathcal{R}_\triangle$
10. $\mathcal{M}, w \models \nabla$ *ssi* $\mathcal{R}_\triangle = \mathcal{W}$
11. $\mathcal{M}, w \models \Box$ *ssi* $\mathcal{R}_\triangle = \emptyset$
12. $\mathcal{M}, w \models \Diamond$ *ssi* $\mathcal{R}_\triangle \neq \emptyset$

Pour résumer, nous avons quatre types d'opérateurs modaux : $\triangle$ est une modalité $(\exists, \wedge)$-type appartenant à l'ensemble $\mathcal{O}$, ∇ est de $(\forall, \vee)$-type appartenant à l'ensemble $\mathcal{O}_{dual}$, $\Diamond$ est de $(\exists, \vee)$-type appartenant à l'ensemble $\mathcal{O}^*$ et $\Box$ est de $(\forall, \wedge)$-type appartenant à l'ensemble $\mathcal{O}^*_{dual}$. Par $(\exists, \wedge)$-type, nous entendons les modalités ayant une sémantique où nous avons un quantificateur $\exists$ sur les N-uplets accessibles et une « conjonction » sur la vérité des formules par rapport à leurs mondes respectifs du N-uplet, tandis que les $(\forall, \vee)$-types ont une sémantique fondée sur le quantificateur $\forall$ pour les mondes accessibles et une « disjonction » sur la vérité des formules par rapport à leur monde respectif du N-uplet. Pour le cas où $\rho(\triangle) = 1$, i.e. $\triangle$ est monadique, il y a équivalence entre opérateurs : $\triangle \equiv \Diamond$ et $\Box \equiv \nabla$.

Exemple 4. *Considérons la formule* $O(crisis_{health}, \neg\triangle_{p.t.})$ *où* O *est un opérateur déontique dyadique [21]. Cette formule peut signifier que dans le cas où il y a une crise sanitaire, il est fortement déconseillé de prendre les transports publics. Dans notre cadre, cet opérateur peut être exprimé sémantiquement avec un opérateur* ∇ *ayant donc une sémantique de* $(\forall, \vee)$*-type, i.e* $\nabla_O(\neg crisis_{health}, \neg\triangle_{p.t.})$ *car le contexte doit être représenté avec une négation dans les modalités* $(Qt, \vee)$*-type où* $Qt \in \{\forall, \exists\}$*. En effet, toutes les modalités* $(Qt, \vee)$*-type considèrent une « disjonction » sur les mondes accessibles du N-uplet, e.g.* $w \models \nabla(\neg\phi, \psi)$ *est vrai ssi* $\forall(u, v) \in \mathcal{R}_\triangle(w), u \models \neg\phi$ *ou* $v \models \psi$*. Ainsi, nous pouvons traduire cette disjonction, de manière équivalente en si* $u \models \phi$*, alors* $v \models \psi$*.*

Rappelons les notions de validité et satisfiabilité d'une formule. ϕ est valide dans $\mathcal{M}$ (noté $\mathcal{M} \models \phi$) si, et seulement si, pour tous les mondes $w \in \mathcal{W}$, ϕ est satisfiable dans w i.e. $\mathcal{M}, w \models \phi$ est vraie. Une formule ϕ est valide dans un cadre $\mathcal{C}$ (noté $\models_\mathcal{C} \phi$ ou $\mathcal{C} \models \phi$) si, et seulement si, pour tous les modèles $\mathcal{M}$ construits sur $\mathcal{C}$, $\mathcal{M} \models \phi$. Dans ce cas, ϕ est une tautologie de $\mathcal{C}$. Soit $\Gamma \subseteq \mathcal{L}$ un ensemble de formules, $\Gamma \models_\mathcal{C} \phi$ signifie que ϕ est une *conséquence sémantique* de Γ si, et seulement si, pour tout modèle $\mathcal{M}$ dans $\mathcal{C}$, si $\mathcal{M} \models \Gamma$ i.e. $\mathcal{M} \models \bigwedge_{\psi \in \Gamma} \psi$ alors $\mathcal{M} \models \phi$.

Exemple 5. *Considérons le type de similarité* $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ *où* $\mathcal{O} = Dyadic_\triangle \cup Unary \cup Nullary_\triangle$*. Ici,* $Dyadic_\triangle = \{\triangle_{gov}, \triangle_{env}, \triangle_{sport}, \triangle_{time}, \}$ *représente les opérateurs dyadiques qui sont respectivement associés aux conseils des autorités, les recommandations environnementales, les recommandations pour la santé, et ce qui permet de favoriser le gain de temps.* $Unary = \{\Diamond\}$ *contient un opérateur unaire pour décrire ce qui est possible et* $Nullary = \{\triangle_{bike}, \triangle_{p.t.}, \triangle_{walk}, \triangle_{car}\}$ *sont les choix. Ainsi, la fonction* ρ *est telle que :* $\forall\star \in Dyadic_\triangle, \rho(\star) = 2, \rho(\Diamond) = 1, \forall\star \in Nullary, \rho(\star) = 0$*. Par conséquent, nous considérerons le* τ*-cadre* $\mathcal{C} = \langle \mathcal{W}, \{\mathcal{R}_\triangle\}_{\triangle \in O \setminus \{\Diamond\}}, \mathcal{R}_\Diamond \rangle$ *où la sémantique de chaque opérateur est donnée par le type de symbole utilisé dans la formule et* $\mathcal{O}^\Omega$ *représente l'ensemble de tous les symboles pour les opérateurs modaux* $\triangle$*,* ∇ *et leur alternative* $\Box$ *et* $\Diamond$*.*

En étendant [9] aux modalités n-aires $\Box$, nous proposons un système axiomatique **fortement correct et complet**, appelé GK, qui généralise les cadres de Kripke. Nous notons $\vdash \phi$ pour signifier que ϕ est un théorème. Nous considérons les axiomes classiques du calcul propositionnel (CP), le modus ponens (MP) et la substitution uniforme (SUB). Pour tout $\triangle \in \mathcal{O}$, t.q. $\rho(\triangle) \geq 1$, $\varrho(\triangle) = (\triangle, \nabla, \Diamond, \Box)$.

La règle de nécessitation (NEC) :
Pour $\vdash \phi$: $\vdash \nabla(\bot, \ldots, \phi, \ldots, \bot) \wedge \Box(\top, \ldots, \phi, \ldots, \top)$

Les axiomes $\forall k \in [|1, \rho(\triangle)|]$, (K^k_∇) :

$$\vdash \nabla(\phi_1, \ldots, \phi_k \Rightarrow \psi_k, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) \Rightarrow \nabla(\phi_1, \ldots, \phi_k, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) \Rightarrow \nabla(\phi_1, \ldots, \psi_k, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$$

Les axiomes $\forall k \in [|1, \rho(\triangle)|]$, $(K^k_\Box)$:

$$\vdash \Box(\phi_1, \ldots, \phi_k \Rightarrow \psi_k, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) \Rightarrow \Box(\phi_1, \ldots, \phi_k, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) \Rightarrow \Box(\phi_1, \ldots, \psi_k, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$$

Les axiomes d'interaction $(Int(\Box, \nabla))$:
$\vdash \Box(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) \Rightarrow \nabla(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)})$
Les axiomes de dualité pour $(Dual_\nabla)$ et $(Dual_\Box)$:
$\vdash \nabla(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) \Leftrightarrow \neg\triangle(\neg\phi_1, \ldots, \neg\phi_{\rho(\triangle)})$
$\vdash \Box(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\triangle)}) \Leftrightarrow \neg\Diamond(\neg\phi_1, \ldots, \neg\phi_{\rho(\triangle)})$
Les règles d'équivalence (RE), pour tout $\star \in \varrho(\triangle)$:
Pour $\vdash \phi_k \Leftrightarrow \psi_k$: $\vdash \star(\ldots, \phi_k, \ldots)) \Leftrightarrow \star(\ldots, \psi_k, \ldots)$

Nous devons aussi considérer deux cas pour les opérateurs monadiques et nullaires. Si $\rho(\triangle) = 1$, nous ajoutons aux axiomes précédents : $\vdash \Box\phi \Leftrightarrow \nabla\phi$ et $\vdash \Diamond\phi \Leftrightarrow \triangle\phi$. Si $\rho(\triangle) = 0$, les axiomes précédents ne tiennent plus et nous avons seulement (PC), (MP), (RE), (SUB).

Définition 8 (Système de déduction)**.** *Soit Σ un ensemble de formules et ϕ une formule de $\mathcal{L}$. ϕ est* déductible *de Σ, noté $\Sigma \vdash \phi$, si, et seulement si : si $\Sigma = \emptyset$, alors $\vdash \phi$, sinon $\exists n \in \mathbb{N}^*, \exists \psi_1, \ldots, \psi_n \in \Sigma, \vdash \psi_1 \wedge \ldots \wedge \psi_n \Rightarrow \phi$.*

Exemple 6. *Dans notre exemple, pour exprimer une généralisation de l'axiome de vérité, notée T_τ, pour les modalités de type $\Box$ et $\Diamond$, nous supposons que $\mathcal{R}_\Diamond$ est telle que :*

$$\forall w \in \mathcal{W}, \mathcal{R}_\Diamond(w) = \{w\} \cup \bigcup_{\triangle' \in Dyadic} \{u, v : (u, v) \in \mathcal{R}_{\triangle'}(w)\}$$

Cette contrainte exprime la tautologie suivante :

$$\models \Box\phi \Rightarrow \Big(\phi \bigwedge_{\triangle' \in Dyadic : \varrho(\triangle') = (\triangle', \nabla', \Diamond', \Box')} (\Box'(\top, \phi) \wedge \Box'(\phi, \top) \wedge \Box'(\phi, \phi) \wedge \nabla'(\bot, \phi) \wedge \nabla'(\phi, \bot) \wedge \nabla'(\phi, \phi))\Big)$$

Elle signifie que si une formule est nécessairement vraie, alors elle est aussi vraie dans tous les mondes accessibles à partir des autres relations.

Exemple 7. *Nous considérons les hypothèses suivantes :*

$$\Gamma_1 \stackrel{\text{def}}{=} \{\nabla_{aut}(\neg crisis_{health}, \neg\triangle_{p.t.})\}$$
$$\Gamma_2 \stackrel{\text{def}}{=} \{\triangle_{car} \rightarrow has_{car}, \triangle_{bike} \rightarrow has_{bike}\}$$
$$\Gamma_3 \stackrel{\text{def}}{=} \{\nabla_{health}(\bot, \triangle_{bike})\}$$
$$\Gamma_4 \stackrel{\text{def}}{=} \{\nabla_{time}(\neg emergency \vee congestion, \triangle_{car})\}$$
$$\Gamma_5 \stackrel{\text{def}}{=} \{\neg\triangle_{time}(emergency, \triangle_{walk})\}$$
$$\Gamma_6 \stackrel{\text{def}}{=} \{\nabla_{env}(\bot, \triangle_{bike} \vee \triangle_{walk} \vee \triangle_{p.t.})\}$$
$$\Gamma_7 \stackrel{\text{def}}{=} \{\nabla_{env}(\neg congestion, \neg\triangle_{car})\}$$
$$\Gamma_8 \stackrel{\text{def}}{=} \{\Box\texttt{XOR}(\triangle_{car}, \triangle_{p.t.}, \triangle_{bike}, \triangle_{walk})\}$$
$$\Gamma_9 \stackrel{\text{def}}{=} \{\Box(has_{car} \wedge \neg has_{bike} \wedge crisis_{health} \wedge \neg congestion \wedge \neg emergency)\}$$

Γ_1 signifie que les autorités recommendent de ne pas prendre les transports publics quand il y a une crise sanitaire. Γ_2 représente la condition, faire du vélo ou conduire implique d'avoir un vélo ou une voiture. Γ_3 signifie que faire du vélo est obligatoire dans tous les contextes du point de vue de la santé. Γ_4 signifie que s'il y a une urgence et qu'il n'y a pas d'embouteillage, alors il est obligatoire de prendre sa voiture pour économiser du temps. Γ_5 signifie qu'il n'est pas possible qu'en cas d'urgence, marcher vous fasse gagner du temps. Γ_6 signifie que peu importe le contexte, il est obligatoire de prendre son vélo, marcher ou prendre les transports publics pour le bien de l'environnement. Γ_7 signifie qu'il est obligatoire de ne pas prendre sa voiture quand il y a des embouteillages. Γ_8 signifie qu'il est nécessaire que l'agent choisisse un seul choix au même moment (e.g. l'agent ne peut pas à la fois prendre sa voiture et son vélo). Γ_9 décrit la situation initiale de l'agent.

Exemple 8. *Nous montrons à partir de l'exemple 7 :*

$$\Gamma_5 \vdash \nabla_{time}(\neg emergency, \neg\triangle_{walk})$$
$$\Gamma_2 \vdash \neg has_{bike} \Rightarrow \neg\triangle_{bike}$$
$$\Gamma_2 \cup \Gamma_9 \vdash \neg\triangle_{bike}$$
$$\Gamma_6 \cup \Gamma_8 \vdash \nabla_{env}(\bot, \neg\triangle_{car})$$
$$\Gamma_8 \vdash \texttt{XOR}(\triangle_{car}, \triangle_{p.t.}, \triangle_{bike}, \triangle_{walk})$$
$$\Gamma_9 \vdash \neg emergency \vee congestion$$

Remarquons que nous déduisons de Γ_6 et Γ_8 que, peu importe le contexte, il n'est pas bon pour l'environnement de prendre sa voiture, ce qui est plus fort que l'hypothèse Γ_7.

5 VAF fondé sur les logiques modales

Nous définissons les arguments puis les relations d'attaque pour les VAF fondés sur les logiques modales.

5.1 Arguments

Dans la littérature, il est usuel de considérer un argument comme un couple (Γ, ϕ) où Γ est un ensemble de formules, nommées *prémisses* ou *support*, et implique une formule ϕ, appelée *conclusion* [1, 4, 8, 10, 20]. Usuellement, ces arguments sont définis sur la base des *implications syntaxiques* en supposant que la logique est connue et bien construite. Ici, nous donnons une définition pour les arguments déduits à partir de notre système de preuve : un *argument valide* est un couple (Γ, ϕ) où la conclusion ϕ est une *conséquence sémantique* des prémisses de Γ.

Définition 9 (Argument valide)**.** *Soit $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ un type de similarité, et $\mathcal{C}$ un τ-cadre. Un* argument valide *dans $\mathcal{C}$ est un couple $A = (\Phi, \alpha)$ t.q. :*

1. *$\Phi \subseteq \Delta$ où $\Delta \subseteq \mathcal{L}$ est fini*[2]*,*
2. *$\Phi \not\models_{\mathcal{C}} \bot$ i.e. Φ n'est pas inconsistant : $\exists \mathcal{M}, w \models \Phi$,*
3. *$\Phi \models_{\mathcal{C}} \alpha$,*
4. *Φ est minimal pour $\subseteq$ t.q. 1, 2 et 3 sont respectés.*

Un argument est *déductible* quand il est obtenu à partir d'un système de preuve syntaxique, i.e. avec l'opérateur de déduction $\vdash$ plutôt que $\models$. Il y a généralement équivalence entre argument déductible et argument valide dans un système logique correct et complet. Par abus de langage, nous écrivons $A = (_, \phi)$ comme un raccourci signifiant que l'ensemble des prémisses Φ n'est pas spécifié. Cela correspond à $\exists\, \Phi \subseteq \mathcal{L}$ t.q. $A = (\Phi, \phi)$.

Exemple 9. *Quelques exemples d'arguments déductibles :*

$$A_1 = (\Gamma_1, \neg congestion)$$
$$A_2 = (\Gamma_7, \nabla_{env}(\neg congestion, \neg\triangle_{car}))$$
$$A_3 = (\Gamma_9, \Box\neg congestion)$$
$$A_4 = (\Gamma_8, \Box\texttt{XOR}(\triangle_{car}, \triangle_{p.t.}, \triangle_{bike}, \triangle_{walk}))$$
$$A_5 = (\Gamma_3, \nabla_{sport}(\bot, \triangle_{bike}))$$
$$A_6 = (\Gamma_2 \cup \Gamma_9, \Box\neg\triangle_{bike})$$
$$A_7 = (\Gamma_4, \nabla_{time}(\neg emergency \vee congestion, \triangle_{car}))$$
$$A_8 = (\Gamma_8, \neg emergency \vee congestion)$$
$$A_9 = (\Gamma_5, \nabla_{time}(\neg emergency, \neg\triangle_{walk}))$$
$$A_{10} = (\Gamma_9, \neg emergency)$$
$$A_{11} = (\Gamma_6 \cup \Gamma_8, \nabla_{env}(\bot, \neg\triangle_{car}))$$
$$A_{12} = (\Gamma_1, \nabla_{aut}(\neg crisis_{health}, \neg\triangle_{p.t.}))$$

D'autres arguments peuvent être déduits (ex. $(\Gamma_9, crisis_{health})$) mais ne sont pas considérés car ils ne supportent aucune décision ou n'attaquent aucun argument supportant une décision.

2. Puisque il y a un nombre infini de fbf sur $\mathcal{L}$, il est usuel de considérer Δ un ensemble de fbf sur lesquelles les agents peuvent raisonner [8].

©AFIA2022

5.2 Attaques modales

Rappelons tout d'abord la sémantique des relations d'attaque les plus utilisées : le *rebuttal*, l'*undercut* et le *defeate*r [2, 8].

Définition 10 (Attaques). *$A = (\Phi, \alpha)$ est un* rebuttal *pour $B = (\Psi, \beta)$ (noté A Reb B) ssi $\models \alpha \Leftrightarrow \neg\beta$.*
A est un undercut *pour B (noté A Und B) ssi il existe :*

$$\Psi' = \{\psi_1, \ldots, \psi_n\} \subseteq \Psi \text{ t.q. } \models \alpha \Leftrightarrow \neg \bigwedge_{\psi_i \in \Psi'} \psi_i$$

A est un defeater *pour B (noté A Def B) ssi il existe :*

$$\Psi' = \{\psi_1, \ldots, \psi_n\} \subseteq \Psi \text{ t.q. } \alpha \models \neg \bigwedge_{\psi_i \in \Psi'} \psi_i$$

Cependant cela ne caractérise pas les attaques entre formules avec des opérateurs modaux différents car elles n'aboutissent pas nécessairement à des incohérences. Ainsi, nous proposons un nouveau type d'attaque pour toute logique modale, que nous appelons *attaque modale*. Considérons une formule déontique dyadique $\nabla_O(\neg\phi, \psi)$ signifiant que quand ϕ est vraie, il est obligatoire d'avoir ψ à vrai, et une formule monadique déontique $\Box_K\neg\psi$ signifiant qu'il est obligatoire pour une certaine doctrine que ψ soit au contraire fausse. Intuitivement une attaque entre deux arguments $C = (_, \nabla_O(\neg\phi, \psi))$ et $K = (_, \Box_K\neg\psi)$ serait fondée sur une contradiction entre le second paramètre de ∇_O et la formule contenue dans $\Box_K$. Cependant, C devrait être attaqué si ϕ est faux, i.e. le contexte n'est pas vérifié. Ainsi, un argument $F = (_, \neg\phi)$ serait un *defeater* de C. De plus, puisque l'opérateur $\Box_K$ est un opérateur monadique et ∇_O est un opérateur dyadique, l'attaque entre K et C est fondée sur une contradiction entre le premier paramètre de $\Box_K$ et le second paramètre de ∇_O. Nous disons ici que les paramètres sont *non alignés*. D'autre part, l'attaque entre F et C est fondée sur une **équivalence** entre $\neg\phi$ et le premier paramètre de ∇_O. Nous disons que ces paramètres sont *alignés*. Pour spécifier sur quels paramètres se fondent l'attaque et quelle est sa nature, nous définissons $d^{\star_2}_{\star_1}$*-mapping* une fonction qui associe les paramètres de deux modalités distinctes $\star_1$ et $\star_2$ pour caractériser une attaque. Dans l'exemple précédent, $K = (_, \Box_K\psi_1)$ avec $\psi_1 := \neg\psi$, et $C = (_, \nabla_O(\phi_1, \phi_2))$ avec $\phi_1 := \neg\phi$ et $\phi_2 := \psi$, s'attaque mutuellement car $\models \phi_2 \equiv \neg(\psi_1)$. Ainsi, le d-mapping est défini comme $d^{\nabla_C}_{\Box_K} = \{(1, 2)\}$, i.e. le premier paramètre de $\Box_K$ est associé avec le second paramètre de ∇_O et il doit y avoir une contradiction pour définir une relation d'attaque. Nous définissons aussi un $a^{\star_2}_{\star_1}$*-mapping* qui est une fonction qui associe des paramètres devant être équivalents pour définir une attaque. Considérons le $\Box$ standard et la formule $\Box\theta_1$ où $\theta_1 := \neg\phi$. Considérons $\nabla_O(\phi_1, \phi_2)$, θ_1 est nécessairement vraie, i.e. $\neg\phi$, il ne peut pas être possible que le contexte de $\nabla_O(\phi_1, \phi_2)$ soit vérifié, i.e. ϕ est vraie. Ainsi, le a-mapping est défini comme $a^{\nabla_C}_{\Box} = \{(1, 1)\}$ et est défini lorsque $\models \phi_1 \equiv \theta_1$ est une tautologie. S'il pourrait sembler contre intuitif de considérer une équivalence pour une attaque, cela fait sens pour les modalités de type $(\forall, \vee)$ et $(\exists, \vee)$, i.e. ∇ et $\Diamond$, comme elles représentent le contexte avec une négation. Enfin, nous définissons un $d^{\star_2}_{\emptyset}$*-mapping* (resp. $a^{\star_2}_{\emptyset}$*-mapping*) correspondant aux paramètres de $\star_2$ qui doivent être incohérents (reps. équivalent) par rapport aux vérités factuelles, i.e. un argument dont la conclusion n'est pas précédée par un opérateur modal. Par exemple, $d^{\nabla_O}_{\emptyset} = \{1\}$ signifie que le paramètre contextuel de l'opérateur dyadique déontique ∇_O peut être attaqué par une vérité factuelle. Pour représenter ces mapping de manière compacte, nous utilisons un ensemble d'ensembles de règles, où les règles décrivent quels paramètres attaquent quels paramètres pour n'importe quel type de mapping. Par exemple, un $\langle d, a\rangle^{\star_2}_{\star_1}$-mapping peut être $\{\{(1, 2, d), (2, 3, a)\}, \{(3, 4, d)\}\}$. Ici, $\langle d, a\rangle^{\star_2}_{\star_1}$ peut être vue comme une formule normale conjonctive (FNC) définissant les règles devant être satisfaites pour avoir une attaque, i.e. il y a une attaque si le paramètre 1 dans $\star_1$ et le paramètre 2 dans $\star_2$ se contredisent, ou le paramètre 2 dans $\star_1$ et le paramètre 3 dans $\star_2$ sont équivalents, et le paramètre 3 dans $\star_1$ et le paramètre 4 dans $\star_2$ se contredisent.

Définition 11 ($\langle d, a\rangle$-mappings modaux). *Soient $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$, $\mathcal{O}^\Omega$ un ensemble de modalités de τ, $\{d, a\}$ un ensemble de symboles, et $(\star_1, \star_2) \in \mathcal{O}^\Omega \times \mathcal{O}^\Omega$ deux modalités. $\langle d, a\rangle^{\star_2}_{\star_1}$ est un* mapping modal *pour $(\star_1, \star_2)$ ssi : $\langle d, a\rangle^{\star_2}_{\star_1} \subseteq 2^{[|1,\rho(\star_1)|]\times[|1,\rho(\star_2)|]\times\{d,a\}}$. $\langle d, a\rangle^{\star_2}_{\emptyset}$ est un* mapping modal *pour $\star_2$ ssi : $\langle d, a\rangle^{\star_2}_{\emptyset} \subseteq 2^{[|1,\rho(\star_2)|]\times\{d,a\}}$. $\langle d, a\rangle_\tau$ est un* mapping modal pour le τ-cadre*, une fonction qui associe pour chaque paire de modalités $(\star_1, \star_2) \in \mathcal{O}^\Omega \times \mathcal{O}^\Omega$ un mapping modal pour $(\star_1, \star_2)$ et pour chaque modalité $\star_2 \in \mathcal{O}^\Omega$ assigne un mapping modal pour $\star_2$, i.e. $\langle d, a\rangle_\tau$ est tel que :*
– $\langle d, a\rangle_\tau : (\mathcal{O}^\Omega \cup \{\emptyset\}) \times \mathcal{O}^\Omega \to 2^{2^{((\mathbb{N}^*\times\mathbb{N}^*)\cup\mathbb{N}^*)\times\{d,a\}}}$
– $\forall(\star_1, \star_2) \in \mathcal{O}^\Omega \times \mathcal{O}^\Omega$, $\langle d, a\rangle_\tau(\star_1, \star_2) \subseteq 2^{[|1,\rho(\star_1)|]\times[|1,\rho(\star_2)|]\times\{d,a\}}$
– $\forall\star_2 \in \mathcal{O}^\Omega$, $\langle d, a\rangle_\tau(\emptyset, \star_2) \subseteq 2^{[|1,\rho(\star_2)|]\times\{d,a\}}$

Dans la suite, nous considérons les mapping modaux *consistants*. En effet, si pour deux modalités nous avons $\langle d, a\rangle^{\star_2}_{\star_1} = \{\{(i, j, d)\}, \{(i, j, a)\}\}$, alors cela signifierait que les paramètres devraient être à la fois incohérents et équivalents, ce qui n'a pas de sens.

Définition 12 (Mapping modal consistant). *Soit $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ un type de similarité, $\mathcal{O}^\Omega$ l'ensemble des symboles de τ, et $\langle d, a\rangle_\tau$ un mapping modal défini sur le τ-cadre. Nous appelons $\langle d, a\rangle_\tau$ un* mapping modal consistant *ssi (1) et (2) sont vérifiés :*
(1) Pour tout $\star_1, \star_2 \in \mathcal{O}^\Omega$, il existe une fonction I : $[|1, \rho(\star_1)|] \times [|1, \rho(\star_2)|] \to \{\top, \bot\}$ t.q. :

$$\forall S \in \langle d, a\rangle_\tau(\star_1, \star_2), \exists(i, j, t) \in S, I(i, j) = \begin{cases} \top, & \text{if } t = a \\ \bot, & \text{if } t = d \end{cases}$$

(2) Pour tout $\star_2 \in \mathcal{O}^\Omega$, il existe une fonction I : $[|1, \rho(\star_2)|] \to \{\top, \bot\}$ t.q. :

$$\forall S \in \langle d, a\rangle_\tau(\emptyset, \star_2), \exists(j, t) \in S, I(j) = \begin{cases} \top, & \text{if } t = a \\ \bot, & \text{if } t = d \end{cases}$$

Vérifier si un mapping modal est consistant est un problème NP-complet car cela revient à résoudre un problème de satisfiabilité pour la logique propositionnelle. La preuve de NP-complétude découle du théorème suivant :

Théorème 1. *Soit $\langle d, a\rangle_\tau$ un mapping modal consistant ssi la formule propositionnelle suivante ϕ est satisfiable, avec $\mathcal{P} = \{p_{i,j} : (i,j) \in [|1, \rho(\star_1)|] \times [|1, \rho(\star_2)|], (\star_1, \star_2) \in (\mathcal{O}^\Omega)^2\} \cup \{p_j : j \in [|1, \rho(\star_2)|], \star_2 \in \mathcal{O}^\Omega\}$ un ensemble d'atomes propositionnels :*

$$\phi = \bigwedge_{(\star_1,\star_2)\in\mathcal{O}^\Omega\times\mathcal{O}^\Omega} \Big(\bigwedge_{S\in\langle d,a\rangle^{\star_2}_{\star_1}} \Big(\bigvee_{\substack{(i,j,t)\in S:\\ t=a}} p_{i,j} \bigvee_{\substack{(i,j,t)\in S:\\ t=d}} \neg p_{i,j}\Big)\Big)$$
$$\bigwedge_{\star_2\in\mathcal{O}^\Omega} \Big(\bigwedge_{S\in\langle d,a\rangle^{\star_2}_{\emptyset}} \Big(\bigvee_{\substack{(j,t)\in S:\\ t=a}} p_j \bigvee_{\substack{(j,t)\in S:\\ t=d}} \neg p_j\Big)\Big)$$

La preuve est évidente en remarquant qu'elle est une traduction directe d'un $(i,j)^{\star_2}_{\star_1}$ variable propositionnelle $p_{i,j}$ quand il s'agit d'un mapping de type aligné et la négation $\neg p_{i,j}$ quand il est de type non aligné. Nous faisons de même pour les mappings de la forme $(j)^{\star_2}_\emptyset$. Prouver la réciproque correspond à construire un bon modal mapping correspondant à une formule ϕ en FNC.

Exemple 10. *Soient un mapping non aligné entre chaque second paramètre des opérateurs dyadiques et un mapping aligné pour chaque premier paramètre des opérateurs dyadiques et les formules factuelles et les formules nécessairement vraies. Ainsi, $\langle d, a\rangle_\tau$ est tel que :*
– $\forall \star_1, \star_2 \in Dyadic_\nabla, \langle d, a\rangle_\tau(\star_1, \star_2) = \{\{(2, 2, d)\}\}$
– $\forall \star_2 \in Dyadic_\nabla, \langle d, a\rangle_\tau(\emptyset, \star_2) = \{\{(1, a)\}\}$
– $\forall \star_2 \in Dyadic_\nabla, \langle d, a\rangle_\tau(\Box, \star_2) = \{\{(1, 1, a)\}\}$

En raison du nombre d'interactions entre modalités et mappings, décrire chaque attaques est fastidieux. Nous définissons donc une fonction Υ qui exprime des règles pour décrire les attaques. Nous avons les règles pour les attaques entre deux modalités, et les règles pour les faits et les modalités. De plus, un paramètre dans Υ sert à décrire le *type*, distinguant rebuttals et undercuts ($\Leftrightarrow$), et defeaters ($\Rightarrow$).

Définition 13 (Règle Υ-attaque pour $\langle d, a\rangle$-mapping)**.** *Soient $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ un type de similarité, $\mathcal{O}^\Omega$ un ensemble de symboles fondés sur τ, $\langle d, a\rangle$ un mapping modal sur le τ-cadre, et $\Upsilon = \{\Upsilon^{\star_2}_\star\}_{(\star,\star_2)\in M}$ un ensemble de fonctions où $M = (\mathcal{O}^\Omega \cup \{\emptyset\}) \times \mathcal{O}^\Omega$:*

$$\forall(\star, \star_2) \in M, \Upsilon^{\star_2}_\star : \mathcal{L} \times \mathcal{L} \times \{\Rightarrow, \Leftrightarrow\} \to \{\bot, \top\}$$

*Pour tout $(\phi, \psi) \in \mathcal{L}^2$, pour tout $(\star_1, \star_2) \in \mathcal{O}^\Omega \times \mathcal{O}^\Omega$. Υ est l'*ensemble des règles d'attaque pour le $\langle d, a\rangle$-mapping *ssi Υ est t.q. (1) et (2) sont respectées :*

1. *si $\phi = \star_1(\phi_1, \ldots, \phi_{\rho(\star_1)})$, et pour tout $i \in [|1, \rho(\star_1)|]$, $\phi_i \equiv \phi_i^1 \wedge \ldots \wedge \phi_i^{n_i}$ sa forme canonique normale conjonctive (FCNC), $\Upsilon^{\star_2}_{\star_1}(\phi, \psi, type) = \top$ si, et seulement si, $\forall S \in \langle d, a\rangle^{\star_2}_{\star_1}$, $\exists (i, j, t) \in S$, $\exists K \subseteq [|1, n_i|]$:*
   – si $t = d$, alors :
   $$\{\bigwedge_{k\in K} \phi_i^k\} \models \neg\psi_j \text{ et } (\text{si type} = \Leftrightarrow, \{\neg\psi_j\} \models \bigwedge_{k\in K} \phi_i^k)$$
   – si $t = a$, alors :
   $$\{\bigwedge_{k\in K} \phi_i^k\} \models \psi_j \text{ et } (\text{si type} = \Leftrightarrow, \{\neg\psi_j\} \models \bigwedge_{k\in K} \phi_i^k)$$
2. *si $\phi \equiv \Phi$ où $\Phi = \phi^1 \wedge \ldots \wedge \phi^n$ sa FCNC de ϕ, et $\psi = \star_2(\psi_1, \ldots, \psi_{\rho(\star_2)})$, alors $\Upsilon^{\star_2}_\emptyset(\phi, \psi, type) = \top$ si, et seulement si, $\forall S \in \langle d, a\rangle^{\star_2}_\emptyset$, $\exists (j, t) \in S, \exists K \subseteq [|1, n|]$:*
   – si $t = d$, alors :
   $$\{\bigwedge_{k\in K} \phi^k\} \models \neg\psi_j \text{ et } (\text{if type} = \Leftrightarrow, \{\neg\psi_j\} \models \bigwedge_{k\in K} \phi^k)$$
   – si $t = a$, alors :
   $$\{\bigwedge_{k\in K} \phi^k\} \models \psi_j \text{ et } (\text{if type} = \Leftrightarrow, \{\psi_j\} \models \bigwedge_{k\in K} \phi^k)$$

Nous pouvons désormais définir les attaques modales standards de l'argumentation fondée sur les logiques modales.

Définition 14 (Types d'attaques modales)**.** *Soit $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$ un type de similarité, et $\langle d, a\rangle$ un mapping modal consistant sur le τ-cadre, et $(\star, \star_2) \in (\mathcal{O}^\Omega \cup \{\emptyset\}) \times \mathcal{O}^\Omega$,*
*Un argument A est un $\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$*rebuttal modal direct *pour B, noté $(A, B) \in$ Reb $\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$ si, et seulement si, $A = (_, \phi)$, $B = (_, \star_2(\psi_1, \ldots, \psi_{\rho(\star_2)}))$ et $\Upsilon^{\star_2}_\star(\phi, \star_2(\psi_1, \ldots, \psi_{\rho(\star_2)}), \Leftrightarrow) = \top$.*
*Un argument A est $\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$*undercut modal direct *pour B, noté $(A, B) \in$ Und $\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$ si, et seulement si, $A = (_, \phi)$, $B = (\Psi, _)$, il existe $\psi \in \Psi$, $\psi = \star_2(\psi_1, \ldots, \psi_{\rho(\star_2)})$, $\Upsilon^{\star_2}_\star(\phi, \star_2(\psi_1, \ldots, \psi_{\rho(\star_2)}), \Leftrightarrow) = \top$.*
Un argument A est un defeater modal direct *$\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$ pour B, noté $(A, B) \in$ Def $\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$ si, et seulement si, $A = (_, \phi)$, $B = (\Psi, _)$, il existe $\psi \in \Psi$, $\psi = \star_2(\psi_1, \ldots, \psi_{\rho(\star_2)})$, $\Upsilon^{\star_2}_\star(\phi, \star_2(\psi_1, \ldots, \psi_{\rho(\star_2)}), \Rightarrow) = \top$.*
Nous définissons une $\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$ attaque modale *comme :*

$$Att\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star = \text{Reb } \langle d, a\rangle^{\star_2}_\star \cup \text{Und } \langle d, a\rangle^{\star_2}_\star \cup \text{Def } \langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$$

Les attaques sur les opérateurs nullaires sont considérées comme pour les formules factuelles. En effet, les opérateurs nullaires sont vrais dans des mondes spécifiques quelque soit les modèles du cadre. Nous pouvons donc les considérer comme des formules propositionnelles, i.e. factuelles.

5.3 VAF fondés sur les logiques modales

Nous appelons τ-VAF un VAF fondé sur le système GK.

Définition 15 (AF fondé sur la logique modale)**.** *Soit $\tau = (\mathcal{O}, \rho)$. Un τ-*AF *est un tuple $\langle \mathcal{C}, \langle d, a\rangle, \mathcal{A}, \mathcal{R}\rangle$ où $\mathcal{C}$ est un τ-cadre, et $\langle \mathcal{A}, \mathcal{R}\rangle$ est un AF t.q. $\mathcal{A}$ contient seulement des arguments valides sur $\mathcal{C}$, $\langle d, a\rangle$ est un mapping modal consistant, et $\mathcal{R} =$ Reb $\cup$ Und $\cup$ Def $\bigcup_{(\star,\star_2)\in(\mathcal{O}^\Omega\cup\{\emptyset\})\times\mathcal{O}^\Omega} Att\langle d, a\rangle^{\star_2}_\star$.*
Nous appelons un τ-VAF un N-uplet $\langle \mathcal{C}, \langle d, a\rangle, \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{V}al, \mu, \succ\rangle$ qui est un τ-AF et $\langle \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{V}al, \mu, \succ\rangle$ est un VAF.

©AFIA2022

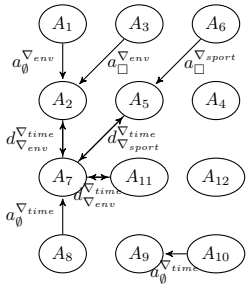


FIGURE 1 – Graphe d'argumentation

Exemple 11. *Notre exemple est décrit par le τ-VAF de la figure 1. Les attaques modales sont données avec leur type de mapping modal. Nous supposons μ est t.q. pour tout $\star \in \{\square, \Diamond, \nabla, \triangle\}$ et $\forall \phi, \psi \in \mathcal{L}$: (1) $\mu(_, \star_{sport}(\phi, \psi)) = \nu_{health}$; (2) $\mu(_, \star_{env}(\phi, \psi) = \nu_{env}$; (3) $\mu(_, \star_{time}(\phi, \psi)) = \nu_{eco}$; (4) $\forall \phi, \psi \in \mathcal{L}$, $\mu(_, \star_{gov}(\phi, \psi)) = \nu_{aut}$; (5) $\mu(_, \square\phi) = \emptyset$; (6) $\forall A \in \mathcal{A}$ qui n'est pas de la forme $(_, \star(\ldots))$, $\mu(A) = \emptyset$. Ainsi, $\mu = \{(A_1, \emptyset), (A_2, \nu_{env}), (A_3, \emptyset), (A_4, \emptyset), (A_5, \nu_{health}), (A_6, \emptyset), (A_7, \nu_{eco}), (A_8, \emptyset), (A_9, \nu_{env}), (A_{10}, \emptyset), (A_{11}, \nu_{env}), (A_{12}, \nu_{aut})\}$. Considérons ensuite les préférences suivantes : $\emptyset \succ \nu_{health} \succ \nu_{aut} \succ \nu_{env} \succ \nu_{eco}$. Ainsi, certains arguments comme A_7 sont defaits par A_2, A_5, A_{11} et sont associés à une valeur préférée. La VAF-attaque $= \{(A_1, A_2), (A_3, A_2), (A_6, A_5), (A_5, A_7), (A_2, A_7), (A_{11}, A_7), (A_8, A_7), (A_{10}, A_9)\}$. Enfin, considérons l'extension stable $\mathcal{E}$: $\mathcal{E} = \{\{A_1, A_3, A_4, A_6, A_8, A_{10}, A_{11}, A_{12}\}\}$. Le résultat conclut que l'utilisateur ne peut pas prendre son vélo puisqu'il n'a pas de vélo. Puisqu'il n'y a pas d'embouteillage et pas d'urgence, l'utilisateur n'a pas besoin de prendre sa voiture pour réduire son temps de trajet. Pour l'environnement, il est meilleur de prendre les transports publics ou marcher. Cependant, puisqu'il y a une crise sanitaire, il est recommandé de ne pas prendre les transports publics. Ainsi, la décision éthique est marcher.*

Même si nous n'explicitons pas le modèle de décision, nous pourrions utiliser une fonction $\mathcal{F}_f$ (resp. $\mathcal{F}_c$) assignant une décision à un ensemble d'arguments qui la supporte (resp. ne la supporte pas) [3] (e.g. une décision peut être éthique si elle est supportée crédulement, i.e. au moins un argument supporte la décision et appartient à au moins une extension).

6 Conclusion

Nous avons proposé de modéliser le raisonnement éthique avec un cadre d'argumentation valué, appelé τ-VAF, fondé sur une logique modale normale généralisée aux opérateurs n-aires (pour raisonner avec des opérateurs déontiques dyadiques). Cela nous a conduit à proposer de nouveaux types d'attaques, appelées les attaques modales, qui généralisent les attaques logiques standard. Les travaux futurs consisteront à instancier un τ-VAF avec une logique modale comme DL-MA [19] ou avec une logique de description déontique comme celle proposée dans [13].

Références

[1] L. Amgoud. Postulates for logic-based argumentation systems. *IJAR*, 55(9) :2028–2048, 2014.

[2] L. Amgoud and P. Besnard. A formal analysis of logic-based argumentation systems. In *4th SUM*, pages 42–55, 2010.

[3] L. Amgoud and H. Prade. Using arguments for making and explaining decisions. *AI*, 173(3) :413–436, 2009.

[4] O. Arieli and C. Straßer. Sequent-based logical argumentation. *A & C*, 6(1) :73–99, 2015.

[5] K. Atkinson and J. M. Bench-Capon. Addressing moral problems through practical reasoning. *J. Appl. Log.*, 6(2) :135–151, 2008.

[6] T. Bench-Capon. Persuasion in practical argument using value-based argumentation frameworks. *JLC*, 13(3) :429–448, 2003.

[7] P. Besnard and A. Hunter. Practical first-order argumentation. In *20th AAAI*, pages 590–595, 2005.

[8] P. Besnard and A. Hunter. Argumentation based on classical logic. In Guillermo Simari and Iyad Rahwan, editors, *Argumentation in artificial intelligence*, pages 133–152. Springer, 2009.

[9] P. Blackburn, M. De Rijke, and Y. Venema. *Modal logic : graph. Darst*, volume 53. Cambridge University Press, 2002.

[10] A.-M. Borg and O. Arieli. Hypersequential argumentation frameworks : An instantiation in the modal logic S5. In *17th AAMAS*, pages 1097–1104, 2018.

[11] M. Caminada and D. Gabbay. A logical account of formal argumentation. *Stud. Log.*, 93(2-3) :109, 2009.

[12] N. Cointe, G. Bonnet, and O. Boissier. Ethical judgment of agents' behaviors in multi-agent systems. In *15th AAMAS*, pages 1106–1114, 2016.

[13] T. Dalmonte, A. Mazzullo, and A. Ozaki. On non-normal modal description logics. In *32nd DL*, page 14, 2019.

[14] P. M. Dung. On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games. *AI*, 77(2) :321–357, 1995.

[15] J. Greene and J. Haidt. How (and where) does moral judgment work ? *Trends Cogn. Sci*, 6(12) :517–523, 2002.

[16] D. Grossi. On the logic of argumentation theory. In *9th AAMAS*, pages 409–416, 2010.

[17] J. Haidt. The emotional dog and its rational tail : a social intuitionist approach to moral judgment. *Psychol. Rev.*, 108(4) :814–834, 2001.

[18] J. F. Horty. Moral dilemmas and nonmonotonic logic. *J. Philos. Log.*, 23(1) :35–65, 1994.

[19] E. Lorini. On the logical foundations of moral agency. In *11th DEON*, pages 108–122, 2012.

[20] H. Prakken. An abstract framework for argumentation with structured arguments. *A & C*, 1(2) :93–124, 2010.

[21] H. Prakken and M. Sergot. Dyadic deontic logic and contrary-to-duty obligations. In *Defeasible deontic logic*, pages 223–262. Springer, 1997.

[22] C. Proietti, D. Grossi, S. Smets, and F. R. Velázquez-Quesada. Bipolar argumentation frameworks, modal logic and semantic paradoxes. In *7th LORI*, pages 214–229, 2019.

[23] M. Timmons. *Moral theory : an introduction*. Rowman & Littlefield Publishers, 2012.

Quelques réflexions autour de la notion de bêtise artificielle

J. Lieber[1], J.-G. Mailly[2], P. Marquis[3, 4], H. Prade[5], F. Rollin

[1] Université de Lorraine, CNRS, Inria, LORIA, F-54000 Nancy
[2] Université Paris Cité, LIPADE, F-75006 Paris
[3] Univ. Artois, CNRS, CRIL, F-62300 Lens
[4] Institut Universitaire de France
[5] IRIT, Toulouse

jean.lieber@loria.fr, jean-guy.mailly@u-paris.fr, marquis@cril.univ-artois.fr,
prade@irit.fr, francoisrollin3@icloud.com

La bêtise est souvent l'ornement de la beauté ; c'est elle qui donne aux yeux cette limpidité morne des étangs noirâtres et ce calme huileux des heures tropicales.

Charles Baudelaire, *Journaux intimes* (1887)

Résumé

Le professeur Rollin a écrit au sujet de la bêtise artificielle. Pouvions-nous rester indifférent à cela ? Cet article montre le contraire.

Mots-clés

Bêtise artificielle, intelligence artificelle

Abstract

Professor Rollin wrote about artificial stupidity. Could we remain indifferent to this ? This article shows the contrary.

Keywords

Artificial stupidity, artificial intelligence

1 Introduction

Dans un ouvrage paru récemment et consacré à la notion de bêtise, François Rollin consacre un chapitre intitulé « BA ? » et consacré à la *bêtise artificielle* [1]. Si on voit la bêtise comme une « intelligence en creux », cela suggère des liens forts entre BA et IA, d'où l'intérêt pour la communauté de l'IA de se pencher sur cette question.

Mais comment pourrait-on définir la BA ?

La thèse que François Rollin développe est, en substance, qu'alors qu'un système d'IA doit effectuer des opérations de tri dans les données et d'adaptation sur ces données, un système de BA s'abstiendra d'un de ces deux types d'opérations. Il en conclut qu'un système de BA pourrait être un système associant à une question une réponse sans lien avec elle et que la mise en place d'un système de BA serait facile. Il illustre cette idée par des exemples, dont ceux-ci :

> Comment résoudre une équation du second degré ? Réponse de la machine : en faisant manger à tous les centenaires de la région Hauts-de-France six kilos de cœur d'artichaut par jour pendant huit semaines. Combien d'étoiles y a-t-il au total dans l'Univers à 20% près ? Réponse : 8.

Cette thèse nous a interpellés et cet article présente quelques réflexions à ce sujet. La bêtise est un sujet peut-être encore plus fascinant que l'intelligence, au vu du nombre considérable d'ouvrages célébrant, interrogeant, dénonçant la bêtise.

Cet article est organisé comme suit. La section 2 tente de cerner la notion de bêtise. Puis, quelques bêtises faites par des êtres humains ou des machines seront discutées (section 3). On s'intéressera ensuite à la notion de système de BA. À son sujet, les deux questions suivantes peuvent se poser à des spécialistes de l'IA :

- Pourquoi construire (sciemment) un système de BA ?
- Comment construire un tel système ?

Les sections 4 et 5 abordent ces deux questions. Après une conclusion provisoire (section 6), les quatre premiers auteurs laissent la parole au cinquième : François Rollin *himself*.

2 Cerner la notion de bêtise

Une approche possible pour cerner la « bêtise artificielle » est de procéder par une mise en contraste avec « l'intelligence artificielle (IA) ».

2.1 Un point de vue anthropocentré

Il s'agit alors de commencer par préciser ce qu'il faut comprendre par « intelligence artificielle ». Et dans une telle tentative, on se heurte immédiatement à la question épineuse de devoir définir ce que recouvre « l'intelligence ». Pour ce faire, on contourne le plus souvent la difficulté en faisant *référence à l'humain*, qui présente la forme d'intelligence sans doute la plus aboutie, en tout cas la plus polymorphe.

Le test de Turing [2] va dans le sens d'un tel jeu d'imitation : un processus est vu comme « intelligent » quand celui qui l'observe ne peut pas prédire s'il est le fait d'un être humain ou d'une machine. Ainsi, l'attribut « artificiel » ne pose pas de souci spécifique dans l'élaboration d'une définition (« artificiel » signifie seulement que le processus « intelligent » qui est analysé est produit par une machine). Seule « l'intelligence » pose question.

©AFIA2022

On notera au passage que la comparaison à l'humain pour tenter de s'en sortir et caractériser « l'intelligence » par une opposition pré-existait au test de Turing. Ainsi, pour René Descartes [3, cinquième partie], « l'intelligence » (au sens de la raison) est l'apanage de l'humain, c'est ce qui sépare l'Homme de l'animal. Le bêtise serait donc *a contrario* le propre de l'animal (ce qui explique l'étymologie du mot « bêtise » et les nombreuses références à l'animal quand il s'agit de parler d'âneries...). La thèse de Descartes est évidemment discutable : la raison n'est qu'une forme d'intelligence parmi d'autres et, d'un point de vue biologique, l'être humain est un animal parmi d'autres. Aujourd'hui, dans le champ disciplinaire qu'est l'IA, quand on met en avant des algorithmes dits bio-inspirés mettant en œuvre une forme d'intelligence collective, on mentionne le plus souvent des sociétés animales (comme c'est le cas pour les colonies de fourmis), mais pas des sociétés humaines. Est-ce parce qu'elles présentent des comportements trop complexes pour être modélisées de façon satisfaisante ou parce que la valeur ajoutée par le collectif est finalement trop limitée pour être notable ? Chacun peut avoir un point de vue sur la question.

2.2 Être bête

La bêtise (au sens de la capacité à être bête ou plutôt de l'incapacité à ne pas être bête) a souvent été définie en creux comme une déficience des capacités intellectuelles (en particulier, comme le veulent cette fois l'étymologie de l'« intelligence » et les tests de QI, le manque d'aptitudes à établir des liens). Sans surprise, la référence au développement intellectuel chez l'Homme a servi de repère pour établir au XIX^{e} siècle une gradation de la bêtise [4], où l'idiot est celui qui ne peut pas communiquer par la parole, l'imbécile celui qui est incapable de lire et d'écrire et le sot, celui qui ne raisonne ni ne se comporte de manière normale. Comme l'écrivait Eugène Marbeau : « La bêtise ne comprend pas ; la sottise comprend de travers » (*in* Livre d'or de la Comtesse Diane, 1886).

Pour qu'un agent (qu'il soit humain ou artificiel) puisse être qualifié de bête, il ne suffit évidemment pas qu'il produise une bêtise de temps en temps (à ce compte-là, tous les humains seraient stupides), mais que l'agent concerné *persiste dans ses erreurs*, même quand une interaction soutenue avec son environnement lui fournit suffisamment d'arguments valables pour qu'en principe, les erreurs ne soient pas reproduites. Les agents artificiels ont à ce titre une prédisposition plus grande à la bêtise que les agents humains, simplement parce que leur interaction avec leur environnement est typiquement beaucoup plus réduite, voire inexistante (les agents artificiels ne sont pas tous munis de capteurs et d'effecteurs) mais aussi parce que leur force est précisément de pouvoir répéter sans se lasser (et très rapidement) les mêmes traitements et en conséquence de répéter les mêmes erreurs. On peut noter que cette idée de la bêtise liée à la persistance de l'erreur fait partie des points étudiés en détail dans l'ouvrage de François Rollin cité en introduction [1], même s'il n'est guère mis en avant dans le chapitre sur la BA.

La bêtise prenant des formes très variées, il est sans doute illusoire de vouloir caractériser précisément ce qu'est être bête. On peut néanmoins retenir cette idée de persistance dans l'erreur comme un de ses traits marquants. L'immutabilité des croyances nous sort de la condition humaine, et de sa capacité à savoir en interrogeant ses savoirs antérieurs pour les remettre en question chaque fois que nécessaire. Elle nous rapproche une fois de plus de l'animal, en particulier, de l'autruche (dont la politique pourrait être de ne rien voir pour ne rien savoir) voire du sur-humain comme le laisse entendre la célèbre citation latine *errare humanum est, perseverare diabolicum*. Pour laisser le dernier mot à Eugène Marbeau : « La sottise se croit très habile, et ne doute de rien. » (*Pensées et maximes diverses*, 1906).

2.3 Faire des bêtises

Définir ce qu'est une bêtise est sans doute beaucoup plus simple que de définir ce qu'est être bête. Lançons-nous donc dans une tentative de cerner les bêtises.

Une bêtise peut être vue comme le résultat d'un processus « intelligent » qui a mal tourné, qu'il s'agisse d'un processus de raisonnement ou de prise de décision ; ce résultat est simplement faux ou inadapté, parce qu'il s'appuie sur des informations qui le sont tout autant ou parce qu'il est engendré en utilisant des règles de raisonnement fallacieuses ou en passant par des chemins de traverses, ou encore parce qu'il s'appuie sur un modèle décisionnel irrationnel. Supposer au départ l'existence d'un processus « intelligent » qui aurait pu convenir permet de séparer les bêtises des absurdités, qui, elles, seraient produites par des processus totalement non pertinents. Ainsi, à la question « Combien font 12345 fois 67890 ? », une réponse comme « Stéphanie de Monaco » ne serait pas juste bête, mais bien absurde. Et un agent qui répondrait systématiquement « Stéphanie de Monaco » à toute question posée (sauf éventuellement quand la bonne réponse pourrait être « Stéphanie de Monaco »...) [1] serait assurément jugé stupide.

Pour illustrer la production de bêtises comme résultat d'un processus « intelligent » inadapté, considérons les deux exemples suivants (l'un lié au raisonnement, l'autre à la prise de décision) :

> *Tous les chats sont mortels, Socrate est mortel, donc Socrate est un chat.*
>
> Eugène Ionesco, *Rhinocéros*.

Ici, les informations utilisées sont correctes, c'est l'inférence qui ne l'est pas : en l'espèce, elle est abductive, pas déductive, et donc peut aboutir à des conclusions erronées (comme c'est le cas ici).

Voici un autre exemple (un dialogue entre deux amis) :

— *J'ai lu dans un magazine que ma consommation d'alcool (une bouteille de Bordeaux par jour) est excessive et pourrait nuire gravement à ma santé.*
— *Sans doute. Qu'as-tu fait alors ?*
— *J'ai arrêté de lire.*

Dans ce cas, la décision prise est inattendue et sans doute inadaptée.

Décider du caractère erroné ou inadéquat du résultat requiert une *comparaison à une norme*. Selon une certaine « distance » à un point de référence, le résultat en question pourra être jugé approprié ou non, et le processus l'ayant produit sera considéré comme (plus ou moins) « intelligent » ou « bête ». La distance en question peut alors susciter chez celui ou celle

1. Comme le personnage de Véronique dans le sketch « Télémagouilles » des Inconnus.

qui la mesure des sentiments variés, du courroux, du rire, voire de l'émerveillement.

Notons que la norme employée pour mesurer l'adéquation du résultat produit par le processus de raisonnement ou de prise de décision considéré peut être *universelle* (la logique mathématique permet, par exemple, de séparer les raisonnements valides de ceux qui ne le sont pas) ou ne pas l'être (il n'existe pas de modèle unique et consensuel pour caractériser ce qu'est une prise de décision raisonnable). Cette norme est surtout souvent *relative à un contexte*, en particulier à la personne qui reçoit la bêtise et décide de la classer comme telle ; et cela est fonction de ses aptitudes propres, ce qui fait que ce qui est bêtise pour un individu donné ne l'est pas forcément pour un autre. Prenons un exemple pour lequel une norme universelle existe : il s'agit encore de multiplier 12345 par 67890. Il n'y a qu'un seul vrai résultat possible : le produit recherché vaut 838102050. Le résultat -1 produit par l'individu A pourra être considéré comme stupide par toute personne ayant un petit bagage mathématique, le résultat 838102051 produit par l'individu B, tout aussi erroné, sera peut-être considéré comme une erreur de calcul par certains et comme une bêtise par d'autres (on pourra observer que comme 67890 finit par un 0, le produit recherché doit lui aussi finir par un 0), le résultat 838012050 produit par l'individu C, tout aussi faux, sera sans doute perçu comme moins bête. C'est cette « distance » au résultat escompté (peut-être incorrect lui aussi) qui fait qu'une simple erreur acquiert le statut de bêtise.

On notera au passage que, pour ce genre de tâches, les humains, à cause de leurs limitations cognitives, sont souvent beaucoup plus bêtes que des machines élémentaires comme des calculettes. La capacité des humains à raisonner correctement avec des nombres (et, en particulier, avec des probabilités) est réduite et connue comme telle depuis longtemps. Dans son ouvrage [5], le mathématicien américain John Allen Paulos a introduit le néologisme « *innumeracy* » pour désigner cette incapacité (l'« *innumeracy* » est aux nombres ce que l'« *illiteracy* » – en français, l'analphabétisme – est aux lettres). La période pandémique que nous traversons depuis deux ans a conduit à un florilège d'erreurs de raisonnement, comme celle de refuser la vaccination par le fait (avéré) qu'il y a plus de cas graves de la COVID parmi les vaccinés que parmi les non-vaccinés, mais vu comme un argument (fallacieux) qui soutiendrait le fait que la probabilité de faire une COVID grave en étant vacciné serait supérieur à celui de faire un COVID grave en ne l'étant pas (évidemment, l'erreur vient du fait que le nombre de personnes vaccinées et de personnes non vaccinées n'est pas le même !). De telles erreurs de raisonnement peuvent malheureusement conduire à des issues tragiques, comme cela se produit dans d'autres cadres tel le cadre juridique (voir le passionnant ouvrage [6]).

Plus généralement, il est bien connu en théorie de la décision que des systèmes de postulats de *rationalité* qui pouvaient sembler raisonnables pour décrire le comportement d'un décideur, ont rencontré des situations où l'application du critère de décision qui en découlait ne correspondait pas à la conduite de la majorité des décideurs [7].

Evidemment, si les machines dépassent largement les humains quand il s'agit de faire des calculs, leur intelligence est beaucoup moins polymorphe : elles ne savent rien faire d'autre ! Si intelligence il y a, c'est surtout celle des humains qui les conçoivent et les programment qu'il faut mettre en avant. En particulier, une calculette n'a pas plus conscience des opérations qu'elle réalise et de ce qu'est un nombre, qu'une horloge comtoise n'a du temps qui s'égrène, ou qu'un programme de reconnaissance faciale (voir à ce sujet la section 3.3) n'a d'un visage et de ce qui le constitue.

On pourra enfin garder en tête que les humains peuvent parfaitement percevoir comme bêtes des processus de raisonnement qui ne le sont pas du tout mais au contraire collent parfaitement à la norme universelle quand elle existe. Ainsi, la validité d'un raisonnement ne dépend que de la capacité de sa conclusion à être vraie dans tous les cas de figure où ses prémisses le sont, et absolument pas de la vérité des prémisses et conclusion en présence. En particulier, quand les prémisses sont fausses, toutes les conclusions s'ensuivent. Pour reprendre un exemple célèbre et paraphraser le grand logicien Bertrand Russell : « Si $2+2=5$ alors je suis le Pape. » En effet, on sait que l'on peut retirer des deux membres d'une équation comme $2+2=5$ la même quantité, disons 3, en préservant la validité de l'équation. Ainsi, de l'hypothèse $2+2=5$, on déduit $1=2$. Or, le Pape et moi sommes deux. Mais si $1=2$, alors nous sommes la même personne : je suis le Pape. Ce raisonnement est valide, il respecte les canons de la logique classique et pour autant, il apparaît comme dénué de sens (en particulier, parce que ses prémisses et sa conclusion n'ont aucun lien).

3 La bêtise est la chose du monde la mieux partagée [2]

3.1 Un bel exemple de bêtise humaine

Une histoire qui circule concerne un problème de mathématiques simple qu'un étudiant aurait résolu de façon surprenante, créative, mais fausse (une belle bêtise). Le problème (un peu reformulé) était celui du calcul de

$$\lim_{x\to 0} \frac{1}{5x^2}$$

Il semblerait que l'étudiant se soit rappelé de la solution d'un exercice similaire :

$$\lim_{x\to 0} \frac{1}{8x^2} = +\infty$$

Afin de laisser à la lectrice / au lecteur la possibilité d'imaginer la solution de l'étudiant, nous l'avons mise en fin d'article, en annexe A : la suite de la section fait l'hypothèse que vous êtes allé(e) lire cette annexe.

Maintenant, on peut imaginer ce que cela supposerait comme compétences pour une IA de générer des réponses telles que celle-là (une classe de bêtises, plutôt qu'une bêtise individuelle qu'il est toujours possible d'afficher simplement) et de façon involontaire (i.e., un système d'IA qui ne soit pas conçu pour générer des bêtises, mais qui en génère malgré le concepteur). On imagine qu'un système capable de générer la bêtise de l'étudiant doit à la fois travailler sur une représentation d'expressions mathématiques (par une structure arborescente, par exemple) et sur une représentation visuelle, avec des liens

2. Ce qui n'empêche pas le bon sens de l'être également.

©AFIA2022

entre ces représentations. De notre point de vue, la construction d'une telle IA n'aurait rien de triviale !

3.2 Des IA bêtes

Un programme d'IA – une IA – ne fait que ce pourquoi il – elle – est programmée. On conçoit facilement qu'un programme sophistiqué puisse faire des choses qu'on jugera remarquables, en matière de résolution de problèmes, ou de reconnaissance de formes, faisant par là montre d'« intelligence » (artificielle). Des programmes très simples peuvent cependant donner le change. C'est le cas en particulier du programme ELIZA [8] qui dès le milieu des années 1960, simulait un entretien avec un thérapeute en reformulant ce que disait le « patient » sous forme de questions et relançait le dialogue avec des phrases toutes faites faisant écho à ce que venait de dire le patient. Il est clair que quand ELIZA déclarait « Je comprends », faute d'être capable d'une réponse plus adaptée au contexte du dialogue, elle bluffait totalement l'interlocuteur, alors qu'il s'agissait d'un système des plus bêtes.

Cette question des IA qui peuvent sembler « réalistes » à leurs utilisateurs, tout en s'appuyant sur des techniques très simples (voire simplistes) s'est longtemps retrouvée dans de nombreux jeux vidéos. Comme précisé dans [9, Section 1.2.2], dans les premiers temps, l'IA des jeux vidéos était généralement fondée sur des scripts pré-établis. Cela limite grandement les comportement des personnages non joueurs (PNJ, c'est-à-dire les personnages du jeu contrôlé par la machine). Le résultat est que, malgré les progrès importants réalisés par l'IA dans le domaine des jeux vidéos, il y a encore aujourd'hui de nombreux joueurs se plaignant de la bêtise des PNJ [3], y compris parmi les joueurs professionnels qui identifient les phases scriptées dans le déroulement du jeu [4]. Une conséquence à cela est qu'il est possible, pour un joueur suffisamment expérimenté, d'anticiper le comportement à venir de l'IA.

3.3 Des IA qui disent des bêtises (ou sont utilisées bêtement)

Le cas Dong Mingzhu, ou l'IA bête et méchante. Dong Mingzhu est une femme d'affaires chinoise, à la tête d'une entreprise importante dans le domaine de la climatisation. Pour promouvoir son entreprise, elle a réalisé une campagne de publicité. Son portrait s'est ainsi retrouvé affiché dans les transports publics, sur des bus urbains. Or, en République Populaire de Chine, la vidéo-surveillance s'est généralisée. Une multitude de caméras et des algorithmes d'IA de reconnaissance de visages permettent à la puissance publique de détecter celles et ceux de leurs citoyens qui commettent des délits ou simplement des incivilités, comme traverser la chaussée quand c'est aux véhicules de passer. Un système de crédit social est en place et quand une incivilité est repérée, la personne l'ayant commise se voit retirer des points (et à un moment, perd par exemple la possibilité d'utiliser les transports publics). Dong Mingzhu a très vite perdu ses points car chaque fois qu'un bus affichant son portait passait devant une caméra de surveillance, le système d'IA en place concluait, à tort, que Dong Mingzhu avait traversé la route alors qu'elle n'en avait pas le droit. Ce scénario illustre bien à la fois la très grande qualité des algorithmes de reconnaissance faciale utilisés (ils ne sont pas intrinsèquement bêtes) mais aussi l'immense bêtise produite ici par le système d'IA utilisé, due à l'absence totale de contextualisation de la prise de décision.

Le traitement automatique de la langue (qui fourche). Pouvoir réaliser automatiquement (par algorithme) et de façon satisfaisante des tâches de traitement de la langue, comme les dialogues à base d'agents conversationnels animés (ou autres *bots*), le résumé ou la traduction d'une langue à une autre requiert une aptitude à comprendre, qui n'est pas acquise par les systèmes d'IA qui restent dénués de connaissances de bon sens sur le monde dans lequel on vit. Les outils de traduction automatique disponibles en ligne et que vous connaissez tous sont de formidables outils (les meilleurs disponibles) pour réaliser des traductions « superficielles ». Ils ne sont pas du tout bêtes mais pour autant, ce sont des générateurs de bêtises dont on peut s'amuser.

La résolution d'anaphores (en particulier, la satisfaction des références pronominales) est un problème difficile qui, pour pouvoir être résolu correctement, demande de disposer (et de savoir raisonner sur) des connaissances du monde. Ce problème est à la base des schémas de Winograd [10], qui peuvent être employés comme variantes au test de Turing.

Essayez par exemple d'utiliser un outil de traduction automatique disponible en ligne pour traduire de l'anglais vers le français la phrase suivante :

`"An AI algorithm cannot produce such a sillyness since` **`it`** `is too comic."`

La traduction résultante (via un outil bien connu et largement utilisé) est :

`« Un algorithme d'IA ne peut pas produire une telle bêtise car` **`il`** `est trop comique. »`

Ici, l'erreur est sur la référence du pronom « *it* ». Au départ, c'est la bêtise qui se veut trop comique, au final c'est l'algorithme d'IA qui l'est. Ce qui n'est pas tout à fait faux s'il s'agit de l'algorithme utilisé pour réaliser cette traduction.

Voici un autre exemple. Essayez de traduire en anglais la phrase suivante (qui présente un argument dont la justification est assez discutable) avec un outil de traduction automatique :

`La bêtise précède souvent l'intelligence. C'est normal, « bêtise » commence par un « b » et « intelligence » par un « i ».`

Une fois traduite en anglais, cela donne :

`Stupidity often precedes intelligence. This is normal, "stupidity" begins with a "b" and "intelligence" with an "i".`

La justification de l'argument traduit est encore plus discutable... L'algorithme d'IA ne sépare pas ici les lectures *de re* et *de dicto*, en dépit des guillemets utilisés.

Les outils de traduction automatique fournissent aussi des résultats amusants quand ils s'essaient à corriger nos erreurs... en en produisant à la place. Ainsi, la suite de mots

`Veille technologique.`

qui, une fois traduite automatiquement en anglais, devient :

`Old technology.`

Statistiquement, les mots « vieille » et « technologie » devraient apparaître plus souvent ensemble que les mots « veille » et

3. `https://tinyurl.com/52mnzf85`
4. `https://tinyurl.com/yckpy784`

« technologique », d'où l'erreur produite. Elle est cocasse car typiquement, quand on se lance dans une « veille technologique », c'est parce qu'on est en quête d'une technologie qui serait tellement récente qu'on ne la connaît pas encore, et donc pas d'une technologie qui serait désuète.

Bien entendu, la traduction est une tâche ardue ; il n'y a en règle générale, pour un texte un peu complexe, pas de traduction idéale, parfaite et ainsi les bêtises qui sont produites ne reflètent pas une distance trop importante par rapport à une norme qui serait universelle [5], mais plutôt un écart à ce qui est généralement attendu. Parmi les difficultés rencontrées figurent les ambiguïtés inhérentes au langage naturel qui peuvent se manifester dans la syntaxe même des phrases. Ainsi, la phrase (un classique du genre) « La petite brise la glace » est ambiguë puisque sa signification n'est pas du tout la même selon que l'on considère que le verbe est « brise » ou que le verbe est « glace ». Prise en dehors d'un contexte qui permettrait de supprimer une des deux hypothèses possibles, cette phrase n'est pas traduisible puisque son propre sens dans sa langue d'origine n'est pas déterminé. Il est amusant d'observer comment les outils de traduction automatique s'en sortent avec ce type de phrases. Pour celle-ci, le résultat est surprenant :

```
The little icebreaker
```

qui signifie littéralement « Le petit brise-glace ». On se retrouve immédiatement transportés en hiver sur les bords de la Volga !

On pourrait multiplier les exemples. Les algorithmes d'IA ne comprenant pas les textes qu'ils traitent, le sens caché éventuel de ces textes reste inaccessible, même quand leur prise en compte est indispensable, comme dans les jeux de mots, calembours ou autres contrepèteries. Ainsi, « l'art de décaler les sons » une fois traduite en anglais devient "*the art of shifting sounds*", perdant au passage son statut de contrepèterie. La phrase devient clairement moins drôle ! Les chansons à double écoute, comme « Mon père et ses verres » de Boby Lapointe ou « La jeune fille du métro » de Colette Renard sont évidemment hors de portée d'une traduction automatique qui préserverait la double écoute possible.

4 Pourquoi construire un système de BA ?

La construction effective d'un système de BA peut être vue comme un exercice assez vain. Néanmoins, cette section réunit quelques raisons pour lesquelles on pourrait vouloir se lancer dans une telle aventure.

4.1 Dans l'optique de la réussite du test de Turing

Comme on l'a vu, le test de Turing vise à vérifier qu'un système automatique pourrait tromper des humains en leur faisant croire qu'il est humain lui-même, sous certaines conditions d'interaction [2]. Si un tel système répond trop intelligemment à une question, il risque d'échouer à ce test. Pour reprendre un exemple de la section 2.3, si un interlocuteur-machine répondant à la question « $12345 \times 67890 = ?$ » très rapidement et de façon correcte, il devrait échouer dans sa tromperie. Une réponse suffisamment éloignée du résultat sans être complètement absurde pourrait être une bêtise qui tromperait l'examinateur humain [6]. Ainsi, avec le but de la tromperie qu'induit le test de Turing, si l'on veut faire un système informatique réalisant ce test, celui-ci devrait relever de l'IA *et* de la BA. Et si on accepte le test de Turing comme une caractérisation de l'intelligence, cela conduit à accepter la bêtise comme une part de l'intelligence.

4.2 Bêtises délibérées

On pourrait imaginer un système d'IA qui produirait des bêtises de manière délibérée, peut-être dans l'esprit de [11]. On peut imaginer au moins deux raisons à cela :

- pour détendre l'atmosphère, pour faire rire l'interlocuteur, s'il s'agit d'un robot de compagnie.
- pour tromper, ou pour décontenancer un interlocuteur qui, par exemple, s'énerverait.

Il s'agit évidemment de défis très durs pour l'IA ! La compréhension et la génération automatique d'histoires drôles sont des problèmes très compliqués [12, 13].

4.3 La bêtise créative

Si séparer le vrai du faux est le Graal de la démarche scientifique et est indispensable « pour marcher avec assurance en cette vie » (pour paraphraser René Descartes), il ne faut pas avoir peur de se tromper, de faire des bêtises. La bêtise est féconde. C'est en en faisant que l'on apprend.

L'erreur est, en effet, source de création. L'Histoire regorge de scénarios où des maladresses ont conduit à des réussites, que l'on pense aux bêtises de Cambrai, à la tarte Tatin, ou pour quitter le domaine culinaire tout en restant dans la sérendipité, à la découverte du procédé de la vulcanisation par Charles Goodyear au XIX^{e} siècle. Bien sûr, pour qu'une erreur soit fructueuse, il faut ensuite de l'intelligence pour reconnaître l'existence d'un potentiel à exploiter dans la situation créée par l'erreur. Ainsi, une erreur dans une preuve mathématique se révélera féconde si sa découverte peut conduire à une approche nouvelle du problème.

Chez l'humain, depuis la petite enfance, l'apprentissage passe ainsi par des phases d'essais et erreurs, par des généralisations abusives que l'éducation, l'enseignement, la raison permettent (parfois) de corriger. L'apprentissage par renforcement implémente cette idée en IA : elle passe par l'exploration de situations qui sont jugées insatisfaisantes ou non. Observons que pour être créatif, un apprentissage par renforcement devrait sans doute autoriser une certaine permissivité dans l'estimation du caractère insatisfaisant d'une situation.

Il en va de même chez la machine : la généralisation inductive, tout comme l'abduction ou l'analogie ou encore d'autres formes de raisonnement de sens commun, ne préserve pas la vérité. Un apprentissage, quand il ne se limite pas à un apprentissage par cœur (qui, lui, n'offre pas la capacité de prendre en compte des situations nouvelles) présuppose le risque de se tromper. Les algorithmes mis en place dans les machines pour apprendre visent à minimiser ce risque de façon empirique, en s'appuyant sur les situations disponibles. Ils ne

5. Le problème de l'absence de norme universelle se pose, bien entendu, aussi pour les systèmes de reconnaissance faciale. Il n'existe pas une image de référence du visage de Dong Mingzhu (ou de n'importe qui d'autre).

6. Une autre réponse de la machine pourrait être : « Tu ne serais pas un ordinateur qui essaie de passer son test de Turing, toi, des fois ? »

©AFIA2022

peuvent pas l'éliminer totalement. Chez la machine, il faut noter que l'erreur commise peut être importante quand les données sont trop peu massives ou de mauvaise qualité. C'est la question des biais dans les données utilisées pour apprendre, qui peuvent conduire des IA à reproduire des comportements répréhensibles [7] ou à générer des prédictions qui ne sont rien d'autres que des prophéties auto-réalisatrices, comme dans le cas du prédicteur *PredPol*, utilisé par le département de police de Los Angeles pour déterminer les zones à patrouiller ; évidemment, le LAPD pouvait observer plus de crimes, délits et infractions là où *PredPol* l'envoyait patrouiller que là où elle n'était pas (et n'était donc pas en situation de les observer) !

Pour que la bêtise soit créative, chez l'humain comme chez la machine, le risque de se tromper doit être accepté, mais il doit aussi être modulé et contrôlé par la mise en œuvre de mécanismes permettant de remettre en cause ses croyances et les décisions auxquelles elles conduisent. C'est indispensable pour éviter le *perseverare diabolicum* déjà mentionné et s'efforcer ainsi de ne pas rester bêtes. Ainsi, de nombreux travaux en IA se sont-ils tournés depuis une quarantaine d'années vers cette problématique à facettes multiples, incluant le raisonnement non monotone (où les conclusions changent selon les hypothèses faites, qu'elles soient implicites ou pas) ou encore la révision de croyances (grosso modo, comment remettre en cause ses croyances pour en changer suffisamment sans en changer trop ?).

5 Concevoir un système de BA

Supposons que l'on veuille construire un système de BA. Pour ce faire, nous considérons d'une part les systèmes d'intelligence/bêtise artificielle fondées sur des raisonnements et d'autre part des systèmes d'[I/B]A fondés sur l'apprentissage supervisé, étant bien entendu que cela ne couvre pas toute l'IA ni toute la BA, et que cela ne constitue pas des ensembles de systèmes disjoints : en particulier, le raisonnement à partir de cas (RàPC), peut être considéré à l'intersection des deux. Le RàPC et l'argumentation sont d'ailleurs les deux problématiques plus spécifiques étudiées en fin de section.

5.1 Raisonner bêtement

Commettre des erreurs de raisonnement, c'est sans doute raisonner bêtement (même si c'est à la portée de tout le monde). Le raisonnement déductif repose largement sur le schéma suivant $\frac{p \to q \quad p}{q}$ (si p est vrai, et si p implique q, alors q est vrai). Autoriser d'autres schémas, comme par exemple $\frac{p \to q \quad q}{p}$ ou $\frac{p \to q \quad p}{\neg q}$ est plus risqué ! Selon le premier, qui n'offre pas les garanties de la déduction, l'observation d'une conséquence de p suggère que p est vrai, ce qui n'est pas bête ! Tandis que le second schéma mène à coup sûr à l'incohérence. On pourra consulter [14] pour une étude des arguments fallacieux. Une mauvaise analogie, reposant sur un parallèle trop hasardeux, mène de même à l'absurdité : « Le hérisson est comme la brosse à dents, il a le poil raide. »

Utiliser improprement la déduction conduit aussi à des absurdités :

— *Les appartements bon marché sont rares.*
— *Tout ce qui est rare est cher.*
— *Donc les appartements bon marché sont chers.*

Le problème provient ici de ce que le second énoncé a des exceptions (comme l'indique d'ailleurs le premier), alors qu'il est traité comme s'il n'en avait pas. La vraie bêtise peut alors être de ne pas démordre d'une conclusion fausse ou absurde.

Si un système de BA veut paraître bête, produire des conclusions fausses ne suffit pas ! Il doit rendre perceptible la manière dont il les obtient. Le comble du raisonnement bête est peut-être d'arriver à une conclusion exacte par des inférences fausses... à moins que cela ne soit un signe de virtuosité intellectuelle !

De façon similaire, un processus de raisonnement parfaitement correct pourra être perçu comme bête simplement parce qu'il n'est pas astucieux, qu'il est trop complexe, qu'il passe par des calculs compliqués alors qu'il existe des approches beaucoup plus simples (à titre d'exemple, on pensera au fameux problème des cyclistes et de la mouche, cf. `https://membres-ljk.imag.fr/Bernard.Ycart/mel/sn/node16.html`).

Enfin, si la bêtise est d'abord, comme il a été dit, une incapacité à voir, à créer des liens entre des faits ou des énoncés de ces faits, alors, on peut utiliser des idées de systèmes à capacité de raisonnement limitée [15] pour concevoir un système de BA. Par exemple, le système peut être « conscient » que p et $p \to q$ sont vrais, sans pouvoir former leur conjonction et conclure q [16].

5.2 Apprendre des bêtises

Un système d'apprentissage supervisé en IA s'appuie sur des exemples sous la forme de couples $(\mathtt{x},\mathtt{y}) \in \mathcal{P} \times \mathcal{S}$ où $\mathcal{P}$ est l'espace des problèmes (ou des entrées) et $\mathcal{S}$ est l'espace des solutions (ou des sorties), tel que $\mathtt{x}$ a pour solution $\mathtt{y}$. Pour simplifier la discussion qui suit, on supposera que la relation « a pour solution » est fonctionnelle et on notera $\mathtt{F}$ cette fonction : les exemples non bruités $(\mathtt{x},\mathtt{y})$ d'un système d'IA d'apprentissage supervisé vérifient $\mathtt{y} = \mathtt{F}(\mathtt{x})$. L'objectif d'un tel système est donc d'approcher la fonction $\mathtt{F}$: si on note $\mathtt{EA}$ l'ensemble d'apprentissage et $\mathtt{F}_{\mathtt{EA}}$ une fonction apprise par un système d'apprentissage supervisé donné, l'erreur sera mesurée par une estimation de la différence entre les fonctions $\mathtt{F}$ et $\mathtt{F}_{\mathtt{EA}}$.

Pour construire un système d'apprentissage supervisé en BA, une idée naturelle est d'appliquer une technique d'apprentissage supervisée d'IA qui s'appuie sur des exemples de bêtises. La question à laquelle il faut répondre alors est celle de la constitution de $\mathtt{EAB}$ (l'ensemble d'apprentissage bête). Partant de l'idée qu'une condition nécessaire pour que $(\mathtt{x},\mathtt{y})$ soit un exemple de bêtise est que $(\mathtt{x},\mathtt{y})$ soit une erreur, il faut donc que $\mathtt{y} \neq \mathtt{F}(\mathtt{x})$. Cette condition nécessaire est-elle suffisante pour faire un apprentissage bête ? Si non, quelle autre condition serait nécessaire ? Voilà deux questions auxquelles nous n'apporterons pas de réponse ici : nous nous contenterons de la condition nécessaire et allons examiner ce qu'implique le fait de la considérer comme suffisante dans quelques cadres.

Considérons dans un premier temps la classification binaire (i.e., $|\mathcal{S}| = 2$) et notons $\overline{\mathtt{y}}$ l'élément de $\mathcal{S}$ différent de $\mathtt{y} \in \mathcal{S}$. On peut donc constituer $\mathtt{EAB}$ en partant d'un ensemble d'apprentissage $\mathtt{EA}$ (destiné à une IA) : $\mathtt{EAB}$ serait alors l'ensemble des $(\mathtt{x},\overline{\mathtt{y}})$ où $(\mathtt{x},\mathtt{y}) \in \mathtt{EA}$. L'apprentissage mènerait alors à une fonction $\mathtt{F}_{\mathtt{EAB}}$ qui, si l'apprentissage est réussi, se

7. Voir par exemple `https://tinyurl.com/yvaj4beh`.

tromperait la plupart du temps, ce qui signifie que la fonction $\overline{\mathtt{F}_{\mathtt{EAB}}} : \mathtt{x} \in \mathcal{P} \mapsto \overline{\mathtt{F}_{\mathtt{EAB}}(\mathtt{x})} \in \mathcal{S}$ donnerait une fonction d'apprentissage correct [8] : demander l'avis aux personnes qui sont bêtes dans ce sens-là est donc utile pour savoir ce qu'on ne devrait pas faire ! Par exemple, si on a un système de classification d'images permettant de distinguer les photos de rats-taupes glabres des photos de bicyclettes, un classifieur binaire efficace construit sur un ensemble d'apprentissage bête (au sens précédemment décrit), il prendra, la plupart du temps, une photo de rat-taupe glabre, pour celle d'un vélo et inversement.
Quand la taille de $\mathcal{S}$ augmente, les choses peuvent devenir différentes. Prenons le cas de la régression où $\mathcal{P} = \mathbb{R}^m$ et $\mathcal{S} = \mathbb{R}^n$, étant donné $(\mathtt{x},\mathtt{y}) \in \mathtt{EA}$, comment choisir $(\mathtt{x},\mathtt{y}') \in \mathtt{EAB}$ avec la seule condition $\mathtt{y}' \neq \mathtt{y}$? Si c'est par une bijection $\varphi : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$, on se ramène à une situation similaire à la précédente ($\varphi^{-1} \circ \mathtt{F}_{\mathtt{EAB}}$ pourrait être une aussi bonne approximation de $\mathtt{F}$ que $\mathtt{F}_{\mathtt{EA}}$). Si le calcul de $\mathtt{y}'$ se fait de façon aléatoire (et sans tenir compte de $\mathtt{y}$), alors $\mathtt{F}_{\mathtt{EAB}}$ ne serait représentatif que de la distribution de probabilité du générateur aléatoire sur $\mathcal{S}$: on retombe sur l'hypothèse rollinesque d'un système de BA qui répond n'importe comment à la question posée (cf. introduction). Si le calcul de $\mathtt{y}'$ se fait de façon aléatoire mais proche de $\mathtt{y}$ (p. ex., pour $n = 1$, $\mathtt{y}'$ choisi aléatoirement dans $[\mathtt{y} - C, \mathtt{y} + C] \setminus \{\mathtt{y}\}$, où $C > 0$ est une constante relativement « petite »), on se retrouve dans le cadre de l'apprentissage avec des exemples bruités, avec un bruit additif.
Ces quelques exemples abstraits illustrent le fait que la condition nécessaire « être bête, c'est se tromper » n'est pas toujours suffisante pour faire un système d'apprentissage en BA qui ne soit ni un système d'apprentissage en IA « en creux » ni un système qui se contente de répondre n'importe comment.

5.3 Le RàPB

Le RàPB serait le raisonnement à partir de cas (RàPC) produisant des bêtises. On rappelle que le RàPC consiste à (tenter de) résoudre un problème cible en s'appuyant sur une base de cas où un cas est une représentation d'un épisode de résolution de problèmes : un cas est souvent la donnée d'un couple $(\mathtt{x},\mathtt{y})$ (i.e., ce qu'on appelle un exemple en apprentissage supervisé), parfois agrémenté par des explications sur des liens entre $\mathtt{x}$ et $\mathtt{y}$. Une session de RàPC consiste souvent en la sélection dans la base de cas d'un cas jugé similaire au problème cible (étape de remémoration) et en la modification de ce cas dans l'optique de la résolution du problème cible (étape d'adaptation).
Pour construire un système de RàPB, on pourrait s'inspirer du principe de l'apprentissage de bêtises évoqué ci-dessus, à savoir la constitution d'une base de cas-bêtises. Cela rencontre la problématique récente du RàPC utilisant des cas positifs et des cas négatifs (ces derniers peuvent être rapprochés — voire assimilés ? — à des cas-bêtises) et qui a donné de bons résultats pour l'apprentissage de connaissances d'adaptation [17], ce qui tend à dire que si on mémorise à la fois les expériences positives et les expériences de bêtises, en distinguant les deux, cela peut être utile pour mieux adapter en RàPC.
Une autre voie, éventuellement complémentaire, pour le RàPB, consisterait à changer les étapes du raisonnement (comme c'est le cas dans le cadre général de la section 5.1), par exemple en sélectionnant le cas le moins similaire au problème cible : si l'adaptation parvient à modifier le cas-recette du gratin dauphinois afin de résoudre le problème « J'aimerais une recette de sorbet au cassis. », le résultat pourrait être surprenant (et utile quand on a des invités qui s'attardent trop). On peut aussi imaginer une remémoration pertinente suivie d'une adaptation qui ne l'est pas : l'exemple de la section 3.1 illustre cela (pour un système de RàPC ou de RàPB résolvant des problèmes de calcul de limites). On notera que ces idées rejoignent celle présentées par François Rollin d'un système de BA qui s'abstiendrait de trier (ici : de faire une remémoration bête) ou d'adapter (ici : de faire une adaptation bête).

5.4 Bêtise argumentée

En IA, l'argumentation formelle est le domaine qui s'intéresse à la représentation d'informations conflictuelles, et à la définition de méthodes de raisonnement non triviales à partir de ces informations, en se basant sur des notions de logique et de rhétorique : un argument est composé d'un ensemble d'informations considéré comme fiables (le support) et d'une information qui peut être déduite de ce support (la conclusion) ; si un argument a contredit un argument b, mais que rien ne vient contredire a, alors on considère que a est acceptable et que b ne l'est pas. Différents principes gouvernent les modèles de raisonnement argumentatif, il semble donc relativement aisé de définir un système de bêtise argumentée (BArg), via un système d'argumentation qui faillirait à satisfaire certains de ces principes de base.
Prenons d'abord le cas de l'argumentation abstraite [18]. Dans ce contexte, on s'intéresse aux relations entre les arguments pour déterminer lesquels sont acceptables, sans se soucier de leur nature précise (en particulier, de leur structure logique interne). Un système d'argumentation abstrait est donc un graphe $\mathtt{F} = \langle \mathtt{A}, \mathtt{R} \rangle$, dont les noeuds $\mathtt{A}$ sont les arguments, et les arcs $\mathtt{R} \subseteq \mathtt{A} \times \mathtt{A}$ sont les attaques, c'est-à-dire la représentation de la notion de « contre-argument ». Le raisonnement à partir d'un tel graphe se fait au moyen du concept d'extension, c'est-à-dire d'ensemble d'arguments conjointement acceptable, représentant une solution potentielle du problème représenté par le graphe argumentatif. Il existe différentes façon de définir une extension, selon les propriétés attendues de cet ensemble d'arguments. Parmi les approches classiques, nous parlerons uniquement (à titre illustratif) de la sémantique stable : un ensemble d'arguments $\mathtt{E} \subseteq \mathtt{A}$ est une extension stable si et seulement si 1) c'est un ensemble sans conflit ($\forall a, b \in \mathtt{E}$, $(a,b) \notin \mathtt{R}$), et 2) c'est un ensemble qui attaque son complémentaire ($\forall a \in \mathtt{A} \setminus \mathtt{E}$, $\exists b \in \mathtt{E}$ tel que $(b,a) \in \mathtt{R}$). Il est donc possible de définir un système de BArg comme un système qui retourne des ensembles d'arguments qui attaquent leur complémentaire, mais ne satisfont pas le principe d'absence de conflit. Prenons l'exemple d'un scénario très simple, où le dialogue suivant [9] :
– *C'est Charles Lytton qui a volé la pierre précieuse !* (a)
– *C'est impossible, il a une jambe dans le plâtre.* (b)
– *Il feint probablement d'être blessé.* (c)
est modélisé par un système d'argumentation $\mathtt{F} = \langle \mathtt{A}, \mathtt{R} \rangle$, où $\mathtt{A} = \{a, b, c\}$ et $\mathtt{R} = \{(c,b), (b,a)\}$. Alors que la sémantique

8. Sous certaines hypothèses de symétrie entre l'appréhension des deux classes par le classifieur, il devrait être possible de montrer que $\overline{\mathtt{F}_{\mathtt{EAB}}}$ et $\mathtt{F}_{\mathtt{EA}}$ ont la même espérance d'erreur.

9. Toute ressemblance avec une comédie policière des années 1960 est absolument non fortuite.

©AFIA2022

stable requiert d'accepter $\{a,c\}$, une version bête peut mener à l'acceptabilité de $\{b, c\}$ (l'ensemble attaque bien son complémentaire, mais n'est pas sans conflit). Des versions bêtes des autres sémantiques de raisonnement argumentatif peuvent être définies de façon similaire, en choisissant des ensembles d'arguments qui ne satisfont qu'une partie des propriétés requises. Notons tout de même que dans certains contextes, comme l'existence d'informations au sujet de priorités à appliquer entre les arguments, certaines propriétés de base comme l'absence de conflit peuvent être violées [19, 20, 21]. Cela veut-il dire que ces cadres étendus sont bêtes ? Nous laissons le lecteur en juger.

Si on ne s'intéresse pas uniquement aux relations entre les arguments, mais également à la façon de les former à partir de connaissances structurées (généralement avec un formalisme logique [22]), il existe également plusieurs façons d'argumenter bêtement. En résumé, il y a deux étapes dans la conception d'un système d'argumentation structuré à partir de connaissances logiques : l'identification des arguments, et l'identification des attaques entre eux. Ces deux étapes peuvent être sources d'importantes bêtises. Supposons qu'on ait affaire à un individu énonçant la phrase suivante : « J'aime le chocolat, donc je suis la reine d'Angleterre. ». Cela revient à considérer $(\{a\},b)$ (où a représente le fait d'aimer le chocolat, et b le fait d'être la reine d'Angleterre) comme un argument, alors qu'il n'y a aucune raison rationnelle de supposer que b soit une conséquence de a. S'il est déjà un peu bête de prétendre au trône britannique en raison de son amour du chocolat, ce genre de raisonnement peut naturellement poser d'autres problèmes si on applique l'argumentation à des sujets plus sensibles. Même dans un cas où les arguments sont bien construits, une piste pour concevoir un système de BArg se situe au niveau de l'étape d'identification des attaques. Ignorer certaines attaques, ou au contraire en ajouter certaines qui ne devraient pas l'être, va naturellement changer l'issue du raisonnement.

On peut raisonnablement [10] se demander si un système de BArg « sans limite » ne ressemblerait pas à un raisonnement chaotique, sans intérêt particulier. Comme on l'a mentionné en introduction, la bêtise d'un résultat peut se définir en fonction d'une distance par rapport au résultat correct attendu. Un « bon » système de BArg serait alors un système qui identifie incorrectement un ratio pré-défini des arguments et des attaques, et qui sélectionne les arguments acceptables en maintenant également une certaine proximité avec une solution correcte.

5.5 D'autres BA

Chaque domaine et problématique de l'IA pourrait être examiné sous le prisme de la BA. Voici un court inventaire non exhaustif de tels exercices.

Pour la prise de décision, une question serait : « Comment décider bêtement ? » Par exemple, en décision multi-critères, on peut décider finalement à partir d'un critère non pertinent : acheter une voiture parce qu'elle est rouge alors qu'on avait décidé de l'acheter sur des critères écologiques, de prix et de performance, peut apparaître comme bête.

Pour l'apprentissage non supervisé, une question serait : « Comment catégoriser bêtement un domaine ? » À titre d'exemple, on peut séparer les humains en deux catégories, en fonction de la parité du nombre de voyelles dans le prénom de leurs grands-mères paternelles.

Dans le cadre des systèmes multi-agents, une question serait : « Comment faire émerger de la bêtise d'un groupe d'agents individuellement pas bêtes ? » Dans un tel contexte, on notera au passage l'identification de cinq lois fondamentales de la stupidité humaine, proposée par Carlo M. Cipolla [23]. Cette théorie pose, en particulier (la troisième loi énoncée par l'auteur), qu'un agent (humain) stupide est un agent qui nuit à un autre (ou à un groupe d'autres agents) sans en tirer aucun bénéfice, voire en étant nuisible à lui-même. En quelque sorte, tirer sur quelqu'un d'autre en se mettant une balle dans le pied ! Ces lois ont donné lieu à des expérimentations visant à estimer la validité de la théorie de Cipolla dans des contextes de simulation à base d'agents artificiels [24], mais aussi à des travaux visant à fournir une interprétation biophysique à la théorie [25].

6 Conclusion provisoire

Cet article est né d'une réflexion autour de la notion de BA qu'a introduite François Rollin dans un ouvrage récent. L'objectif poursuivi ici est de réunir quelques réflexions sur la question de la bêtise vue du point de vue de l'IA. L'article ne prétend pas couvrir toutes les problématiques que cette notion de bêtise artificielle suscite, mais pose les questions suivantes sur les liens entre ces notions encore mal définies d'intelligence [artificielle] et de bêtise [artificielle] : la seconde peut-elle être vue comme le complémentaire de la première ? ou, à l'inverse, considère-t-on qu'il ne peut y avoir de bêtise [artificielle] sans (un peu d')intelligence [artificielle] ? Une autre question ou, peut-être, une autre façon de poser cette question est celle de ce que serait un système de BA : un système d'IA quand il se trompe ? ou un système destiné à proposer des bêtises ? La deuxième réponse pourrait poser problème si l'on comprend la bêtise comme étant involontaire, mais on peut contourner cette difficulté en affirmant que la volonté (que le système soit bête) est celle du concepteur de ce système, alors que le système n'aurait pas plus conscience de dire des bêtises qu'un système d'IA n'a (jusqu'à preuve du contraire) de conscience d'être (parfois) intelligent. Enfin, nous ne nous sentons pas exemptés d'être bêtes par le simple fait d'avoir écrit cet article (qui contient au moins 7 bêtises : saurez-vous les découvrir ?), mais nous nous consolons en appréciant le charme, sinon la beauté de la bêtise.

Ce travail offre plusieurs perspectives d'études, en partie évoquées dans l'article. Une d'entre elles est la tentative de modélisation formelle de la bêtise. La bêtise ne se réduit pas à l'erreur, elle doit être considérée comme un écart vis-à-vis d'une norme qu'il conviendra de caractériser. Cette norme peut être celle d'un observateur jugeant s'il y a bêtise. Elle peut également être une estimation des conséquences de la bêtise (par exemple par une fonction d'utilité).

Cet article pose plus de problèmes qu'il n'en résout (en résout-il un seul ?). En fait, on peut le voir comme une invitation à la communauté de l'IA de considérer ce champ de recherche sous un angle inhabituel, avec l'idée que ce pas de côté pourrait se révéler déambulatoire [11]. Et n'oublions pas Gustave Flaubert

10. Est-ce vraiment si raisonnable ?

11. Une légende raconte que le choix de cet adjectif a été proposé par un sys-

qui a écrit « Oui, la bêtise consiste à vouloir conclure » (Lettre à Louis Bouilhet, 4 septembre 1850). Sachons, en toutes choses, nous garder des conclusions définitives !

Toutes les sections de cet article, à l'exception de la dernière, ont été rédigées par ses quatre premiers auteurs (qui ont néanmoins cité le cinquième en introduction). La dernière section est rédigée par le cinquième auteur.

7 Le mot de François Rollin

Des réflexions et questionnements exposés ci-dessus, je crains de devoir déduire qu'il est encore plus difficile de produire de la Bêtise Artificielle que de produire de l'Intelligence Artificielle, dès lors que l'objectif est de générer de l'authentique bêtise, de la bonne vraie bêtise bien de chez nous, et non pas simplement de l'absurdité ou du non-sens.
Cette conclusion serait contre-intuitive si on voyait la bêtise comme un simple ratage. De fait, il est plus facile de rater que de réussir : en cuisine, en musique, en littérature, en médecine, au jeu d'échecs, en amour, et j'en oublie, il faut une vraie compétence pour bien faire, tandis qu'une simple incompétence suffit à mal faire. En matière d'intelligence, il semble que ce soit le contraire, du moins si on veut produire une bonne vraie bêtise. Cette surprenante difficulté ne peut qu'appuyer la nécessité et l'urgence de travaux savants et studieux sur la BA. L'aventure a démarré, c'est une bonne chose, il faut maintenant la mener à son terme, et ce n'est pas à moi que la tâche incombe : je suis bien trop bête pour ça.

A Réponse à l'exercice de la section 3.1

La solution proposée par l'étudiant était $+\infty$.

Références

[1] F. ROLLIN : *Suis-je bête ! — L'héroïque Professeur Rollin foudroie la bêtise avec ruse et modestie*. Presses Universitaires de France, 2020. Illustrations de D. Gooseens, préface d'A. Astier.

[2] A. TURING : Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, LIX(236):433–460, 10 1950.

[3] R. DESCARTES : *Discours de la méthode*. 1637.

[4] C. GODIN : La bêtise existe-t-elle ? *Le Philosophoire*, 42:27–38, 2014. L'auteur développe son propos dans son Encyclopédie Conceptuelle et Thématique de la Philosophie (Editions Champ Vallon, 2018) au chapitre 96 sur l'intelligence qui comporte une section III sur la bêtise et une section IV sur l'intelligence artificielle.

[5] J. A. PAULOS : *Innumeracy : Mathematical Illiteracy and Its Consequences*. Hill and Wang, 1988.

[6] L. SCHNEPS et C. COLMEZ : *Les Maths au tribunal. Quand les erreurs de calcul font les erreurs judiciaires*. Seuil, 1995.

[7] R. KAST : *La Théorie de la Décision*. La Découverte, 1993.

tème de BA. L'origine de cette légende se perd dans la nuit d'étang (noirâtre ?).

[8] J. WEIZENBAUM : Eliza - a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM*, 9(1):36–45, 1966.

[9] G. N. YANNAKAKIS et J. TOGELIUS : *Artificial Intelligence and Games*. Springer, 2018.

[10] T. WINOGRAD : Understanding natural language. *Cognitive psychology*, 3(1):1–191, 1972.

[11] L. LIDÉN : Artificial stupidity : The art of intentional mistakes. *In* S. RABIN, éditeur : *AI Game Programming Wisdom*, volume 2, pages 41–48. Charles River Media Rockland, MA, 2003.

[12] G. RITCHIE : *The Comprehension of Jokes : A Cognitive Science Framework*. CRC Press, 2018.

[13] F. DUPIN DE SAINT-CYR et H. PRADE : La compréhension des histoires drôles : une affaire de révision de croyances. *Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle*, 2022.

[14] P. BISQUERT, F. DUPIN DE SAINT-CYR et P. BESNARD : Assessing arguments with schemes and fallacies. *In Proc. 15th Int. Conf. on Logic Programming and Nonmonotonic Reasoning (LPNMR'19), Philadelphia, June 3-7*, volume 11481 de *LNCS*, pages 61–74. Springer, 2019.

[15] R. FAGIN et J. Y. HALPERN : Belief, awareness, and limited reasoning. *Artif. Intell.*, 34(1):39–76, 1987.

[16] H. PRADE : Handling (un)awareness and related issues in possibilistic logic : A preliminary discussion. *In Proc. of NMR 2006*, pages 219–225, 2006.

[17] J. LIEBER et E. NAUER : Adaptation knowledge discovery using positive and negative cases. *In Proc. of ICCBR, LNCS 12877*, 2021.

[18] P. M. DUNG : On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games. *Artif. Intell.*, 77(2):321–358, 1995.

[19] L. AMGOUD et C. CAYROL : A reasoning model based on the production of acceptable arguments. *Ann. Math. Artif. Intell.*, 34(1-3):197–215, 2002.

[20] K. ATKINSON et T. J. M. BENCH-CAPON : Value-based argumentation. *FLAP*, 8(6):1543–1588, 2021.

[21] J. ROSSIT, J.-G. MAILLY, Y. DIMOPOULOS et P. MORAITIS : United we stand : Accruals in strength-based argumentation. *Argument Comput.*, 12(1):87–113, 2021.

[22] P. BESNARD et A. HUNTER : *Elements of Argumentation*. MIT Press, 2008.

[23] C. M. CIPOLLA : *The basic laws of human stupidity*. Bologna : il Mulino, 2011.

[24] A. G. B. TETTAMANZI et C. DA COSTA PEREIRA : Testing Carlo Cipolla's Laws of Human Stupidity with Agent-Based Modeling. *In IEEE/WIC/ACM Int. Joint Conf. on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT), Warsaw 11-14, - Volume III*, pages 246–253, 2014.

[25] I. PERISSI et U. BARDI : The sixth law of stupidity : A biophysical interpretation of carlo cipolla's stupidity laws, 03 2021.

©AFIA2022

Techniques d'allocation de lots avec des préférences conflictuelles représentées par des graphes acycliques dirigés pondérés

Sara Maqrot, Stéphanie Roussel, Gauthier Picard, Cédric Pralet

ONERA/DTIS, Université de Toulouse

prenom.nom@onera.fr

Résumé

Nous introduisons des techniques d'allocation de ressources pour un problème où (i) les agents expriment des demandes d'obtention de lots d'objets sous forme de graphes acycliques dirigés compacts pondérés (chaque chemin dans ces graphes est un lot dont l'évaluation est la somme des poids des arêtes traversées), et (ii) les agents ne demandent pas exactement les mêmes articles mais les demandes peuvent porter sur des objets conflictuels, qui ne peuvent pas être tous deux assignés. Ce cadre est motivé par des applications réelles telles que l'allocation de créneaux d'observation de la Terre, la virtualisation de fonctions réseaux ou la recherche de chemins multi-agents. Nous étudions plusieurs techniques d'allocation et analysons leurs performances sur un problème d'allocation de portions d'orbite.

Mots-clés

Allocation de ressources, approche utilitariste, partage équitable, graphes.

1 Introduction

Nous considérons un problème d'allocation de lots d'articles indivisibles contraint par le chaînage d'articles (pour allouer à chaque agent une chaîne d'articles successifs) et des articles conflictuels. La première contrainte est capturée par un graphe acyclique dirigé (DAG) avec des arêtes pondérées, un nœud source et un nœud puits. Ce graphe représente tous les lots (*i.e.* chemins) d'articles valides pour un agent, où la qualité d'un lot est représentée par les poids additifs des arêtes. La deuxième contrainte stipule que chaque agent doit obtenir un chemin sans conflit dans son graphe. On trouve ces problèmes d'allocations dans des domaines d'application tels que la virtualisation des fonctions de réseau (NFV), où les utilisateurs demandent l'allocation de graphes dirigés de services dans une infrastructure réseau partagée [20], ou dans l'observation de la Terre à l'aide d'une constellation de satellites, où les utilisateurs demandent l'exclusivité sur des portions d'orbite (sans chevauchement avec les portions d'autres utilisateurs) pour mettre en œuvre leurs demandes d'observation périodiques [11, 17]. Dans de tels contextes, outre les pondérations additives des arêtes, d'autres critères peuvent être pris en compte pour guider le processus d'allocation, en particulier lorsque les utilisateurs de la constellation sont des parties prenantes qui s'attendent à ce que les allocations soient équitables ou proportionnelles à leur investissement.

Travaux connexes. La littérature contient quelques travaux relatifs à l'allocation de biens structurés sous forme de graphes. Dans la division équitable de graphe, l'objectif est de diviser un graphe d'éléments entre plusieurs agents, avec des utilités additives attachées aux nœuds [1, 8]. Ces travaux fournissent des propriétés intéressantes pour trouver des allocations sans envie (*envy-free*) ou Pareto-optimales, de manière efficace dans certaines structures de graphes spécifiques, comme par exemple les chemins, les arbres, les étoiles. Cependant, dans notre problème, (i) les agents ne sont pas en compétition pour le même ensemble d'éléments, (ii) le graphe est dirigé pour composer des chemins d'un article de début à un article de fin, (iii) même en faisant correspondre notre problème à une division de graphe et en regroupant les éléments conflictuels en éléments composites, il est hautement improbable que le graphe résultant soit acyclique. Ici, les graphes sont utilisés pour exprimer les préférences, et non les biens à allouer. En bref, notre travail ne s'inscrit pas dans les cadres existants de partage équitable de graphes, ou ne peut pas bénéficier des résultats théoriques sur les graphes en forme de chemin ou d'étoile.

D'autres travaux connexes concernent les enchères de chemins [9, 6, 21], où les agents font des offres pour des chemins dans un graphe où chaque arête appartient à un agent. L'objectif est d'attribuer des chemins aux agents par le biais d'enchères, et éventuellement de préserver une certaine confidentialité pour les propriétaires des arêtes. Dans le cas d'une fonction objectif utilitaire pour le problème de détermination du vainqueur, sans confidentialité des prix, cela entre dans le cadre de Vickrey-Clarke-Groves (VCG), et garantit donc des mécanismes efficaces et sans risque de confusion. Mais, là encore, les agents font des offres sur le même ensemble de nœuds et d'arêtes.

Dans le domaine du transport, les recherches sur des structures très similaires, à savoir les réseaux de flux, fournissent des techniques pour un flux maximal équitable dans les réseaux multi-sources et multi-puits [12]. Bien que les techniques utilisées soient très similaires aux nôtres (programmation linéaire), l'objectif de débit maximal est très différent de la maximisation de l'utilité du chemin. Par ailleurs, [7] a travaillé sur des problèmes de plus court chemin multiple basés sur des techniques de déconfliction. Bien que le problème présente des caractéristiques similaires, encore une fois les agents évoluent sur les mêmes graphes, et l'objectif est centré sur la minimisation de la longueur du chemin et la minimisation des chemins conflictuels, sans considérations d'équité.

Dans les jeux de congestion, les agents se voient attribuer des chemins de manière à minimiser les délais dûs au croisement des chemins. Si des agents se voient attribuer les mêmes nœuds, alors le retard lié à leurs chemins augmente : [14, 16]. Dans notre travail, nous ne considérons pas le retard mais

©AFIA2022

des incompatibilités. Bien que ces dernières puissent être modélisées par des fonctions non linéaires $\{0,\infty\}$, certaines allocations de chemins sont irréalisables dans notre problème, contrairement aux jeux de congestion. En outre, l'utilisation de méthodes de résolution de jeux de congestion comme dans [16] peut aboutir à des équilibres de Nash injustes, en raison de nombreux chemins irréalisables.
Plus généralement, une autre approche classique de l'allocation équitable de biens indivisibles est le *round-robin*, qui est presque sans envie [3]. C'est notamment une technique privilégiée pour allouer des fonctions réseau virtuelles dans les infrastructures de virtualisation de fonctions réseau [19], ou pour ordonnancer des tâches. Nous comparons nos techniques à cette approche.

Contributions. Cet article introduit et présente un modèle pour de tels scénarios, sous le prisme de l'optimalité et de l'équité. Le modèle capture toute application dans lesquelles les agents expriment leurs préférences sous forme de DAGs avec arêtes pondérées et dans lesquelles il existe des conflits entre certains nœuds de ces graphes. Nous montrons que ce problème d'allocation est NP-difficile. Nous présentons et évaluons plusieurs algorithmes sur des données provenant de constellations de satellites et de demandes simulées, selon trois critères : l'optimalité utilitaire, le temps de calcul et l'équité.

2 Modèle du problème

Nous étudions des problèmes d'allocation où les évaluations des agents sur les lots d'articles sont représentées comme des DAGs avec arêtes pondérées, avec la présence de certains conflits entre les nœuds de ces graphes. Une allocation consiste à choisir un chemin complet dans chaque graphe, de sorte que les chemins sélectionnés ne soient pas en conflit les uns avec les autres.

2.1 Définitions et notations

Définition 1. Un problème d'*allocation de multiple chemins conflictuels dans des graphes acycliques dirigés avec arêtes pondérées* (PADAG) est un tuple $\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C}\rangle$, où :

- $\mathcal{A}=\{1,...,n\}$ est un ensemble d'*agents* ;
- $\mathcal{G}=\{g_1,\dots,g_m\}$ est un ensemble de DAGs pondérés, où chaque $g\in\mathcal{G}$ est un tuple $\langle V_g,E_g,u_g\rangle$ qui représente des préférences sur certains éléments dans V_g, avec des connexions entre les éléments dans $E_g\subset V_g\times V_g$, pondéré en utilisant la fonction d'utilité $u_g : V_g\times V_g\to\mathbb{R}$; nous supposons également que V_g contient deux nœuds spécifiques, la source s_g et le puits t_g, et que E_g contient une arête de s_g à t_g pondérée par l'utilité 0 (afin de traiter les cas où aucun lot d'éléments ne peut être sélectionné dans g) ;
- $\mu:\mathcal{G}\to\mathcal{A}$ fait correspondre chaque graphe g dans $\mathcal{G}$ à son propriétaire a dans $\mathcal{A}$;
- $\mathcal{C}\subset\{(v,v')|(v,v')\in V_g\times V_{g'},g,g'\in\mathcal{G}^2,\mu(g)\neq\mu(g')\}$ est un ensemble de conflits entre des paires d'éléments de deux graphes distincts de $\mathcal{G}$ provenant de deux agents distincts.

Pour chaque graphe g et chaque ensemble d'arêtes $X\subseteq E_g$, l'utilité de X pour g est définie par $u_g(X)=\sum_{e\in X}u_g(e)$, ce qui signifie que les évaluations des arêtes sont considérées comme additives dans cet article. Par conséquent, chaque chemin de s_g à t_g dans un graphe g est évalué en additionnant

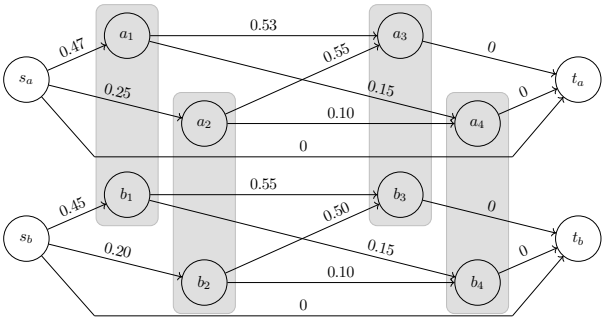


FIGURE 1 – Exemple d'évaluations (ou préférences) de lots par des agents représentées sous forme de DAGs. Les conflits sont représentés par des hypernœuds gris.

les utilités des arêtes traversées, et chaque DAG représente de manière compacte un ensemble d'évaluations pour des paquets d'éléments, comme dans les enchères combinatoires. De plus, nous désignons par $\mathcal{G}_a=\mu^{-1}(a)$ l'ensemble des graphes possédés par l'agent a, et l'utilité d'un ensemble d'arêtes X pour l'agent a est définie par $u_a(X)=\sum_{g\in\mu^{-1}(a)}u_g(X\cap E_g)$.

Définition 2. Une *allocation* est une fonction π qui associe, à chaque graphe $g\in\mathcal{G}$, un chemin $\pi(g)$ de s_g à t_g dans g. Formellement, $\pi(g)$ peut être représentée comme un ensemble de nœuds dans V_g. En effet, comme on manipule des DAGs, il est facile de reconstruire les arêtes successivement traversées par le chemin à partir de cet ensemble. Par extension, l'allocation pour l'agent a est donnée par $\pi(a)=\cup_{g\in\mu^{-1}(a)}\pi(g)$.

Par convention, nous désignons par $u(\pi(g))=u_{\mu(g)}(\pi(g))$ (resp. $u(\pi(a))=u_a(\pi(a))$), l'utilité du graphe g (resp. de l'agent a) pour l'allocation π. Enfin, l'utilité globale obtenue avec l'allocation π est donnée par $u(\pi)=\sum_{g\in\mathcal{G}}u(\pi(g))$ (ou de manière équivalente $u(\pi)=\sum_{a\in\mathcal{A}}u(\pi(a))$).

Définition 3. Une allocation π est *valide* si pour chaque paire de graphes distincts g et g' il n'y a pas de conflit entre les nœuds dans les chemins résultants, c'est-à-dire $(\pi(g)\times\pi(g'))\cap\mathcal{C}=\emptyset$.

Exemple 1. La figure 1 illustre un PADAG. Les meilleurs chemins pour les agents a et b sont respectivement $\{s_a,\ a_1,\ a_3,\ t_a\}$ et $\{s_b,\ b_1,\ b_3,\ t_b\}$, tous deux évalués à 1. En raison de conflits de nœuds (par exemple entre a_1 et b_1), ces deux chemins ne peuvent pas être assignés en même temps. Une allocation valide pourrait être $\pi_{\mathsf{ex}}=\{a\mapsto\{s_a,a_2,a_4,t_a\},b\mapsto\{s_b,b_1,b_3,t_b\}\}$ avec une utilité globale $u(\pi_{\mathsf{ex}})=u(\pi_{\mathsf{ex}}(a))+u(\pi_{\mathsf{ex}}(b))=0.35+1.0=1.35$.

Les problèmes que nous considérons dans cet article sont (i) *comment calculer une allocation (utilitaire) optimale* π qui maximise $u(\pi)$, et (ii) *comment calculer une allocation équitable optimale* π, par le biais d'une optimisation leximin, *c.a.d.* maximisant lexicographiquement le vecteur d'utilité ordonné $(\Lambda_1,...,\Lambda_n)$ contenant une composante par agent. Plus précisément, ce vecteur contient les utilités de tous les agents. Formellement, il existe une bijection entre les utilités $u(\pi(i))$ des agents i de $\mathcal{A}$ et les éléments Λ_j du vecteur. De plus, le vecteur est ordonné, *i.e.* $\forall i\leq j,\ \Lambda_i\leq\Lambda_j$.

2.2 Analyse de complexité

Les deux propositions suivantes fournissent des résultats de complexité sur les deux problèmes étudiés, relatifs à l'optimisation utilitaire et à l'optimisation leximin respectivement.

Proposition 1. *Déterminer s'il existe une allocation valide π telle que l'évaluation utilitaire $u(\pi)$ est supérieure ou égale à une valeur donnée est NP-complet.*

Démonstration. Tout d'abord, le problème est NP puisque $u(\pi)$ est calculable en temps polynomial. Ensuite, il existe une réduction polynomiale de 3-SAT (qui est NP-complet) à notre problème. Fondamentalement, dans une formule 3-SAT, chaque clause sur des variables propositionnelles x, y, z peut être représentée comme un DAG pondéré g où (1) l'ensemble des nœuds est $V_g = \{x,\neg x,y,\neg y,z,\neg z,s_g,t_g\}$, (2) l'ensemble des chemins de s_g à t_g dans g correspond à l'ensemble des valeurs de vérité pour x,y,z qui satisfont la clause (représentation du diagramme de décision), (3) le poids de chaque arête est fixé à 0 sauf pour les arêtes $s_g \rightarrow n$ où $n \neq t_g$ qui ont un poids de $1/m$, avec m le nombre de clauses dans la formule 3-SAT. Enfin, pour chaque variable propositionnelle x, nous pouvons ajouter un conflit (n,n') pour chaque paire de nœuds étiquetés par les littéraux x et $\neg x$ dans deux graphes distincts. Ensuite, comme un chemin est sélectionné dans chaque graphe et comme il y a m graphes, déterminer s'il existe une allocation valide π telle que $u(\pi) \geq 1$ est équivalent à trouver une solution qui satisfait toutes les clauses, d'où le résultat de NP-complétude étant donné que toutes les opérations utilisées dans la transformation sont polynomiales. □

Proposition 2. *Il est NP-complet de décider s'il existe une allocation valide dont l'évaluation leximin est supérieure ou égale à un vecteur d'utilité donné. La proposition est valable même s'il existe un graphe unique par agent.*

Démonstration. Dans le cas général, il suffit de considérer un problème impliquant un agent unique possédant tous les graphes, et d'utiliser le résultat de la proposition précédente. S'il y a un seul graphe par agent, il suffit d'utiliser exactement le même codage 3-SAT que précédemment mais de remplacer les poids $1/m$ par des poids 1. Il est alors possible de montrer qu'il existe une allocation valide dont l'évaluation leximin est supérieure ou égale à $(1,1,...,1)$ s'il existe une solution au problème 3-SAT. De plus, l'évaluation leximin d'une allocation π peut être calculée en temps polynomial, d'où le résultat de NP-complétude. □

2.3 Combinatoire et stratégie

Dans les PADAGs, les agents sont en compétition pour acquérir les noeuds reliés par l'ensemble $\mathcal{C}$. Les PADAGs reviennent à allouer chaque clique maximale K_i dans le graphe de conflit $\langle \bigcup_{g \in \mathcal{G}} V_g, \mathcal{C} \rangle$ à un agent. L'évaluation d'un agent pour un lot $\mathcal{B} = \{K_1,...,K_p\}$ de cliques maximales peut être définie comme l'utilité du meilleur chemin parmi tous les graphes de l'agent traversant un nœud de chaque K_i, mais ne traversant aucun nœud d'une clique en dehors de $\mathcal{B}$.

Pour résoudre ce problème, il est possible de s'appuyer sur des enchères combinatoires, où chaque agent enchérit sur l'ensemble des cliques maximales qu'il souhaite (lots de cliques), et un commissaire-priseur détermine le gagnant d'une manière utilitaire ou équitable, par exemple. Cependant, il est à noter que (i) trouver toutes les cliques maximales d'un graphe est $\mathcal{O}(3^{\frac{n}{3}})$ dans le pire des cas [2], et (ii) trouver une allocation maximisant le bien-être dans les enchères combinatoires est NP-difficile, en général [5]. De plus, l'évaluation de tels lots nécessite que les enchérisseurs connaissent les conflits, ce qui peut ne pas être une information publique. Par conséquent, nous considérons dans la suite que les agents expriment leurs demandes (ensuite traduites en DAGs), sans savoir avec quels agents leurs offres sont en conflit. Seul le coordinateur (par exemple, l'opérateur de réseau ou l'opérateur de constellation) détermine ces conflits. Alors que les approches leximin et utilitariste (dans un mécanisme VCG) sont à l'abri des stratégies (*strategyproof*), le fait que les agents définissent directement leur évaluation peut être problématique : un agent peut définir un graphe avec un seul chemin, le seul lot qu'il accepte. En utilisant une approche leximin, il est très probable qu'on lui attribue ce seul lot, pour éviter une utilité de 0 pour le pire agent. Cette situation pourrait être évitée dans certains contextes. Par exemple, les agents devraient seulement être autorisés à demander des articles, et ne pas exprimer directement les graphes. Le coordinateur pourrait ainsi générer des graphes connexes, qui ont de nombreux chemins possibles, en raison de la configuration du système. De plus, dans de nombreux contextes opérationnels, plusieurs utilisateurs peuvent avoir certaines priorités (par exemple, les agences de défense dans le cadre de l'observation par des satellites), ce qui pourrait nécessiter que certaines demandes aient des poids plus élevés et de désactiver la normalisation, ou d'adopter une approche d'allocation itérative, par niveau de priorités. Ainsi, dans la suite du document, nous ne considérerons que les agents ayant la même priorité et qui ne définissent pas les graphes par eux-mêmes.

3 Schémas d'allocation de chemins

Nous proposons ici plusieurs schémas d'allocation pour les PADAGs. Certains d'entre eux sont basés sur la programmation linéaire en nombres entiers (ILP) et la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP). Nous commençons par introduire les variables de décision et les contraintes pour ces modèles.

Pour tout DAG $g = \langle V_g,E_g,u_g \rangle$, nous définissons des variables binaires $x_e \in \{0,1\}$, pour tout $e \in E_g$, indiquant si l'arête e est sélectionnée dans le chemin définissant le lot solution. Nous utilisons également des variables binaires auxiliaires β_v indiquant si le nœud v est sélectionné dans le chemin de solution $\pi(g)$, c'est-à-dire que $\beta_v = 1$ si $v \in \pi(g)$, 0 sinon. Pour tout nœud v dans V_g, nous désignons par $\mathsf{In}(v)$ (resp. $\mathsf{Out}(v)$) son ensemble d'arêtes entrantes (resp. sortantes). Dans tous les modèles ILP introduits par la suite, nous imposons les contraintes (1)–(3) pour définir tous les chemins possibles, les contraintes (4)–(5) pour tenir compte des conflits de sélection d'éléments, et la contrainte (6) pour s'assurer que les sources et les puits sont sélectionnés.

$$\sum_{e \in \mathsf{In}(v)} x_e = \sum_{e \in \mathsf{Out}(v)} x_e, \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall v \in V_g \setminus \{s_g,t_g\} \tag{1}$$

$$\sum_{e \in \mathsf{Out}(s_g)} x_e = 1, \quad \forall g \in \mathcal{G} \tag{2}$$

$$\sum_{e \in \mathsf{In}(t_g)} x_e = 1, \quad \forall g \in \mathcal{G} \tag{3}$$

$$\sum_{e \in \mathsf{In}(v)} x_e = \beta_v, \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall v \in V_g \setminus \{s_g,t_g\} \tag{4}$$

$$\sum_{v \in c} \beta_v \leq 1, \quad \forall c \in \mathcal{C} \tag{5}$$

©AFIA2022

$$\beta_{s_g} = \beta_{t_g} = 1, \quad \forall g \in \mathcal{G} \tag{6}$$

3.1 Allocation utilitariste (util)

L'approche classiquement utilisée en allocation de ressources est l'approche utilitaire. Elle consiste à trouver l'allocation qui maximise la somme des utilités de tous les chemins sélectionnés. Cela correspond à la résolution du programme linéaire en nombres entiers $P_{\text{util}}(\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C}\rangle)$ donné ci-dessous :

$$\textbf{max} \quad \sum_{a\in\mathcal{A}} \sum_{g\in\mathcal{G}_a} \sum_{e\in E_g} u_g(e)\cdot x_e \tag{7}$$
$$\text{t.q.} \quad (1),(2),(3),(4),(5),(6)$$

L'allocation résultante π est décodée à partir des variables β_v. Formellement, pour tout $g \in \mathcal{G}$, $\pi(g) = \{v \in V_g \mid \beta_v = 1\}$.

Exemple 2. Dans la figure 1, l'allocation utilitaire optimale est $\pi_{\text{util}} = \{a \mapsto \{s_a,a_2,a_3,t_a\}, b \mapsto \{s_b,b_1,b_4,t_b\}\}$, avec une utilité globale $u(\pi_{\text{util}}) = u(\pi_{\text{util}}(a)) + u(\pi_{\text{util}}(b)) = 0.80 + 0.60 = 1.40$.

3.2 Allocation leximin (lex)

Au-delà de l'utilitarisme, une façon de mettre en œuvre une allocation équitable et Pareto-optimale est de considérer la règle *leximin* qui sélectionne, parmi toutes les allocations possibles, une allocation conduisant aux meilleurs profils d'utilité par rapport à l'ordre leximin [13]. Plus précisément, soit $z = [z_1,...,z_n]$ le vecteur d'utilité où chaque composante $z_a \in [0,Z_a]$ représente l'utilité pour l'agent $a \in \mathcal{A}$. Z_a désigne ici la meilleure valeur d'utilité pour l'utilisateur a considéré seul, c'est-à-dire pour le problème mono-agent où le meilleur chemin peut être choisi pour chaque graphe $g \in \mathcal{G}_a$. En optimisation selon le leximin, l'objectif est de maximiser lexicographiquement le vecteur $\Lambda = [\Lambda_1,...,\Lambda_n]$ obtenu après avoir ordonné $[z_1,...,z_n]$ suivant un ordre croissant.

Cette règle leximin peut être mise en œuvre par une séquence de programmes linéaires [10]. Nous adaptons ici une telle procédure au cas spécifique des PADAGs. Supposons que nous ayons déjà optimisé sur les premières $K-1$ composantes $[\Lambda_1,...,\Lambda_{K-1}]$ de Λ, pour $K \in [1..n]$. Ensuite, on peut utiliser le programme présenté par la suite pour optimiser la $K^{\text{ième}}$ composante Λ_K du profil leximin de z. Dans ce modèle, λ représente l'utilité obtenue au niveau K dans Λ, avec $\lambda \in [\Lambda_{K-1}, \max_{a\in\mathcal{A}} Z_a]$ et par convention $\Lambda_0 = 0$. y_{ak} est une variable binaire égale à 1 si l'agent $a \in \mathcal{A}$ joue le rôle de l'agent associé au niveau $k \in [1..K-1]$ dans $[\Lambda_1,...,\Lambda_{K-1}]$, 0 sinon. L'optimisation de Λ_K peut être effectuée à l'aide du programme $P_{\text{lex}}(\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C}\rangle, K, [\Lambda_1,...,\Lambda_{K-1}])$ donné ci-dessous :

$$\textbf{max} \quad \lambda \tag{8}$$
$$\text{t.q.} \quad (1),(2),(3),(4),(5),(6)$$
$$z_a = \sum_{g\in\mathcal{G}_a} \sum_{e\in E_g} u_g(e)\cdot x_e, \quad \forall a \in \mathcal{A} \tag{9}$$
$$\sum_{a\in\mathcal{A}} y_{ak} = 1, \quad \forall k \in [1..K-1] \tag{10}$$
$$\sum_{k\in[1..K-1]} y_{ak} \leq 1, \quad \forall a \in \mathcal{A} \tag{11}$$
$$\lambda \leq z_a + M \sum_{k\in[1..K-1]} y_{ak}, \quad \forall a \in \mathcal{A} \tag{12}$$
$$z_a \geq \sum_{k\in[1..K-1]} \Lambda_k \cdot y_{ak}, \quad \forall a \in \mathcal{A} \tag{13}$$

Dans la contrainte (12), $M = \max_{a\in\mathcal{A}} Z_a$ est utilisé pour ignorer les agents associés à des niveaux strictement inférieurs à K lors de l'optimisation de λ (formulation big-M). La contrainte (13) garantit que l'utilité obtenue pour l'agent associé au niveau $k \in [1..K-1]$ ne soit pas être inférieure à Λ_k. Pour mettre en œuvre la règle du leximin, il suffit alors de résoudre une séquence de problèmes P_{lex} pour $K \in \mathcal{A}$ afin d'optimiser la valeur de chaque composante du profil d'utilité.

Algorithme 1 : Algorithme leximin (lex)

Données : Un problème PADAG $\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C}\rangle$
Résultat : Une allocation leximin-optimale π

1 **pour** $K = 1$ *à* $|\mathcal{A}|$ **faire**
2 $(\lambda^*, sol) \leftarrow$ résoudre $P_{\text{lex}}(\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C}\rangle, K, [\Lambda_1,...,\Lambda_{K-1}])$
3 $\Lambda_K \leftarrow \lambda^*$
4 **pour** $g \in \mathcal{G}$ **faire**
5 $\pi(g) \leftarrow \{v \in V_g \mid sol(\beta_v) = 1\}$
6 **retourner** π

Exemple 3. L'allocation leximin optimale pour l'exemple de la figure 1 est $\pi_{\text{lex}} = \{a \mapsto \{s_a,a_1,a_4,t_a\}, b \mapsto \{s_b,b_2,b_3,t_b\}\}$, avec une utilité globale $u(\pi_{\text{lex}}) = u(\pi_{\text{lex}}(a)) + u(\pi_{\text{lex}}(b)) = 0.62 + 0.70 = 1.32$ et le vecteur d'utilité $(0.62, 0.70)$.

3.3 Allocation leximin approchée (a-lex)

Le modèle précédent met en œuvre une règle leximin exacte et assure donc l'équité de l'allocation résultante, mais il peut difficilement passer à l'échelle avec l'augmentation du nombre d'agents et d'arêtes. Notons que la vérification des tests classiques de répartition équitable (proportionnalité, absence d'envie...) est impossible puisque les agents n'enchérissent pas sur le même ensemble d'articles. Nous proposons ainsi une version approximative du calcul du leximin, basée sur un schéma maximin itéré. Fondamentalement, cette approche considère à chaque étape une utilité minimale $\Delta_a \geq 0$ pour certains agents et maximise la pire utilité parmi les agents restants, pour lesquels nous supposons arbitrairement $\Delta_a = -1$. Le problème à résoudre, appelé $P_{\text{a-lex}}(\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C}\rangle, \Delta)$, est le suivant :

$$\textbf{max} \quad \delta \tag{14}$$
$$\text{t.q.} \quad (1),(2),(3),(4),(5),(6)$$
$$\delta \leq \sum_{g\in\mathcal{G}_a} \sum_{e\in E_g} u_g(e)x_e, \quad \forall a \in \mathcal{A} \mid \Delta_a = -1 \tag{15}$$
$$\sum_{g\in\mathcal{G}_a} \sum_{e\in E_g} u_g(e)x_e \geq \Delta_a, \quad \forall a \in \mathcal{A} \mid \Delta_a \neq -1 \tag{16}$$

La méthode de résolution consiste alors à optimiser $P_{\text{a-lex}}$ de manière itérative, comme pour leximin. Comme l'indique l'algorithme 2, à chaque itération (une par agent), $P_{\text{a-lex}}$ est résolu, un pire agent $\hat{a}$ est déterminé, et son utilité minimale $\Delta_{\hat{a}}$ est fixée. La principale différence avec P_{lex} est qu'à chaque itération, dans $P_{\text{a-lex}}$, la position d'un agent dans l'ordre est déterminée une fois pour toutes, alors que dans P_{lex} l'ordre peut être révisé à chaque itération. De plus, si une égalité se produit à la ligne 5 pour déterminer le pire agent (cas $|S| > 1$), on peut se fier à une certaine heuristique ou à un choix arbitraire. Ainsi, $P_{\text{a-lex}}$ est une approximation de P_{lex} qui contient moins de variables et de contraintes.

Algorithme 2 : Algorithme leximin approché (a-lex)

Données : Un problème PADAG $\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C} \rangle$
Résultat : Une allocation maximin-optimale π

$\Delta \leftarrow [-1,...,-1]$
pour $K=1$ *à* $|\mathcal{A}|$ **faire**
  $(\delta^*,sol) \leftarrow$ résoudre $P_{\text{a-lex}}(\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C} \rangle,\Delta)$
  $S \leftarrow \underset{a\in\mathcal{A} \mid \Delta_a=-1}{\textbf{argmin}} \sum_{g\in\mathcal{G}_a} \sum_{e\in E_g} u_g(e) sol(x_e)$
  $\hat{a} \leftarrow$ choisir un agent $a \in S$
  $\Delta_{\hat{a}} \leftarrow \delta^*$
pour $g \in \mathcal{G}$ **faire**
  $\pi(g) \leftarrow \{v \in V_g \mid sol(\beta_v)=1\}$
retourner π

Exemple 4. L'allocation leximin approchée pour l'exemple de la figure 1 est $\pi_{\text{a-lex}} = \{a \mapsto \{s_a,a_1,a_4,t_a\}, b \mapsto \{s_b,b_2,b_3,t_b\}\}$, avec le vecteur d'utilité $(u(\pi_{\text{a-lex}}(a)),\ u(\pi_{\text{a-lex}}(b))) = (0.62,0.70)$ et une utilité globale $u(\pi_{\text{a-lex}}) = 0.62+0.70 = 1.32$. C'est la même chose que π_{lex} puisqu'il n'y a que deux agents et aucune égalité entre les pires utilités.

3.4 Allocation gloutonne (greedy)

Pour les décisions très rapides, le maximin itéré peut encore être trop lent. Dans de tels cas, une approche gloutonne peut fournir des allocations valides très rapidement. L'idée principale de l'allocation de chemins par approche gloutonne est d'itérer sur l'ensemble des graphes. À chaque étape, un graphe g^* qui a le meilleur chemin d'utilité est sélectionné, ce chemin est choisi comme $\pi(g^*)$, et tous les nœuds des autres graphes qui sont en conflit avec les nœuds de $\pi(g^*)$ sont désactivés. Le graphe g^* est alors supprimé, et le processus continue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de graphe à considérer. Ce processus garantit le respect des contraintes (1), (2), (3), (4), (5), (6).
Ce processus est décrit dans l'algorithme 3.

Algorithme 3 : Algorithme glouton (greedy)

Données : Un problème PADAG $\langle \mathcal{A},\mathcal{G},\mu,\mathcal{C} \rangle$
Résultat : Une allocation π

tant que $\mathcal{G} \neq \emptyset$ **faire**
  déterminer
    g^* le graphe d'utilité maximale avec le chemin p
  $\pi(g^*) \leftarrow p$
  pour $g \in \mathcal{G}$ **faire**
    $V_g \leftarrow \{v \in V_g \mid \forall w \in \pi(g^*), \{v,w\} \notin \mathcal{C}\}$
    $E_g \leftarrow \{(v,w) \in E_g \mid v \in V_g, w \in V_g\}$
  $\mathcal{G} \leftarrow \mathcal{G} \setminus \{g^*\}$
retourner π

Déterminer le meilleur chemin dans un DAG g est linéaire en temps : $\mathcal{O}(|E_g|+|V_g|)$ [4]. De toute évidence, la méthode gloutonne est équivalente à la méthode utilitaire lorsqu'il n'y a pas de conflit entre les graphes. En effet, greedy retournera le meilleur chemin pour chaque graphe, ce qui est la meilleure solution utilitaire dans un tel contexte. De plus, cette approche aboutit à un équilibre de Nash où aucun agent ne peut améliorer son utilité sans un impact négatif sur les autres agents. Ceci est équivalent à la procédure *Nashify* de [16] dans le contexte des jeux de congestion, avec un seul tour. Nous verrons dans les expériences que cet équilibre est loin d'être équitable.

Exemple 5. L'allocation gloutonne pour l'exemple de la figure 1 est $\pi_{\text{greedy}} = \{a \mapsto \{s_a,a_1,a_3,t_a\}, b \mapsto \{s_b,b_2,b_4,t_b\}$, avec une utilité globale $u(\pi_{\text{greedy}}) = u(\pi_{\text{greedy}}(a)) + u(\pi_{\text{greedy}}(b)) = 1.0+0.3 = 1.3$ et le vecteur d'utilité $(1.0,0.3)$.

3.5 Allocations *round-robin* (p-rr et n-rr)

Une approche rapide pour l'allocation équitable de biens indivisibles est le *round-robin*. Elle consiste à faire en sorte que chaque agent choisisse à tour de rôle (dans un ordre fixe prédéfini) un élément (en fonction de ses préférences) jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'élément à allouer. Comme greedy, il est polynomial en nombre d'agents et d'articles. Dans notre cas, nous pouvons considérer deux types d'articles à allouer : les chemins (approches notée p-rr) ou les nœuds (approche notée n-rr). Dans le cas des chemins, chaque agent choisit à son tour le meilleur chemin possible, compte tenu des nœuds déjà alloués (pour éviter les conflits). Ce processus fonctionne de manière similaire à celui de greedy, mais alterne entre les utilisateurs pour équilibrer les utilités. Dans le cas des nœuds, chaque agent construit de manière incrémentale le chemin associé à chacun de ses graphes, en choisissant tour à tour son meilleur prochain nœud réalisable jusqu'à ce qu'il atteigne le puits ou qu'il n'y ait plus de nœud réalisable à choisir (un chemin sans issue). Dans ce dernier cas, l'agent se voit attribuer le chemin source-puits d'utilité 0 et perd les nœuds précédemment choisis. Dans les deux approches, les contraintes (1), (2), (3), (4), (5), (6) sont respectées puisque les chemins considérés sont tous faisables. Notons que p-rr résulte en un équilibre de Nash où chaque agent s'est vu allouer le meilleur chemin compte tenu des autres allocations. Ce n'est pas le cas pour n-rr, puisque certains nœuds laissés par un agent tombant dans une impasse peuvent avoir empêché d'autres agents de trouver une meilleure solution.

Exemple 6. L'allocation *round-robin* par chemin $\pi_{\text{p-rr}}$ pour l'exemple de la figure 1 est équivalente à π_{greedy}, puisque a choisit $\{s_a,a_1,a_3,t_a\}$ et ensuite b choisit $\{s_b,b_2,b_4,t_b\}\}$. L'allocation *round-robin* par nœud $\pi_{\text{n-rr}}$ est également équivalente à π_{greedy} car a choisit d'abord a_1, puis b choisit b_2 (seule option réalisable), puis a choisit a_3 (meilleure option), et enfin b choisit b_4 (seule option réalisable).

4 Evaluation expérimentale

Dans cette section, nous évaluons les performances des méthodes d'allocation proposées pour résoudre un problème d'allocation de portions d'orbite [1] codé en PADAGs. Nous présentons le dispositif expérimental et analysons quelques résultats obtenus sur des instances synthétiques.

4.1 Scénario d'évaluation

Comme décrit dans [18], les constellations de satellites d'observation de la Terre soulèvent de nombreux défis. Nous abordons ici celui dans lequel des utilisateurs peuvent demander a priori l'exclusivité sur des portions d'orbite, afin de disposer de temps satellite pour réaliser des prises de vue sans avoir à passer systématiquement par l'arbitrage d'un opérateur central. L'objectif de notre étude est d'allouer des portions d'orbite aux

1. qui est un problème assez récent identifié mais non formalisé dans [17], à ne pas confondre avec les problèmes d'ordonnancement d'orbite [11].

©AFIA2022

FIGURE 2 – Un problème d'allocation de portions d'orbites impliquant 2 agents (a en rouge, b en bleu) demandant des portions d'orbite autour de deux plots temporels (t_1 et t_2), avec des fenêtres de tolérance autour de chaque plot (en gris) et deux portions candidates pour chaque plot ($a_1, \ldots, a_4, b_1, \ldots, b_4$).

utilisateurs, sachant que chacun a des requêtes d'observation définies par un point d'intérêt (POI) à observer avec une fréquence de revisite donnée, par exemple observer la ville de Saint-Étienne toutes les 2 heures pendant plusieurs jours. Étant donné que plusieurs satellites peuvent capturer le même point sur la Terre autour des plots temporels définis, plusieurs lots sont spécifiés par chaque utilisateur, qui se valorisent différemment en fonction de la qualité de la séquence des portions d'orbite, par exemple la proximité des plots temporels ou les angles d'acquisition. En outre, plusieurs utilisateurs peuvent être intéressés par des points d'intérêt très proches, ce qui entraîne un chevauchement des portions d'orbite qui ne peuvent être attribués simultanément aux utilisateurs correspondants.

4.2 Cadre expérimental

Nous considérons une constellation en orbite basse (500 km d'altitude) composée de n_p plans orbitaux régulièrement espacés ayant une inclinaison de 60 degrés, avec $n_p \in \{2,4,8,16\}$ et 2 satellites régulièrement espacés sur chaque plan orbital. Pour générer des instances PADAG, nous générons aléatoirement des requêtes pour 4 agents souhaitant obtenir la propriété de portions d'orbite afin de réaliser des acquisitions au sol répétitives de points d'intérêt (POI) appartenant à la même zone. Les POIs sont choisis aléatoirement dans un sous-ensemble extrait de [15]. Tous les agents ont le même modèle pour une requête r : obtenir une observation tous les jours à 8 :00 + δ_r, 12 :00 + δ_r, et 16 :00 + δ_r, avec une tolérance de 1 heure autour de chaque plot temporel, et un décalage aléatoire uniforme $\delta_r \in [-2,2]$ pour tous les plots temporels de la même requête. Pour chaque POI et chaque plot temporel, les portions d'orbite candidates sont déterminées grâce à une librairie logicielle de mécanique spatiale, en partant de l'hypothèse qu'un satellite est pertinent pour un POI dès que son élévation au-dessus de l'horizon est supérieure à 15 degrés. Les portions d'orbite incompatibles sont celles qui se chevauchent alors qu'elles appartiennent au même satellite.

Nous formulons ensuite ces requêtes et les portions d'orbite candidates sous forme de PADAGs. Chaque requête est représentée par un graphe, dans lequel les nœuds (à l'exception de la source et du puits) sont des portions d'orbite pour capturer un POI à un moment donné, et les arêtes relient deux portions d'orbite consécutives pour répondre à la requête. Par exemple, la figure 1 représente un PADAG pour deux requêtes de deux utilisateurs (a et b), avec deux plots temporels. Chaque utilisateur a deux portions d'orbite candidates par plot temporel, illustré en figure 2. Pour simplifier, nous ne considérons que les utilités attachées aux portions d'orbite, sans prendre en considération les transitions entre elles. Nous étudions une fonction d'utilité *linéaire*, qui est linéaire en fonction de la distance entre le milieu τ de la portion allouée et le plot temporel demandé (utilité linéairement décroissante de 1 lorsque τ est exactement sur le plot à 0 lorsque τ atteint les limites de la fenêtre de tolérance). Nous normalisons chaque utilité par rapport à l'utilité maximale qui peut être obtenue pour chaque graphe individuellement. Nous considérons 2 requêtes par agent, et un horizon de 365 jours, ce qui donne des DAGs ayant 1095 couches. Ce paramètre donne des DAGs avec les propriétés suivantes en moyenne :

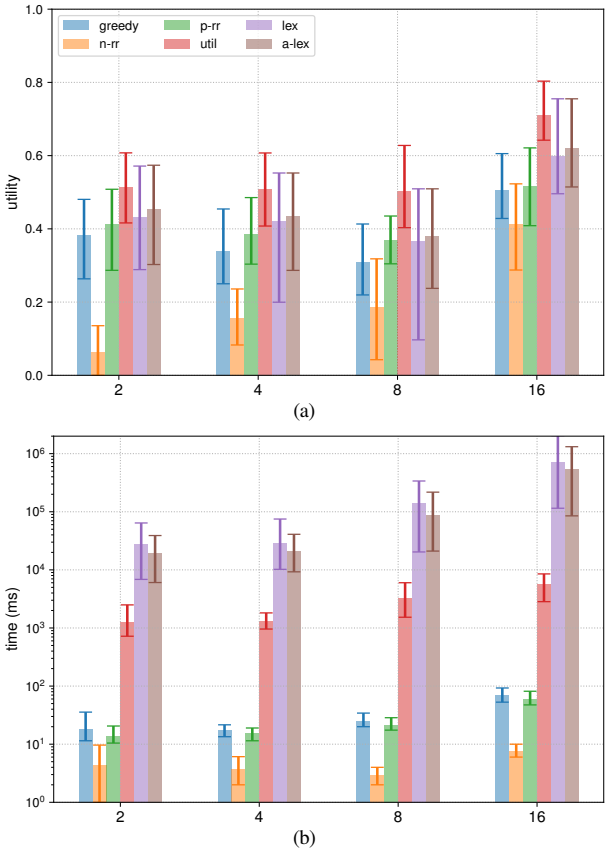


FIGURE 3 – Utilité globale moyenne (en haut) et temps de calcul (en bas) obtenus pour chaque algorithme et chaque taille de constellation.

n_p	2	4	8	16
largeur	3.08	5.41	10.05	19.38
conflits	26798.80	45636.06	82971.20	158180.20
durée (s)	603.28	600.10	599.87	598.75

En bref, la largeur du DAG (nombre de nœuds par couche) et le nombre de conflits augmentent proportionnellement avec le nombre de satellites. La durée des portions d'orbite est d'environ 10 minutes.

Les solveurs sont codés en Java 1.8 et exécutés sur un CPU Intel(R) Xeon(R) E5-2660 v3 @ 2.60GHz à 20 cœurs, 62GB RAM, Ubuntu 18.04.5 LTS. util, lex et a-lex utilisent l'API Java de IBM CPLEX 20.1 (avec un temps limite de 10 minutes). Nous avons exécuté sur 30 instances de PADAGs générés aléatoirement et tracé la moyenne avec une confiance de $[0.05,0.95]$.

4.3 Utilité

La figure 3a montre l'utilité globale normalisée moyenne pour chaque algorithme et chaque taille de constellation

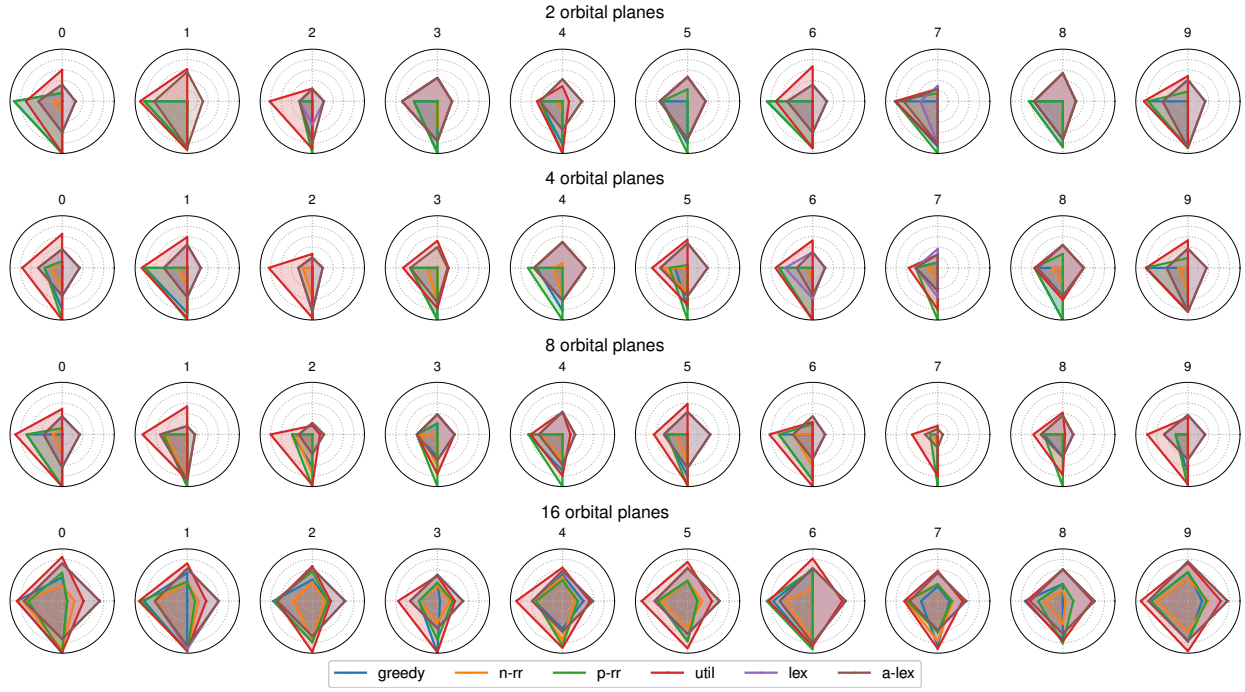


FIGURE 4 – Profils d'utilité (par ordre leximin) pour les 10 premières instances (sur 30) pour chaque taille de constellation et chaque algorithme (sud : meilleure utilité sur tous les agents ; ouest : deuxième meilleure utilité ; nord : troisième meilleure utilité ; est : pire utilité).

(exprimée en nombre de plans orbitaux). L'utilité globale normalisée est l'utilité moyenne du graphe, donc entre 0 et 1. De toute évidence, util fournit l'allocation utilitaire optimale. En deuxième position, a-lex fournit de bonnes allocations à presque 85% de la valeur optimale en moyenne. Il est intéressant de noter que lex a des performances équivalentes à a-lex (écart inférieur à 5% en moyenne). En effet, a-lex fournit des allocations légèrement meilleures du point de vue utilitaire, au détriment de l'approximation de l'équité. Les approches *round-robin* diffèrent vraiment en termes d'utilité. Bien que p-rr fournit des allocations à presque 71% de l'optimal, n-rr donne des allocations de faible utilité, à presque 10% de l'optimal sur des constellations plus petites. D'ailleurs, dans de telles configurations, il y a peu de chemins réalisables pour chaque demande. Ainsi, pour la plupart des demandes, la construction incrémentale myope des chemins aboutit à des impasses, et donc à des allocations d'une utilité de 0 ; alors qu'en considérant un autre ordre d'agents, les allocations auraient pu être meilleures. Enfin, greedy se comporte légèrement moins bien que p-rr, à près de 68% de la valeur optimale en moyenne. Sur des instances plus grandes, où de nombreux chemins existent pour répondre à chaque requête, greedy se comporte encore mieux. Plus généralement, les problèmes de constellation de grande taille sont plus faciles à résoudre du point de vue utilitaire par les algorithmes non optimaux, puisqu'il existe plus d'options pour éviter les conflits malgré leur nombre élevé.

4.4 Équité

Pour analyser l'équité des allocations résultantes, la Figure 4 fournit les profils d'utilité obtenus pour les 10 premières instances pour chaque algorithme. greedy, par principe, cherche à allouer d'abord les chemins à plus forte utilité, ce qui entraîne des allocations injustes où seuls les 2 ou 3 premiers utilisateurs sont servis, alors que plus souvent le quatrième utilisateur n'a aucune requête satisfaite. Les approches *round-robin* sont plus équitables que l'approche greedy et satisfont souvent les requêtes d'un plus grand nombre d'utilisateurs. util donne des profils avec la plus grande surface, mais la plupart du temps le quatrième utilisateur est négligé. Enfin, lex et a-lex se comportent presque identiquement (leurs profils sont superposés), montrant que l'approximation a-lex est suffisante pour produire des allocations équitables. Notons qu'avec des constellations plus grandes, puisqu'il y a de plus en plus d'options pour servir les utilisateurs, tous les algorithmes ont tendance à donner des allocations plus équitables. Néanmoins, lex et a-lex sont les meilleurs choix ici, et les concurrents *round-robin* produisent des allocations insatisfaisantes.

4.5 Temps de calcul

La figure 3b montre le temps de calcul moyen en millisecondes pour chaque algorithme et chaque taille de constellation. Comme prévu (par conception), greedy, p-rr et n-rr sont les plus rapides. n-rr qui n'effectue même pas les opérations de chemin le plus court, est de loin le plus rapide, mais donne lieu à des allocations très mauvaises et peu équitables. greedy et p-rr sont très rapides, mais sont basés sur de multiples recherches du chemin maximum dans les DAGs. p-rr fournit encore rapidement d'assez bonnes allocations utilitaires et équitables. util, basé sur la résolution d'un seul programme linéaire en nombres entiers, est 100 fois plus lent que les algorithmes les plus rapides. Ensuite, lex et a-lex sont jusqu'à deux ordres de grandeur plus lents que util sur les plus grandes constellations. Ceci est dû aux multiples appels ($|\mathcal{A}|$) au solveur MILP sur les grands problèmes. a-lex est 2 à 3 fois plus rapide que lex puisqu'il résout des MILP plus petits, tout en donnant des allocations aussi justes que celles de lex.

©AFIA2022

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé le modèle PADAG, un nouveau problème d'allocation où les agents expriment leurs préférences sur des lots d'articles sous forme de DAGs pondérés par les arêtes. Nous avons introduit et analysé plusieurs méthodes de résolution (utilitaire, leximin, leximin approché, glouton) contre les allocations *round-robin*, du point de vue de l'utilitarisme et de l'équité. Nous avons évalué ces méthodes sur de grandes instances de problèmes d'allocation de créneaux orbitaux, générées aléatoirement, avec plus de 1000 couches. Sur de grandes constellations, nous observons que la méthode leximin approché constitue un bon compromis entre l'optimalité utilitaire, l'optimalité leximin et le temps de calcul, par rapport à toutes les autres méthodes de solution. Elle est même équivalente au leximin exact sur la plupart des instances, tout en divisant les temps de calcul par un facteur de 2 à 3.

Nous identifions plusieurs pistes pour de futures investigations. Tout d'abord, comme le leximin approximatif est un compromis entre l'équité et les temps de calcul, nous aimerions étudier d'autres méthodes de résolution, encore plus réactives, notamment pour résoudre des PADAGs plus grands et des topologies spécifiques. En effet, comme pour la division des chemins et les jeux de congestion, des techniques dédiées pourraient être conçues pour des topologies données (étoiles, chaînes, etc.). Deuxièmement, puisque les PADAGs sont fortement contraints par les conflits, nous cherchons à explorer des heuristiques *min-conflict* pour améliorer nos algorithmes. Enfin, nous pensons que les PADAGs ont un grand potentiel pour être utilisés dans une variété de domaines, et nous souhaitons donc évaluer les techniques proposées sur des problèmes provenant d'autres applications, comme le domaine NFV où les chaînes de fonctions sont modélisées comme des graphes, et les incompatibilités contrôlent l'accès aux nœuds ou le domaine de la recherche de chemins dans un cadre multi-agent (les préférences de chemin sont modélisées comme des graphes, et les incompatibilités modélisent les contraintes pour éviter que deux agents occupent la même position en même temps).

Références

[1] S. Bouveret, K. Cechlárová, E. Elkind ;, A. Igarashi, and D. Peters. Fair division of a graph. In C. Sierra, editor, *Proceedings of IJCAI 2017*, pages 135–141, 2017.

[2] C. Bron and J. Kerbosch. Algorithm 457 : Finding all cliques of an undirected graph. *Commun. ACM*, 16(9) :575–577, September 1973.

[3] I. Caragiannis, D. Kurokawa, H. Moulin, A. D. Procaccia, N. Shah, and J. Wang. The unreasonable fairness of maximum nash welfare. In *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Economics and Computation*, EC '16, page 305–322, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

[4] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms*. The MIT Press, 2nd edition, 2001.

[5] P. Cramton, Y. Shoham, and R. Steinberg. *Combinatorial Auctions*. MIT Press, 2005.

[6] Y. Du, R. Sami, and Y. Shi. Path auctions with multiple edge ownership. *Theor. Comput. Sci.*, 411(1) :293–300, 2010.

[7] M. S. Hughes, B. J. Lunday, J. D. Weir, and K. M. Hopkinson. The multiple shortest path problem with path deconfliction. *Eur. J. Oper. Res.*, 292(3) :818–829, 2021.

[8] A. Igarashi and D. Peters. Pareto-optimal allocation of indivisible goods with connectivity constraints. In *The Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2019*, pages 2045–2052. AAAI Press, 2019.

[9] N. Immorlica, D. R. Karger, E. Nikolova, and R. Sami. First-price path auctions. In J. Riedl, M. J. Kearns, and M. K. Reiter, editors, *Proceedings 6th ACM Conference on Electronic Commerce (EC-2005), Vancouver, BC, Canada, June 5-8, 2005*, pages 203–212. ACM, 2005.

[10] D. Kurokawa, A. D. Procaccia, and N. Shah. Leximin allocations in the real world. *ACM Transactions on Economics and Computation*, 6(3–4), 2018.

[11] M. Lemaître, G. Verfaillie, H. Fargier, J. Lang, N. Bataille, and J.-M. Lachiver. Equitable allocation of earth observing satellites resources. In *5th ONERA-DLR Aerospace Symposium (ODAS'03)*, 2003.

[12] N. Megiddo. Optimal flows in networks with multiple sources and sinks. *Math. Program.*, 7(1) :97–107, 1974.

[13] H. Moulin. *Fair division and collective welfare*. MIT Press, 2003.

[14] N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, and V. V. Vazirani. *Algorithmic Game Theory*. Cambridge University Press, USA, 2007.

[15] OpenStreetMap. Openstreetmap points of interest (on french territory). https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/points-dinterets-openstreetmap/, 2021. Accessed : 30-08-2021.

[16] P. N. Panagopoulou and P. G. Spirakis. Algorithms for pure nash equilibria in weighted congestion games. *ACM J. Exp. Algorithmics*, 11 :2.7–es, feb 2007.

[17] G. Picard. Auction-based and distributed optimization approaches for scheduling observations in satellite constellations with exclusive orbit portions. In *Proceedings of AAMAS 2022*, pages 1056–1064, 2022.

[18] G. Picard, C. Caron, J.-L. Farges, J. Guerra, C. Pralet, and S. Roussel. Autonomous Agents and Multiagent Systems Challenges in Earth Observation Satellite Constellations. In *Proceedings of AAMAS 2021*, page 39–44, 2021.

[19] J. F. Riera, E. Escalona, J. Batallé, E. Grasa, and J. A. García-Espín. Virtual network function scheduling : Concept and challenges. In *2014 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT)*, pages 1–5, 2014.

[20] S. Yang, F. Li, S. Trajanovski, R. Yahyapour, and X. Fu. Recent advances of resource allocation in network function virtualization. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 32(2) :295–314, 2021.

[21] L. Zhang, H. Chen, J. Wu, C. Wang, and J. Xie. False-name-proof mechanisms for path auctions in social networks. In G. A. Kaminka, M. Fox, P. Bouquet, E. Hüllermeier, V. Dignum, F. Dignum, and F. van Harmelen, editors, *ECAI 2016 - 22nd European Conference on Artificial Intelligence, 29 August-2 September 2016, The Hague, The Netherlands - Including Prestigious Applications of Artificial Intelligence (PAIS 2016)*, volume 285 of *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, pages 1485–1492. IOS Press, 2016.

Apprentissage multimodal pour le diagnostic de fautes sur données séquentielles non alignées et arbitrairement longues

Victor Pellegrain[1,2], Myriam Tami[2], Michel Batteux[1], Céline Hudelot[2]

[1] IRT SystemX
[2] Université Paris Saclay, CentraleSupélec, MICS

victor.pellegrain@irt-systemx.fr

Résumé

La complexité toujours grandissante des systèmes industriels amène de nouveaux verrous scientifiques pour les tâches liées à la maintenance prévisionnelle. Dans cet article nous présentons une revue des méthodes utilisées pour réaliser un diagnostic de fautes, et pointons leurs limites pour gérer des données multi-sources et hétérogènes, propres à l'industrie 4.0. Nous formalisons théoriquement ce nouveau cadre et proposons StreaMulT, une architecture permettant de gérer des séquences multimodales au fil de l'eau, non alignées et arbitrairement longues.

Mots-clés

Apprentissage multimodal, Diagnostic, Dépendances à long terme, Données non alignées, Séquences arbitrairement longues

Abstract

The industry 4.0 era brings more and more complexity to industrial systems, resulting in new challenges for predictive maintenance strategies. This work presents a review of the methods developed to perform fault diagnosis, along with their limitations to handle heterogeneous multi-sources data. We theoretically formalize this new applicative setting and propose StreaMulT, a Streaming Multimodal Transformer able to manage heterogeneous, unaligned and arbitrary long input sequences in a streaming fashion.

Keywords

Multimodal learning, Fault diagnosis, Long-term dependencies, Unaligned data, Arbitrary long sequences

1 Introduction

Un système industriel peut rencontrer des *défaillances*, pouvant mener à l'occurrence d'événements indésirables et redoutés, avec des conséquences plus ou moins importantes selon la criticité du système. Les occurrences de défaillances font souvent suite à la présence de *fautes*, une déviation d'une des caractéristiques du système par rapport à une valeur de référence acceptable. Afin d'éviter de telles occurrences, il est souvent nécessaire de considérer les techniques de diagnostic de fautes (DF) : leur détection puis leur isolation et identification, consistant à classifier le type de faute. Ainsi, les termes "isolation et identification" et "classification" sont interchangeables comme indiqué par [25]. De nombreuses approches de DF ont été utilisées, historiquement catégorisées entre les méthodes dites "basées modèle" et celles "basées données".

Jusqu'à récemment, la majorité des données acquises sur les systèmes était composée de séries temporelles, décrivant des grandeurs physiques locales comme la température, la pression, la vibration, etc. Aujourd'hui, l'ère de l'industrie 4.0 place l'interconnectivité et l'automatisation intelligente au centre du schéma de production industrielle. Cela se traduit essentiellement par l'intégration d'une multitude de capteurs connectés dans les systèmes industriels, afin de créer des systèmes de contrôle global appelés SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Ces nombreux capteurs permettent ainsi l'acquisition d'une grande quantité de données issues d'une multitude de sources. Ils fournissent donc plus d'information pour guider les modèles d'apprentissage et ainsi améliorer leurs performances. Cependant, ces flux de données multi-sources sont de nature hétérogène : séries temporelles de mesures de capteurs, textes de rapports d'intervention, images de prises de vue d'éléments du système. Ces différentes sources de données peuvent également présenter une hétérogénéité dans leur fréquence d'acquisition. Si les grandeurs physiques sont mesurées régulièrement à une période de l'ordre de la seconde, des images sont acquises de façon plus éparse dans le temps, lorsque des rapports textuels d'intervention sont enregistrés encore plus rarement et à une fréquence sporadique. Cette double hétérogénéité constitue un véritable verrou scientifique pour les modèles d'apprentissage usuels, qui sont généralement conçus pour exploiter la structure d'un type de données particulier, commune à tous les exemples d'entraînement. Ce verrou explique l'absence d'approches exploitant simultanément différents types de données dans la littérature de la surveillance et du diagnostic, pourtant essentielles pour exploiter ces nouveaux jeux de données dans leur entièreté.

La prise en compte de données de natures hétérogènes est justement le problème auquel s'attaque la communauté de l'apprentissage multimodal [6, 12]. En revanche, les méthodes actuelles de l'état de l'art se concentrent essentiellement sur des données statiques (une image et sa description

©AFIA2022

textuelle par exemple), ou sur des données temporelles de taille fixe et généralement courte (clips vidéos de quelques secondes par exemple) et ne sont donc pas applicables en l'état sur des flux de données de capteurs industriels arbitrairement longs. Or, ce type de données est classique pour le cadre applicatif du DF. Notre contribution est donc triple, et dresse le plan de cet article :

- Dans la section 2 nous dressons un état de l'art des approches utilisées pour le DF, ainsi que pour l'apprentissage multimodal. Nous soulignons leurs forces et leurss limites dans notre cadre applicatif.
- Nous formalisons dans la section 3 un nouveau cadre théorique modélisant la tâche de détection et classification simultanées de fautes à partir de données multimodales et arbitrairement longues. Ce cadre est essentiel pour exploiter les jeux de données propres à l'industrie 4.0, mais pas seulement.
- Enfin, dans la section 4 nous présentons StreaMulT, un modèle d'apprentissage basé sur une architecture Transformer [37], capable de gérer des données multimodales, de fréquences d'acquisition hétérogènes, non alignées et arbitrairement longues. Nous validons cette architecture expérimentalement.

2 Travaux antérieurs

2.1 Diagnostic

La revue [38] classifie les approches de DF selon la connaissance a priori que le concepteur a sur les différentes fautes pouvant survenir, ainsi que sur leur expression à travers les données acquises du système. Les stratégies utilisant cette connaissance a priori en représentant le système par un modèle physique sont dites "basées modèle", et différenciées entre qualitatives et quantitatives selon les représentations mathématiques utilisées ; les approches exploitant l'historique des données sont dites "basées données". Si les méthodes basées modèle fonctionnent bien lorsque le concepteur possède une bonne compréhension a priori des lois physiques régissant le système, elles sont difficilement exploitables dans le cas contraire. Ainsi, à un certain stade de complexité du système considéré, les interactions entre les composants sont difficilement modélisables. Dans ce cas, les méthodes basées données sont une alternative adéquate : le modèle utilisé apprend ces relations à partir de l'historique des données. Nous nous concentrerons sur les approches basées données dans cette étude, et plus précisément les approches de machine learning (ML).

Machine Learning. Nous dressons ici un état des lieux des positions des différentes revues des approches de ML appliquées au DF en insistant sur leurs challenges et leurs limites pour l'industrie 4.0.

Certaines adoptent une position propre à un domaine applicatif industriel : systèmes de traitements chimiques[25], roulements [55], systèmes d'air conditionné [29]. Les approches évoquées sont donc présentées comme adaptées aux données propres à ces domaines : données de vibration et de courant de moteur [55], données de température et d'humidité [29]. A l'opposé, d'autres travaux adoptent une posture plus méthodologique. Les plus récents [3, 28, 18] motivent leur démarche par l'apparition de nouveaux challenges pratiques liés à l'arrivée de l'industrie 4.0, comme notamment la capacité à gérer des quantités massives de données multi-sources en temps rapide.

Ces études présentent les approches ML comme plus adaptées lorsque les profils de fautes sont complexes. Ainsi, [55] font part de la limite des approches basées modèles à détecter précocement des fautes en raison de symptômes non traçables par ce type de modèles, ou à correctement démêler la présence de plusieurs fautes simultanément. Si certains travaux ne traitent que de la détection de fautes [21, 42], la majorité considère également la partie isolation et identification, bien que [3] utilisent parfois le terme de diagnostic pour évoquer la détection seule. En revanche, comme souligné par [28], en pratique deux méthodologies co-existent : si la communauté de la maîtrise statistique des procédés (MSP) traite les tâches de détection et d'isolation et identification de fautes de manière séquentielle, la communauté ML les traite parfois simultanément, sous la forme d'une classification en $C + 1$ classes, décomposées en une classe de fonctionnement normal, et C classes de fautes distinctes.

Les modèles de ML pour le DF sont généralement composés d'un module d'extraction de caractéristiques et d'un module de diagnostic [18]. Certains modules d'extraction se concentrent sur le domaine temporel pour capturer et caractériser l'information présente dans les séries temporelles fournies par les capteurs du système, par exemple via l'utilisation de réseaux de neurones [54]. Il est également d'usage d'avoir recours à des outils de traitement du signal : [19, 35, 56] utilisent respectivement des transformées de Fourier, de Laplace et en ondelettes. Ce choix de module d'extraction est fortement influencé par la connaissance a priori du concepteur sur les données.

Le module de diagnostic est ensuite composé soit d'un unique modèle assurant simultanément détection, isolation et identification de faute ; soit de deux sous-modules séquentiels propres à chaque tâche. Dans le cas où le jeu de données est étiqueté, le module unique de classification recevant ces caractéristiques est libre d'utiliser le modèle de ML de son choix : SVM [17], forêt aléatoire [47], réseau de neurones peu profond [15], réseau de neurones récurrents (RNN) [46], etc. Cette approche de détection et classification simultanées est cependant parfois critiquée [28] car pouvant mener à des problèmes pratiques : (1) La rareté des occurences de fautes amène un problème de déséquilibre entre les classes. (2) Le modèle donne le même poids à la tâche de détection et celle d'identification. Pour pallier ces difficultés, une première tâche de surveillance peut être effectuée via des méthodes de détection d'anomalies [10]. Ces méthodes semi-supervisées modélisent le comportement normal du système dans la phase d'apprentissage, et classifient comme faute les points effectuant une déviation significative lors de la phase d'inférence. Elles sont plus robustes au cadre déséquilibré et pourront être suivies par un modèle de classification pour identifier la faute. Enfin, si les conditions de fonctionnement normal du système sont inconnues, il est possible de concevoir le modèle

de diagnostic en utilisant des approches de clustering [9].

Deep Learning. Les approches de ML classiques se retrouvent aujourd'hui assez limitées face aux données plus complexes de l'industrie 4.0 comme décrit par [55, 18, 26]. Pour répondre à ces challenges, des modèles de Deep Learning (DL) sont utilisés, montrant leur capacité à extraire automatiquement les caractéristiques les plus saillantes pour une tâche subsidiaire [7], ici le diagnostic. Ainsi, de nombreux travaux ont montré la supériorité des modèles de DL pour le DF, utilisant aussi bien comme algorithme d'apprentissage de représentation des modèles discriminatifs (réseaux convolutifs [44], RNN profonds [1], Transformers [43], etc.) que des modèles génératifs (modèles probabilistes graphiques [50], Auto-encoders [16], GANs [45]).

Diagnostic à partir de données multimodales. La complexité des données acquises s'intensifie encore de nos jours, avec des capteurs mettant à disposition des données multimodales. Si certains travaux s'attaquent au DF à partir d'images thermiques [8], de rayons X [27], de photographies [41], ou de rapports textuels de maintenance [39], l'application à des données multimodales (de natures hétérogènes) en est à son balbutiement. La majorité des travaux relatifs à la tâche de DF et mentionnant des données "multimodales" fait en fait référence à des modes de fonctionnement différents de l'appareil (comme un climatiseur fonctionnant en mode économique) [32]. Pour [57], "multimodal" fait référence aux différentes dérivées de leurs séries numériques. A notre connaissance, seuls deux travaux considèrent des données multimodales (au sens "hétérogènes") dans une optique de maintenance. [22] fusionnent des données numériques de signaux vibratoires avec des images thermiques du système afin d'améliorer les performances de classification. Ils utilisent une approche de ML classique, réalisant l'extraction de caractéristiques grâce à une transformée de Hilbert, et utilisant la concaténation comme technique de fusion. Malheureusement, leur jeu de données n'est pas mis à disposition de la communauté. [48] appliquent un modèle multimodal à une tâche connexe de la notre : le pronostic de défaillances, dont l'objectif est de prévoir le temps restant avant une défaillance. En ce sens, la tâche finale est une régression, mais leur cadre d'étude peut se transposer au nôtre. Leur approche traite trois modalités (données numériques de capteurs, images et textes) sous la forme de trois branches distinctes, apprenant une représentation propre à chaque modalité (à l'aide de couches convolutives pour les images et le texte, et d'une couche linéaire pour la modalité numérique). Ils adoptent une approche de fusion tardive, par concaténation de chaque sortie de branche, avant d'appliquer une dernière couche de régression. Cet article est le travail s'appuyant sur un jeu de données public le plus proche de notre problème considéré. Cependant, ce jeu de données comporte quelques points négatifs pour notre cadre. Premièrement, les images considérées ne sont en réalité que des graphiques correspondant aux courbes acquises dans la modalité numérique. Elles ne représentent donc pas réellement des images issues d'une prise de vue du système, qui ont une structure bien différente à l'échelle locale, et n'apportent de surcroît pas d'information supplémentaire sur l'état du système. Deuxièmement, le jeu de données est simulé. Cela implique un manque de richesse et de diversité pour la modalité textuelle. On retrouve beaucoup de fois les mêmes phrases au mot près dans les exemples et on perd ainsi une partie de la nature non-structurée du texte brut.
Les mécanismes de fusion de ces deux seules contributions existantes sur cette application sont relativement simples (concaténation). Nous passons en revue dans la section suivante les enjeux et avancées de l'apprentissage multimodal. Par ailleurs, devant l'absence de jeu public de données multimodales et réelles dans les communautés liées aux systèmes industriels, nous nous sommes tournés vers des jeux de données issus d'autres domaines (voir section 5). Par conséquent, nous invitons la communauté industrielle à mettre à disposition un jeu de données représentatif de ce problème afin d'encourager à la réalisation de futurs travaux sur cette tâche à forts enjeux.

2.2 Apprentissage multimodal

L'accès à différentes sources d'observation d'un même phénomène nous donne de l'information complémentaire et/ou supplémentaire (parmi d'autres types de relation entre modalités [11]). Ce gain d'information est en général bénéfique pour les performances du modèle utilisé pour une tâche considérée [14] mais se traduit par des espaces de définition et des propriétés hétérogènes : données structurées et continues (séries temporelles de grandeurs physiques) ou non structurées, discrètes et parcimonieuses (one-hot encodings de texte libre). Ainsi, un même concept aura des représentations vectorielles très différentes dans chaque espace propre à une modalité, d'où une difficulté à mesurer une similarité entre ces dernières. Il s'agit du fossé d'hétérogénéité [12]. De ce verrou découlent plusieurs enjeux comme la transduction ou l'alignement entre modalités [12, 6]. Le challenge nous intéressant ici est celui de la fusion entre modalités, souvent lié à l'apprentissage de représentation jointe multimodale qui a pour but de projeter des représentations unimodales dans un sous-espace sémantique joint. Les premières approches adoptent des stratégies de fusion précoce en concaténant [23] ou multipliant [53] les caractéristiques de chaque modalité ; ou de fusion tardive, combinant les décisions de modèles unimodaux par système de vote [40]. A l'opposé de ces méthodes modèle-agnostiques, certaines architectures de DL modélisent les interactions inter et intra-modalités afin d'apprendre les meilleures représentations jointes. Des approches génératives utilisent par exemple des variantes multimodales de machines de Boltzmann [33], ou des réseaux de croyance profonds [34], apprenant une distribution jointe sur les modalités d'entrée. Ces architectures entraînables de façon non supervisée peuvent générer des modalités à partir d'une autre, et sont donc robustes aux modalités manquantes. Cependant, le coût élevé d'approximation d'inférence des algorithmes est souvent rédhibitoire à leurs usages.
L'autre grande famille de modèles génératifs utilisés est celle des autoencoders. Ils visent à apprendre une représen-

©AFIA2022

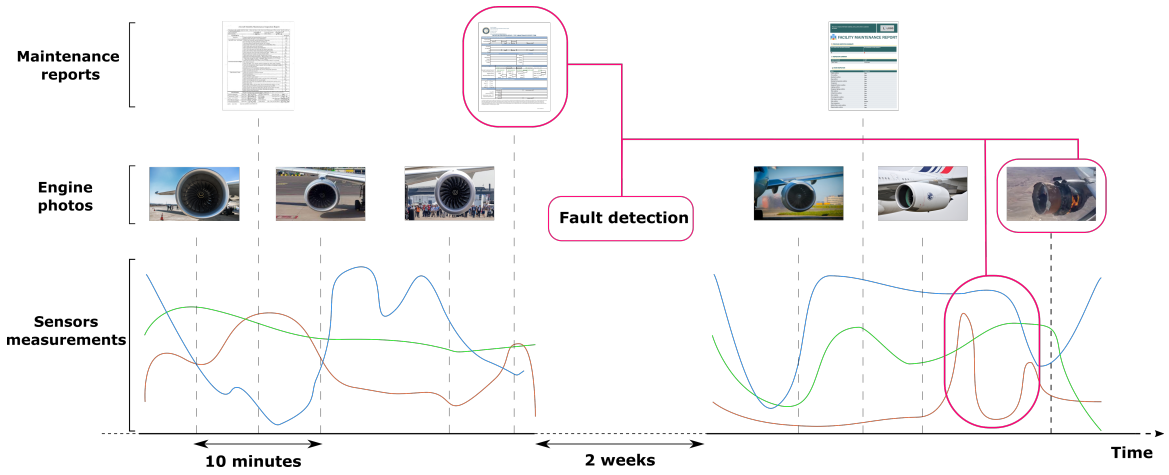


FIGURE 1 – Exemple d'un système industriel produisant des données hétérogènes, non alignées, arbitrairement longues, dans le cadre d'une tâche de diagnostic de faute.

tation condensée, qui capture les éléments essentiels à la reconstruction de l'objet initial. Des adaptations multimodales ont été développées [24], dans lesquelles la couche intermédiaire commune prend en entrée les deux modalités, et essaye de les reconstruire à partir de ce vecteur intermédiaire commun. Cependant, ces architectures ne se basant que sur la reconstruction des données d'entrée, les représentations apprises sont agnostiques à une tâche précise et donc génériques. Cela peut impliquer une baisse de performances si l'apprentissage n'est pas guidé par des contraintes supplémentaires [31].

Des modèles discriminatifs utilisant des mécanismes d'attention [5] ont aussi été utilisés dans un but à la fois d'amélioration de performances et de gain d'interprétabilité. A une échelle intra-modalité, le mécanisme d'attention est utilisé pour sélectionner les composantes les plus pertinentes de chaque modalité, dépendant du contexte donné par les autres modalités [49]. A une échelle inter-modalités, ce type de mécanismes permet de pondérer la contribution de chaque modalité dans la prise de décision [20].

Récemment, ce mécanisme d'attention cross-modal a été étendu aux architectures de Transformers, avec pour but l'apprentissage de représentations contextuelles [36, 2]. Ces approches ont l'avantage de pouvoir gérer des modalités non alignées [36]. Effectivement, les données considérées dans le cadre du DF sont non-alignées temporellement : une faute apparaissant à un temps spécifique t pourra être corrélée à la fois à des données récentes de capteurs et à des rapports textuels de maintenance plus antérieurs. Les approches multimodales classiques utilisées pour des données séquentielles (basées sur des RNN), ne gèrent pas ce problème de non-alignement [52]. L'approche [36] s'attaque à ce challenge grâce à son module de Transformer cross-modal. L'architecture StreaMulT proposée section 4 s'inspire de ce modèle. Elle a l'avantage de s'adapter au cadre de données multimodales arbitrairement longues, que nous introduisons maintenant.

3 Cadre théorique

Nous nous plaçons dans le contexte applicatif du DF et considérons des flux de données hétérogènes à la fois par leur nature (séries numériques, texte, images, etc.) et par leurs fréquences d'acquisition. Nous supposons que ces différents flux sont non alignés et que l'historique des données est arbitrairement long. Enfin, nous considérons le cas où un système industriel peut ne jamais s'arrêter de fonctionner et nécessite que les séquences d'entrée soient traitées au fil de l'eau (en "streaming"). Cet exemple est illustré en Fig. 1.

Sans perte de généralité, nous considérons trois modalités α, β, γ et leurs séries temporelles $(X_\alpha, X_\beta, X_\gamma)$ correspondantes. Chaque série temporelle est indicée par le temps, possède ses propres temps d'acquisition et son propre espace de définition. Ainsi, pour la modalité α,

$$X_\alpha := (X_\alpha(t))_{t\in\mathcal{T}_\alpha} \text{ et } \forall t \in \mathcal{T}_\alpha,\ \ X_\alpha(t) \in \mathbb{R}^{d_\alpha}$$

où $\mathcal{T}_\alpha$ et d_α sont respectivement l'ensemble dénombrable des temps d'acquisition de la modalité α et sa dimension de caractéristiques associée.

L'objectif est de réaliser une tâche de prédiction au cours du temps. Soit $\mathcal{X} := \left\{[X(s)]_{s\leq t}, t \in \mathbb{R}\right\}$, où $[X(s)]_{s\leq t} = \bigcup_{j\in\{\alpha,\beta,\gamma\}} \{X_j(s), s \leq t\}$ sont les données de toutes modalités acquises avant le pas de temps t. Etant donné un espace de labels $\mathcal{Y}$ commun à toute modalité, le but est de trouver la fonction de prédiction optimale $h^*\colon \mathcal{X} \mapsto \mathcal{Y}$ minimisant une fonction de perte L sur un espace d'hypothèse $\mathcal{H}$: $h^* = \arg\min_{h\in\mathcal{H}} L(h)$ avec $L(h) := \frac{1}{|\mathcal{T}_y|}\sum_{t\in\mathcal{T}_y} l\left(h\left([X(s)]_{s\leq t}\right), y_t\right)$, l une fonction de score d'erreur entre la prédiction de h au temps t et la vérité terrain y_t, et $\mathcal{T}_y$ l'ensemble dénombrable des temps d'acquisition des labels, dont la définition dépend de la tâche. Pour une tâche de DF, $\mathcal{T}_y := \mathcal{T}_\alpha \cup \mathcal{T}_\beta \cup \mathcal{T}_\gamma$ car l'objectif est de détecter et classifier une faute à toute nouvelle acquisition de données.

A notre connaissance, ce cadre de données multimodales, possédant des temps d'acquisition différents, potentielle-

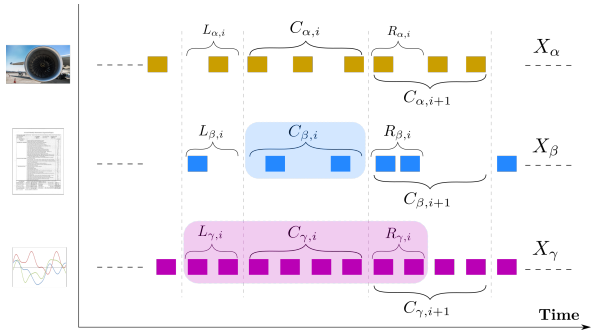


FIGURE 2 – Mécanisme de traitement par blocs pour l'apprentissage multimodal. La zone bleue représente un segment central pour la modalité β et la zone rose représente un segment contextuel pour la modalité γ.

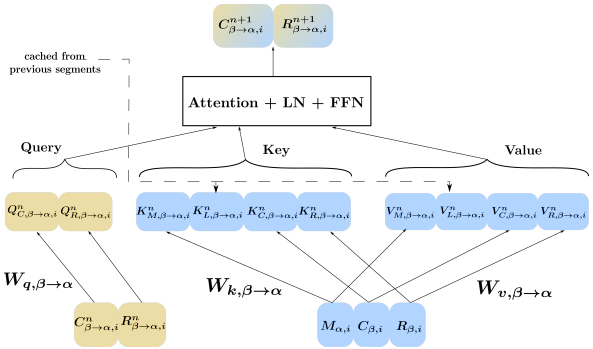


FIGURE 3 – Module de Streaming Crossmodal Transformer

ment non alignées et arbitrairement longues n'a jamais été considéré auparavant.

4 Modèle proposé

Pour répondre à ces challenges, nous proposons StreaMulT (Streaming Multimodal Transformer). La longueur arbitraire des séquences d'entrée est contrôlée par un mécanisme de traitement par blocs et la multimodalité est gérée par des modules de Transformers cross-modaux.

Transformer cross-modal. Le module d'attention cross-modale [36] traite l'hétérogénéité des données en exprimant une modalité cible α avec les caractéristiques d'une modalité source β. L'attention cross-modale exprimant X_α à partir de X_β , notée $X_{\beta\to\alpha}$ se calcule comme suit :

$$X_{\beta\to\alpha} := Attn(Q_\alpha, K_\beta, V_\beta) = \text{softmax}\left(\frac{Q_\alpha K_\beta^T}{\sqrt{d_k}}\right) V_\beta$$

$$= \text{softmax}\left(\frac{X_\alpha W_{Q_\alpha} W_{K_\beta}^T X_\beta^T}{\sqrt{d_k}}\right) X_\beta W_{V_\beta}$$

avec Q_α la matrice de requêtes de la modalité α, K_β, V_β les matrices de clés et valeurs de la modalité β et $W_{Q_\alpha}, W_{K_\beta}, W_{V_\beta}$ des poids appris. Cette "scaled dot-product attention" [37] modélise les dépendances à long terme à travers son produit matriciel et gère ainsi des données non alignées de la même façon [36].

Mécanisme de traitement par blocs. La longueur arbitraire des séquences d'entrée implique deux verrous majeurs. (1) L'entraînement du modèle est insoluble en raison de la complexité quadratique de l'architecture Transformer, (2) l'inférence ne peut s'effectuer en streaming, l'architecture Transformer ayant besoin de la séquence d'entrée complète pour effectuer le produit matriciel. Pour résoudre ces problèmes, nous adoptons un mécanisme de traitement par blocs, découpant les séquences d'entrée en petits segments disjoints $(C_i)_{i\geq 0}$ (voir Fig. 2). Puis nous calculons l'attention sur ces segments et réduisons ainsi la complexité du modèle durant le calcul de l'attention cross-modale. Nous ajoutons à ces segments disjoints des blocs de contextes gauche et droit, concaténés aux segments initiaux afin de former des segments contextuels $X_i = [L_i : C_i : R_i]$. Pour véhiculer l'information entre les segments, nous utilisons une banque de mémoire, à la manière d'Emformer [30].

Architecture globale. L'architecture globale est illustrée Fig. 4. Nous décrivons ici le traitement de la modalité α. X_α passe d'abord par une couche convolutive 1D afin de modéliser une structure locale temporelle, et de projeter l'ensemble des modalités dans un espace commun de dimension d. Les bornes des segments sont ensuite délimitées, et les segments contextuels $X_{\alpha,i}$ sont traités en parallèle. Ils passent à travers un module Emformer unimodal afin d'initialiser la banque de mémoire propre à cette modalité. Ensuite, chaque paire de modalités source/cible (β / α) est traitée par son propre module Streaming Crossmodal Transformer (SCT) (voir Fig. 3) : chaque segment de la modalité cible $X_{\alpha,i}$ est exprimé en utilisant le segment temporel correspondant de la modalité source $X_{\beta,i}$ et la banque de mémoire de cette même modalité $M_{\beta,i}$, contenant l'information compressée des segments précédents.
Ainsi, pour chaque couche n du module SCT $\beta \to \alpha$:

$$\left[\hat{C}^n_{\alpha,i}, \hat{R}^n_{\alpha,i}\right] = \text{LN}(\left[C^n_{\alpha,i}, R^n_{\alpha,i}\right])$$

$$\left[\hat{C}^n_{\beta,i}, \hat{R}^n_{\beta,i}\right] = \text{LN}(\left[C^n_{\beta,i}, R^n_{\beta,i}\right])$$

$$K^n_{\beta,i} = \left[K^n_{M,\beta\to\alpha,i}, K^n_{L,\beta\to\alpha,i}, K^n_{C,\beta\to\alpha,i}, K^n_{R,\beta\to\alpha,i}\right]$$

$$V^n_{\beta,i} = \left[V^n_{M,\beta\to\alpha,i}, V^n_{L,\beta\to\alpha,i}, V^n_{C,\beta\to\alpha,i}, V^n_{R,\beta\to\alpha,i}\right]$$

$$Z^n_{C,\beta\to\alpha,i} = Attn(Q^n_{C,\beta\to\alpha,i}, K^n_{\beta,i}, V^n_{\beta,i}) + C^n_{\beta\to\alpha,i}$$

$$Z^n_{R,\beta\to\alpha,i} = Attn(Q^n_{R,\beta\to\alpha,i}, K^n_{\beta,i}, V^n_{\beta,i}) + R^n_{\beta\to\alpha,i}$$

$$\left[\hat{C}^{n+1}_{\alpha,i}, \hat{R}^{n+1}_{\alpha,i}\right] = \text{FFN}(\text{LN}([Z^n_{C,\beta\to\alpha,i}, Z^n_{R,\beta\to\alpha,i}]))$$

$$\left[C^{n+1}_{\alpha,i}, R^{n+1}_{\alpha,i}\right] = \text{LN}(\left[\hat{C}^{n+1}_{\alpha,i}, \hat{R}^{n+1}_{\alpha,i}\right] + [Z^n_{C,\beta\to\alpha,i}, Z^n_{R,\beta\to\alpha,i}])$$

où,

$$\left[K^n_{M,\beta\to\alpha,i}, K^n_{C,\beta\to\alpha,i}, K^n_{R,\beta\to\alpha,i}\right] = W_{k,\beta\to\alpha}\left[M_{\beta,i}, \hat{C}^n_{\beta,i}, \hat{R}^n_{\beta,i}\right]$$

$$\left[V^n_{M,\beta\to\alpha,i}, V^n_{C,\beta\to\alpha,i}, V^n_{R,\beta\to\alpha,i}\right] = W_{v,\beta\to\alpha}\left[M_{\beta,i}, \hat{C}^n_{\beta,i}, \hat{R}^n_{\beta,i}\right]$$

$$\left[Q^n_{C,\beta\to\alpha,i}, Q^n_{R,\beta\to\alpha,i}\right] = W_{q,\beta\to\alpha}\left[C^n_{\beta\to\alpha,i}, R^n_{\beta\to\alpha,i}\right]$$

et $\left(K^n_{L,\beta\to\alpha,i}, V^n_{L,\beta\to\alpha,i}\right)$ sont les clés et valeurs mises en cache correspondant aux segments précédents, dont la taille est fixée par la taille du contexte gauche. LN, FFN, Attn correspondent respectivement à "Layer Normalization", "Feed-Forward" et "scaled dot-product Attention".
Après la dernière couche N, les contextes droits

©AFIA2022

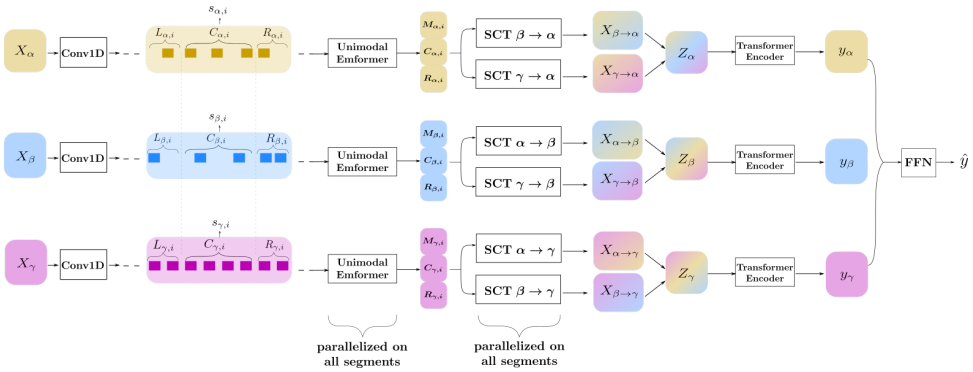


FIGURE 4 – Architecture globale du Streaming Multimodal Transformer. SCT signifie Streaming Crossmodal Transformer. Les couleurs différentes représentent les différentes modalités et les dégradés expriment les caractéristiques cross-modales.

$(R^N_{\beta\to\alpha,i})_{i>0}$ sont défaussés. Les segments $(C^N_{\beta\to\alpha,i})_{i>0}$ sont concaténés pour former la représentation cross-modale finale $X_{\beta\to\alpha}$. Les représentations cross-modales correspondant à la même modalité cible α sont concaténées dans un vecteur $Z_\alpha := (X_{\beta\to\alpha}, X_{\gamma\to\alpha})^T$, qui est traité par un encoder de Transformer classique afin d'exploiter la nature séquentielle des données. La sortie y_α de cette couche est enfin concaténée avec celles des autres modalités, et une couche linéaire résulte en la prédiction $\hat{y}_t$.

5 Expériences et résultats

Comme abordé en section 2, à notre connaissance il n'existe pas de jeu de données public représentatif de notre cadre. Nous conduisons donc nos expériences sur le jeu de données CMU-MOSEI [4], afin d'évaluer empiriquement notre architecture StreaMulT et la comparer avec des approches existantes sur un cadre proche de celui recherché. La tâche associée est une analyse de sentiments sur ces clips vidéos, étiquetés avec un score de -3 à 3. Comme dans les travaux précédents [36], nous évaluons les performances de notre modèle suivant 5 métriques : l'accuracy sur 7 classes, l'accuracy binaire, le score F1, l'erreur moyenne absolue et la corrélation entre les prédictions du modèle et les étiquettes. Pour souligner la valeur ajoutée de StreaMulT, nous conduisons nos expériences dans deux cadres différents. (1) Nous considérons d'abord les clips vidéo comme séquences complètes, et observons les performances de StreaMulT lorsque nous divisons ces clips en segments courts. Pour pouvoir définir les mêmes bornes de segments entre modalités, nous utilisons la version alignée de CMU-MOSEI. Nous décidons de diviser chaque séquence en 5 segments de 10 pas de temps. (2) Nous concaténons ensuite tous les clips vidéos d'un même orateur et considérons cette suite de clips comme séquence d'entrée, afin de construire artificiellement des séries arbitrairement longues. Nous choisissons ici comme segments les clips initiaux et pouvons donc utiliser la version non-alignée. StreaMulT n'a pas pour objectif de battre les architectures les plus performantes sur la tâche d'analyse de sentiments multimodal [51, 13], sa valeur ajoutée étant sa capacité à gérer des séquences multimodales non alignées **arbitrairement longues**. Ainsi nous ne reportons ici que les métriques concernant le Transformer multimodal données dans [36], pour une comparaison équitable. Nous avons également utilisé le code officiel de cette approche mis à disposition, en gardant les valeurs d'hyperparamètres données dans [36]. Nous ne sommes cependant pas parvenus à reproduire exactement les résultats communiqués dans l'article. Toutes les métriques sont moyennées sur 5 trajectoires d'entraînement.

Métrique	Acc_7^h	Acc_2^h	F1^h	MAE^l	Corr^h
MulT [36]	**51.8**	**82.5**	**82.3**	**0.580**	**0.703**
MulT‡(1)	49.32	81.05	81.42*	0.615	0.666
StreaMulT‡ (1)	50, 08*	81.08*	81.01	0.608*	0.671*
MulT‡(2)	-	-	-	-	-
StreaMulT‡ (2)	49.25	80.55	80.84	0.621	0.665

TABLE 1 – Résultats sur CMU-MOSEI. Les meilleurs résultats sont en gras. ‡ : notre implémentation ou reproduction depuis le code officiel, avec les valeurs d'hyperparamètres fournies. * : meilleur score parmi la catégorie ‡. (1) et (2) font références aux deux environnements décrits.

Le tableau 1 montre que notre architecture reproduit les résultats du Transformer Multimodal dans l'environnement (1) (fait même un peu mieux sur 4 métriques), ce qui démontre la capacité de la banque de mémoire à véhiculer l'information pertinente entre les segments, tandis que MulT a accès à la séquence dans son intégralité. Pour l'environnement (2), les performances baissent légèrement, mais ce cadre d'évaluation artificiel permet de mettre en évidence la plus-value de notre architecture qui est sa capacité à traiter au fil de l'eau des données arbitrairement longues. A l'inverse, MulT rencontre une erreur de mémoire et n'est pas capable de gérer ces longues séquences.
Pour valider qualitativement notre modèle, nous affichons la carte de chaleur des différents poids d'attention du modèle en Fig. 5. Celle-ci nous rappelle que les séquences de langage sont non alignées entre les modalités : à l'inverse d'une diagonale monotone, nous observons différentes activations sur des lignes verticales, correspondant à certains embeddings textuels corrélés à plusieurs images.
Si des non-alignements restent dans le champ d'un même segment, comme représenté dans le quatrième segment par le rectangle vert, la banque de mémoire permet d'accéder à des données à plus longue portée, comme illustré dans

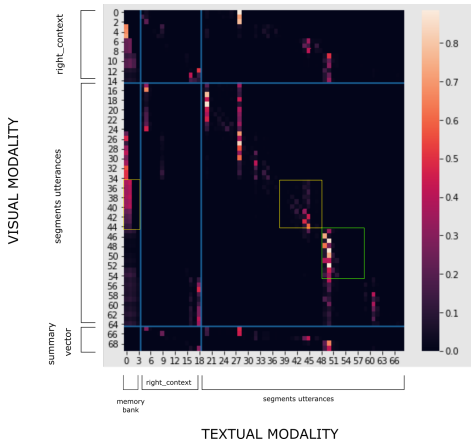


FIGURE 5 – Carte de chaleur des poids d'attention pour le module cross-modal images (requêtes) / texte (clés). La séquence de taille 50 est découpée en segments de taille 10, avec des contextes gauche et droit de tailles 10 et 3. Les lignes bleues délimitent les interactions entre les différents composants des séquences (contextes, segments, mémoire).

le troisième segment par les deux rectangles jaunes. Le droit indique des dépendances non alignées au sein du troisième segment, et le gauche montre l'activation de certaines images de ce segment par des caractéristiques textuelles antérieures, sauvegardées dans la banque de mémoire.
Ces comportements différents témoignent de la capacité de l'architecture StreaMulT à adapter sa stratégie selon le contexte, accédant à des données non-alignées du passé via la banque de mémoire lorsque nécessaire.

6 Conclusion

Notre état des lieux des méthodes utilisées pour le diagnostic de fautes dresse leurs limites pour répondre aux défis posés par l'industrie 4.0 : gérer des séquences hétérogènes, non alignées et arbitrairement longues. Notre architecture StreaMulT combine l'attention cross-modale et le mécanisme de traitement par blocs parallélisé afin de traiter ces séquences multimodales en streaming. Les expériences conduites sur le jeu de données CMU-MOSEI ont montré des résultats prometteurs : une conservation des performances couplée à une capacité à gérer des séquences arbitrairement longues durant la phase d'entraînement, et à traiter ces flux de données en streaming à l'inférence.

Remerciements Victor Pellegrain est financé par l'IRT SystemX en collaboration avec CentraleSupélec. Ce travail a été réalisé grâce aux ressources du centre de calcul Mésocentre de CentraleSupélec et de l'ENS Paris-Saclay, soutenu par le CNRS et la Région Ile-de-France.

Références

[1] Abed, W. : A robust bearing fault detection and diagnosis technique for brushless dc motors under non-stationary operating conditions. JCAES (2015)

[2] Akbari, H., et al. : VATT : transformers for multimodal self-supervised learning from raw video, audio and text. CoRR abs/2104.11178 (2021)

[3] Angelopoulos, A., et al. : Tackling faults in the industry 4.0 era—a survey of machine-learning solutions and key aspects. Sensors 20(1), 109 (2019)

[4] Bagher Zadeh, A., et al. : Multimodal language analysis in the wild : CMU-MOSEI dataset and interpretable dynamic fusion graph. In : ACL 2018

[5] Bahdanau, D., et al. : Neural machine translation by jointly learning to align and translate. In : ICLR 2015

[6] Baltrusaitis, T., et al. : Multimodal Machine Learning : A Survey and Taxonomy. IEEE TPAMI 41 (2019)

[7] Bengio, Y., et al. : Representation learning : A review and new perspectives. IEEE TPAMI 35 (2013)

[8] Choudhary, A., et al. : Bearing fault diagnosis of induction motor using thermal imaging (2018)

[9] Diaz Rozo, J., et al. : Machine learning-based cps for clustering high throughput machining cycle conditions. Procedia Manufacturing 10, 997–1008 (2017)

[10] Goldstein, M., Uchida, S. : A comparative evaluation of unsupervised anomaly detection algorithms for multivariate data. PloS one 11, e0152173 (2016)

[11] Grifoni, P. : Multimodal human computer interaction and pervasive services (2009)

[12] Guo, W., et al. : Deep Multimodal Representation Learning : A Survey. IEEE Access 7 (2019)

[13] Han, W., et al. : Improving multimodal fusion with hierarchical mutual information maximization for multimodal sentiment analysis. In : EMNLP 2021. pp. 9180–9192. ACL (2021)

[14] Huang, Y., et al. : What makes multimodal learning better than single (provably). ArXiv 2106.04538 (2021)

[15] Jafar, R., et al. : Application of artificial neural networks (ann) to model the failure of urban water mains. Mathematical and Computer Modelling (2010)

[16] Jia, F., et al. : Deep neural networks : A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data. Mechanical Systems and Signal Processing 72-73 (2015)

[17] Konar, P., et al. : Bearing fault detection of induction motor using wavelet and neural networks. (2009)

[18] Li, Z. : Deep learning driven approaches for predictive maintenance : A framework of intelligent fault diagnosis and prognosis in the industry 4.0 era (2018)

[19] Liu, Y., et al. : Application to induction motor faults diagnosis of the amplitude recovery method combined with fft. Mechanical Systems and Signal Processing 24, 2961–2971 (2010)

[20] Long, X., et al. : Multimodal keyless attention fusion for video classification. AAAI 2018 pp. 7202–7209

[21] Luo, B., et al. : Early fault detection of machine tools based on deep learning and dynamic identification. IEEE TIE 66(1), 509–518 (2019)

©AFIA2022

[22] Mian, T., et al. : A sensor fusion based approach for bearing fault diagnosis of rotating machine. Journal of Risk and Reliability 0(0), 1748006X211044843 (0)

[23] Morency, L.P., et al. : Towards multimodal sentiment analysis : Harvesting opinions from the web. In : ICMI 2011. p. 169–176. ACM

[24] Ngiam, J., et al. : Multimodal Deep Learning. ICML 3(3), 194–203 (2011)

[25] Nor, N., et al. : A review of data-driven fault detection and diagnosis methods : Applications in chemical process systems. Reviews in Chemical Engineering 36 (2019)

[26] Peng, Y., et al. : Current status of machine prognostics in condition-based maintenance : A review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 50, 297–313 (2010)

[27] Reid, A., et al. : Fault location and diagnosis in a medium voltage epr power cable. IEEE TDEI 20 (2013)

[28] Reis, M.S., Gins, G. : Industrial process monitoring in the big data/industry 4.0 era : from detection, to diagnosis, to prognosis. Processes 5(3) (2017)

[29] Rogers, A., et al. : A review of fault detection and diagnosis methods for residential air conditioning systems. Building and Environment 161, 106236 (2019)

[30] Shi, Y., et al. : Emformer : Efficient memory transformer based acoustic model for low latency streaming speech recognition (2020)

[31] Silberer, C., et al. : Learning grounded meaning representations with autoencoders. ACL 2014 1, 721–732

[32] Sipple, J. : Interpretable, multidimensional, multimodal anomaly detection with negative sampling for detection of device failure. In : ICML 2020. vol. 119

[33] Srivastava, N. : Multimodal Learning with Deep Boltzmann Machines 15, 2949–2980 (2014)

[34] Srivastava, N., et al. : Learning representations for multimodal data with deep belief nets. ICML Workshop (2012)

[35] Taneja, G., et al. : Reliability modelling and analysis of a single machine subsystem of a cable plant (2017)

[36] Tsai, Y.H.H., et al. : Multimodal transformer for unaligned multimodal language sequences. ACL 2019

[37] Vaswani, A., et al. : Attention is all you need. In : NIPS 2017. vol. 30

[38] Venkatasubramanian, V., et al. : A review of process fault detection and diagnosis. part i : Quantitative model-based methods 27(3), 293–311. part ii : Qualitative models and search strategies 27(3), 313–32. part iii : Process history based methods 27(3), 327–346. Computers Chemical Engineering (2003)

[39] Wang, F., et al. : Bilevel feature extraction-based text mining for fault diagnosis of railway systems. IEEE TITS 18(1), 49–58 (2016)

[40] Wang, H., et al. : Select-additive learning : Improving cross-individual generalization in multimodal sentiment analysis (2016)

[41] Wang, S., et al. : Panoramic crack detection for steel beam based on structured random forests. IEEE Access 6, 16432–16444 (2018)

[42] Wen, L., et al. : A new snapshot ensemble convolutional neural network for fault diagnosis. IEEE Access 7, 32037–32047 (2019)

[43] Wu, B., et al. : Simultaneous-fault diagnosis considering time series with a deep learning transformer architecture for air handling units. Energy and Buildings 257, 111608 (2021)

[44] Xia, M., et al. : Fault diagnosis for rotating machinery using multiple sensors and convolutional neural networks. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics PP, 1–1 (2017)

[45] Xie, Y., Zhang, T. : Imbalanced learning for fault diagnosis problem of rotating machinery based on generative adversarial networks. pp. 6017–6022 (2018)

[46] Yam, R., et al. : Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance. IJAMT 17, 383–391 (2001)

[47] Yang, B.S., et al. : Random forests classifier for machine fault diagnosis. JMST 22, 1716–1725 (2008)

[48] Yang, Z., et al. : A multi-branch deep neural network model for failure prognostics based on multimodal data. Journal of Manufacturing Systems 59 (2021)

[49] Yang, Z., et al. : Stacked attention networks for image question answering. IEEE CVPR 2016(1), 21–29

[50] Yu, K., et al. : A bearing fault and severity diagnostic technique using adaptive deep belief networks and dempster–shafer theory. Structural Health Monitoring (2019)

[51] Yu, W., et al. : Learning modality-specific representations with self-supervised multi-task learning for multimodal sentiment analysis. arXiv (2021)

[52] Zadeh, A., et al. : Multimodal language analysis in the wild : Cmu-mosei dataset and interpretable dynamic fusion graph. ACL 2018 1 (2018)

[53] Zadeh, A., et al. : Tensor Fusion Network for Multimodal Sentiment Analysis pp. 1103–1114 (2018)

[54] Zarei, J., et al. : Vibration analysis for bearing fault detection and classification using an intelligent filter. Mechatronics 24 (2014)

[55] Zhang, S., et al. : Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics—a comprehensive review. IEEE Access 8, 29857–29881 (2020)

[56] Zhang, Z., et al. : Fault diagnosis and prognosis using wavelet packet decomposition, fourier transform and artificial neural network. Journal of Intelligent Manufacturing 24 (2013)

[57] Zhou, F., et al. : A multimodal feature fusion-based deep learning method for online fault diagnosis of rotating machinery. Sensors 18, 3521 (2018)

Coordination de trajectoires 4D par optimisation distribuée dans la gestion du trafic aérien sans pilote

Gauthier Picard
ONERA/DTIS, Université de Toulouse, France

gauthier.picard@onera.fr

Résumé

Nous proposons une stratégie de déconfliction dans la gestion du trafic aérien sans pilote (UTM), où les drones sont dotés de capacités de décision pour mettre à jour leurs trajectoires 4D face à des événements imprévisibles ou lorsque des trajectoires prioritaires sont ajoutées dans l'espace aérien. Les drones sont conscients des conflits potentiels proches fournis par la couche de communication UTM, et peuvent se coordonner pour réparer les trajectoires et résoudre les conflits de manière décentralisée. Cela réduit l'accès à un goulot d'étranglement décisionnel central et permet une déconfliction réactive. Nous proposons des comportements coordonnés basés sur les DCOP, évalués sur des scénarios denses dans une zone limitée avec de nombreux contrats 4D, des incidents potentiels et des procédures d'urgence.

Mots-clés

Gestion du trafic aérien sans pilote ; Coordination ; DCOP ; Contrats 4D

1 Introduction

En 2018, le bureau NextGen de l'administration fédérale américaine de l'aviation (FAA) a publié un premier concept d'opérations (ConOps) global pour la gestion du trafic des systèmes d'aéronefs sans pilote [1] (UTM) qui présente une vision et décrit les exigences opérationnelles et techniques associées pour développer une architecture support et fonctionner dans un écosystème UTM [7]. Il s'agit d'un système communautaire de gestion du trafic dans lequel les opérateurs et les entités fournissant des services de soutien aux opérations sont responsables de la coordination, de l'exécution et de la gestion des opérations, avec des règles de conduite établies par la FAA. Cet ensemble fédéré de services permet une gestion coopérative des opérations entre les exploitants de systèmes d'aéronefs sans pilote (UAS), facilitée par des fournisseurs de services tiers (USSP) grâce à des échanges d'informations en réseau. L'UTM est conçu pour répondre à la demande et aux attentes d'un large éventail d'opérations dont la complexité et le risque ne cessent de croître, grâce à un marché ouvert innovant et concurrentiel de fournisseurs de services. Les services fournis par les USSP sont interopérables pour permettre à l'écosystème UTM de répondre aux besoins de la communauté des opérateurs de drones. Ce document de travail propose également un ensemble de scénarios soulevant de fortes problématiques de coordination, dont la résolution s'avère être de véritables défis scientifiques comme l'illustre [10], et qui permettent également de définir des scénarios pour l'évaluation des solutions candidates.

Cet article est une traduction d'un artice accepté à AAMAS'22 [19].

1. Nous utiliserons dans cet article, de manière interchangeable les termes *drone* et *UAV* pour désigner des aéronefs sans pilotes.

Du côté européen, le modèle opérationnel envisagé, appelé U-Space, identifie également les besoins de coordination entre les acteurs, et de distribution des décisions [21]. Bien qu'elles présentent des différences notables (classification des drones, sectorisation de l'espace aérien, niveau de sécurité, responsabilités des USSP) comme identifié dans [13], ces ConOps convergent sur de nombreux points (orientation service, modularité, confidentialité, acteurs de haut niveau, séparation en niveaux stratégique, tactique et réactif), notamment en ce qui concerne la coordination des USSP et des drones.

Dans cet article, nous proposons un mécanisme de coordination adaptatif permettant aux systèmes d'UAV (autonomes ou opérés) évoluant dans un espace aérien urbain à route libre de gérer les conflits de trajectoire dus aux retards, aux incidents ou à l'apparition de nouvelles trajectoires hautement prioritaires. Bien qu'il existe des stratégies d'adaptation (e.g. report ou élévation de trajectoires) pour éviter les futurs conflits, nous proposons ici de faire en sorte que les drones se coordonnent en utilisant un service de messagerie directe (soit directement de véhicule à véhicule, soit en utilisant une communication à l'échelle de la plateforme) pour résoudre les conflits, et pour choisir les meilleures actions par rapport à des objectifs multiples. Le mécanisme de coordination est basé sur l'optimisation distribuée sous contraintes (DCOP), afin d'assurer que les drones choisissent collectivement des actions de déconfliction, tout en minimisant certains indicateurs opérationnels. Le sujet de notre étude étant l'interaction entre les UAVs et les USSPs, les résultats proposés sont suffisamment génériques pour être applicables aux différents concepts d'opérations UTM et U-Space. Notre approche aborde la réparation de contrats 4D en ligne de manière distribuée. A notre connaissance, il n'existe pas d'approche multi-agents pour ce problème, qui est un sujet nouveau faisant suite aux récents concepts d'opération dans les espaces aériens urbains.

2 Scénario illustratif

Utilisons un scénario illustratif pour mettre en évidence les besoins de coordination et d'adaptation dans des contextes UTM, représentés dans la figure 1. Nous réutilisons principalement le scénario proposé dans [7], centré sur un espace aérien à route libre. Nous considérons une zone urbaine de 2 km sur 2 km où plusieurs opérateurs de drones ont demandé des trajectoires 4D pour effectuer différentes tâches, comme la livraison, la surveillance ou la capture d'images au sol. Ces trajectoires ont été demandées à l'UTM, qui en retour envoie les points de passage 4D (espace 3D et temps) que les drones doivent suivre pour accomplir leurs tâches. L'UTM fournit également des marges de tolérance permettant de s'écarter de la trajectoire initiale, représentées par des tubes de sécurité encapsulant les trajectoires. Les trajectoires (et leurs tubes de sécurité respectifs) fournies par l'UTM sont garanties sans conflit spatio-temporel mais

©AFIA2022

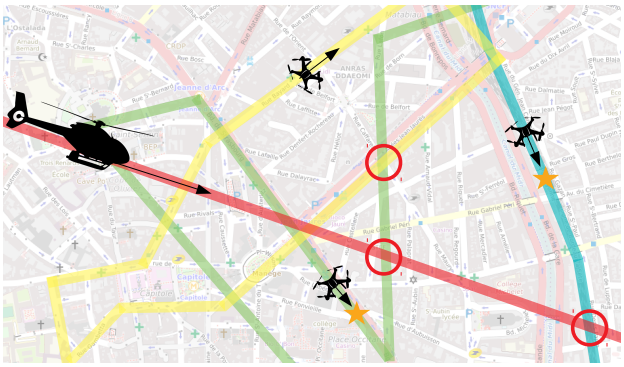


FIGURE 1 – Un scénario type avec trois drones suivant leurs trajectoires (vert, bleu et jaune) gérant quelques incidents (étoiles orange), un hélicoptère médical sur sa trajectoire d'urgence (rouge), et quelques conflits identifiés (cercles rouges)

doivent être demandées quelques heures avant les opérations. Les trajectoires 4D résultantes sont ainsi contractées (et appelées *contrats 4D*), et les drones s'engagent à respecter ces contrats.

Cependant, dans certains cas, les drones peuvent ne pas être en mesure de respecter leur trajectoire. Par exemple, un vent imprévisible peut modifier radicalement les trajectoires, en particulier pour les drones petits et légers [17]. De plus, certaines tâches peuvent exiger qu'un drone reste en position pour exécuter une routine de surveillance (e.g., un drone de surveillance détectant un danger dans sa zone de surveillance doit capturer la scène sous différents angles). Enfin, certaines trajectoires hautement prioritaires peuvent être ajoutées à l'espace aérien pour des raisons d'urgence (e.g., intervention d'un hélicoptère d'évacuation médicale), ce qui peut générer plusieurs conflits avec les trajectoires actuelles. Les contrats 4D ne gèrent pas de telles trajectoires conditionnelles et non déterministes, et doivent donc être mis à jour lorsque de tels événements se produisent.

Dans notre article, nous considérerons des drones ayant des trajectoires de surveillance, et qui peuvent avoir à mettre en œuvre une routine de surveillance d'incident (avec un vol stationnaire), suspendant ainsi leur trajectoire actuelle. L'occurrence de tels incidents n'est pas connue à l'avance, et est supposée totalement aléatoire. Nous considérerons également certains événements d'urgence, dont la destination n'est pas connue à l'avance, qui sont hautement prioritaires et ne peuvent être négociés. Dans la figure 1, trois drones suivent leurs trajectoires (verte, bleue et jaune) et gèrent certains incidents (étoiles orange), qui vont retarder leurs trajectoires planifiées, et donc générer un conflit (cercle rouge au croisement jaune-vert) à une position qui était spatio-temporellement sûre auparavant. Plus conflictuel encore, un hélicoptère médical doit traverser l'espace aérien en urgence, ce qui entraîne deux autres conflits (cercles rouges aux croisements vert-rouge et bleu-rouge).

Nous positionnons notre travail au niveau des UAS où les UAV peuvent échanger directement des informations via la communication directe, ils peuvent recevoir des commandes et des ordres des opérateurs, et obtenir des informations en temps réel (e.g. les trajectoires, les conflits, les procédures d'urgence) de certains USSP. Nous envisageons que les mécanismes de coordination tactique et réactive proposés puissent avoir lieu entre plusieurs UAS (semi-)autonomes ou entre plusieurs opérateurs UAS. Nous nous concentrons notamment sur les petits drones capables d'effectuer un vol stationnaire et opérant à basse altitude (entre 0m et 300m).

3 Concepts et modèle du problème

Nous présentons ici les modèles des trajectoires 4D, des drones et des services UTM nécessaires à la déconfliction.

3.1 Trajectoires 4D

Une trajectoire est un ensemble $W \subset \mathbb{R}^4$ de *points 4D* $w = (x,y,z,t)$ où x et y sont des coordonnées sur le plan 2D (ou des coordonnées GPS), z est l'altitude, et t le temps. Ces points définissent les points de passage que les drones doivent survoler. Nous appelons un *segment* $l = (w_s, w_e)$ une ligne entre deux points consécutifs. Nous ne considérerons que les segments horizontaux et verticaux. Les drones évoluent sur des plans ou se déplacent vers un autre plan en utilisant un segment vertical. Ainsi l'espace aérien est divisé en plusieurs plans séparés par une hauteur constante, notée Z_{sep}. Sur chaque plan, les trajectoires sont libres, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de réseau de vol prédéfini. Une trajectoire est également définie par des marges de sécurité, afin d'éviter que les drones n'entrent en collision, laissant le temps et l'espace aux routines d'évitement réactives de subsumer les ordres de navigation. Classiquement, ces tubes de sécurité sont définis horizontalement (pour les dimensions x et y), verticalement (pour z) et temporellement (pour t). Un tube de sécurité est donc défini par $\tau = (h,v,t)$. Un drone diverge lorsqu'il se trouve en dehors du tube de sécurité de son segment de vol actuel. Un drone viole une trajectoire si sa position est à l'intérieur du tube de sécurité d'un autre drone. Formellement, un point w_0 est à l'intérieur d'un tube de sécurité (h,v,t) pour le segment $l = (w_1,w_2)$ s'il satisfait aux trois conditions (1) et (2) et (3) :

$$\frac{|(x_2-x_1)(y_1-y_0)-(x_1-x_0)(y_2-y_1)|}{d_{xy}(w_1,w_2)} \leq h \qquad (1)$$

$$\min(z_1,z_2)-v \leq z_0 \leq \max(z_1,z_2)+v \qquad (2)$$

$$|t_0-(t_1+\frac{d_{xy}(w_1,p_{xy}(w_0,l))}{d_{xy}(w_1,w_2)}d_t(w_1,w_2))| \leq t \qquad (3)$$

avec d_{xy} la distance euclidienne 2D, d_t la distance temporelle 1D, et $p_{xy}(w,l)$ la projection 2D de w sur l. Deux segments sont en *conflit* s'ils sont sur le même plan (soit horizontalement, soit verticalement) et s'ils se coupent au même moment (à la tolérance t près).

La construction d'un ensemble de trajectoires 4D est un problème opérationnel classique qui fait l'objet d'une littérature abondante. Il a été très bien étudié dans le contexte de la gestion du trafic aérien [5]. La construction de trajectoires sans conflit est un problème d'optimisation difficile, souvent résolu à l'aide de métaheuristiques comme le recuit simulé [11] ou les algorithmes évolutionnaires [22]. En présence de petits drones capables de changer de direction et de vitesse de manière plus flexible que les avions classiques, le problème reste difficile, mais d'autres techniques comme le PSO [1] ou même des techniques multi-agents [24] ont été envisagées. Nous étudions ici un espace aérien à route libre *non structuré*, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de réseau de routes aériennes prédéfinies auquel les trajectoires sont contraintes, contrairement aux concepts opérationnels habituels de l'ATM [16]. Dans notre cas, nous considérerons que les trajectoires initiales sont sans conflit, obtenues à partir de n'importe quel générateur de trajectoires (incrémental dans nos expériences).

Nous nous concentrons sur la procédure de réparation et non sur la génération de l'ensemble initial de trajectoires. Nous cherchons à optimiser certains critères liés à la qualité de la réparation. Nous visons à : (i) *minimiser le nombre de conflits* générés par

l'adaptation de la trajectoire, afin de garantir la sécurité du vol ; (ii) *minimiser le nombre de points de passage manqués*, afin de garantir la qualité des trajectoires, notamment dans un contexte urbain, où les trajectoires sont définies pour remplir certaines missions entre et à ces points de passage ; (iii) *minimiser le retard global* induit par l'adaptation. Un tel problème n'est pas trivial et peut nécessiter un compromis ; par exemple, sauter un segment conflictuel améliore la sécurité mais réduit la qualité de service.

3.2 UAVs

Notre scénario considère un ensemble U de drones, chacun étant noté $u=(p,s,d,T)$, où $p=(x,y,z,t)\in\mathbb{R}^4$ est sa position, $s=(h,v,a)\leq(h_{max},v_{max},a_{max})\in\mathbb{R}^3$ représente ses vitesses horizontale (en m.s^{-1}), verticale (en m.s^{-1}) et angulaire (en rad.s^{-1}) actuelles. La valeur $d\in[0,2\Pi]$ définit sa direction actuelle, et T est sa trajectoire 4D. Notez que ces valeurs de vitesse peuvent être égales à zéro (par exemple, aucun mouvement). Dans des conditions nominales, les drones modifient leur vitesse et leur direction afin d'atteindre leur prochain point de passage à temps, ou de rentrer dans leur tube de sécurité s'ils ont été forcés d'en sortir (par exemple en raison d'un vent fort ou de l'évitement d'un obstacle). En cas d'incident à proximité de sa position, un drone restera à la même position (il garde un point de passage à sa position actuelle) pour observer la situation pendant un certain temps. Ensuite, il retournera à sa trajectoire nominale. Nous modélisons ce comportement de suivi de cible par un modèle de mouvement simple. Lorsque u est à la position p et qu'il vise à atteindre la position o avec un angle $\angle(p,o)\in[-\Pi,\Pi]$, il appliquera les variations suivantes à ses trois degrés de liberté :

$$\Delta h=\min(\frac{d_{xy}(p,o)}{d_t(p,o)},\Delta h_{max}) \quad (4)$$

$$\Delta v=\min(\frac{d_z(p,o)}{d_t(p,o)},\Delta v_{max}) \quad (5)$$

$$\Delta a=\text{sgn}(\angle(p,o))\cdot(\min(\angle(p,o),\Delta a_{max}) \quad (6)$$

conduisant à la variation de position suivante :

$$\Delta p=(h\cdot\cos(d),h\cdot\sin(d),v,a) \quad (7)$$

Le comportement nominal d'un drone représenté sur la figure 2 consiste d'abord à percevoir l'environnement et à vérifier les messages entrants. Ensuite, si aucun conflit, ni obstacle proche n'est détecté, le drone choisit une position cible (soit un point de passage, une localisation d'incident, ou sa position contractée s'il a divergé), puis se déplace en ajustant ses vitesses à l'aide de (4), (5) et (6) pour atteindre une nouvelle position $p+\Delta p$ le rapprochant de sa position cible. Les drones communiquent avec les services de l'UTM (par exemple, géolocalisation, détection de conflits) et avec les drones voisins (directement ou via l'USSP). Ces communications peuvent signaler des conflits. Dans ce cas, le drone déconflictera en mettant éventuellement à jour sa trajectoire. Les drones sont également équipés d'une routine réactive d'évitement des collisions s'ils détectent un mobile trop proche de leur position. Dans ce cas, le drone effectue un comportement de "détection et évitement" que nous ne détaillons pas dans cet article.

3.3 Services UTM

Les opérateurs de drones s'abonnent à des services afin d'obtenir des informations et de fournir des informations sur leurs missions en cours. Des informations en temps réel (sur les positions, les conflits ou les nouvelles trajectoires insérées) sont envoyées par les services aux drones abonnés, tandis que les demandes de mise à jour de trajectoire et les rapports d'incidents sont

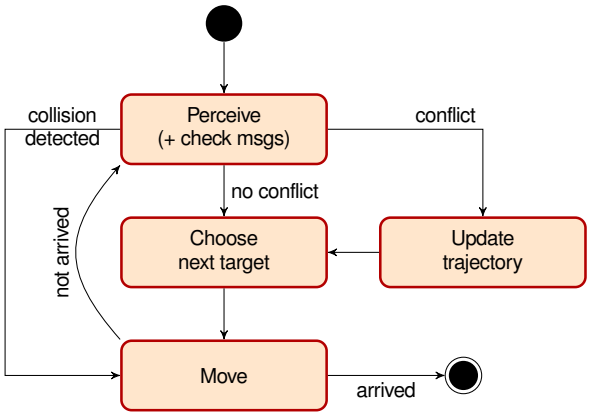


FIGURE 2 – Comportement générique d'un UAV

envoyés par les drones aux USSP. Nous considérons au moins les services suivants :

Un *service de messagerie directe* (DMS), qui permet aux UAV de communiquer entre eux. Les UAV utiliseront ce service pour envoyer des messages de coordination (liés à la méthode de résolution DCOP, voir la section 4).

Un *service de détection de conflit* (CDS), qui envoie aux abonnés les conflits devant se produire dans les prochaines minutes, suite à une mise à jour de trajectoire ou à un ajout de trajectoire. Une information de conflit contient les segments qui se croisent, les drones respectifs et le point d'intersection. On note $C(u)$ l'ensemble des conflits dans lesquels u est impliqué. Afin de rester suffisamment réactif, la détection des conflits est effectuée à un horizon limité : elle ne vérifie que les k prochains segments pour chaque trajectoire, à partir de l'instant courant.

Un *service de mise à jour de trajectoire* (TUS), que les drones sollicitent pour reporter leur trajectoire actuelle ou pour ajouter de nouveaux points de passage (e.g. pour contourner un obstacle en dehors des tubes de sécurité). En retour, le service renvoie la nouvelle trajectoire et les nouveaux conflits (s'il y en a). En effet, si un drone doit reporter sa trajectoire, il peut produire des conflits sur les segments futurs.

Un *service d'évaluation de trajectoire* (TAS) qui est interrogé pour évaluer le remplacement d'une trajectoire par une autre. Ce service renvoie la nouvelle trajectoire et certaines mesures d'évaluation (e.g., le nombre de conflits générés et le retard résultant par rapport à la trajectoire remplacée).

3.4 Actions de déconfliction et comportements

Après le démarrage du système (sans conflit), des événements non prévus (comme des incidents ou des urgences) exigeront éventuellement la rupture des contrats. Puisque les conflits consistent principalement en des intersections sur le même plan, et puisque les drones considérés sont capables d'effectuer un vol stationnaire, trois options principales sont ouvertes pour mettre à jour les contrats : *postpone* (retarder), *elevate* (changer d'altitude) et *skip* (supprimer un point de passage).

Postpone. Son principe est simple : reporter tous les points de passage du contrat après une date donnée pour un temps donné, afin de pouvoir éviter un conflit ou d'avoir suffisamment de temps pour observer un incident. Cette action est automatiquement appelée lorsqu'un drone détecte un incident à proximité de sa position. Il demandera alors au service de mise à jour du contrat un report pour un temps dépendant de l'incident. Tous les points de passage après sa position spatio-temporelle actuelle sont alors retardés. Les drones peuvent également demander un report afin d'éviter un futur conflit potentiel identifié par

©AFIA2022

le service de détection des conflits. Dans ce cas, les drones ajouteront un nouveau point de passage avant l'intersection et retarderont leur route d'une durée égale au temps nécessaire pour sortir d'un tube de sécurité. Nous appellerons postpone, les UAVs effectuant uniquement cette action de déconfliction.

Elevate. Une autre approche de la déconfliction avec des drones capables de voler verticalement consiste à faire en sorte que les drones changent de plan (vers le bas ou vers le haut), afin de contourner le lieu du conflit, puis de revenir à leur plan précédent. Cette action est effectuée pour éviter les obstacles ou pour prévenir un futur conflit potentiel. Lorsqu'il demande une mise à jour de la trajectoire, le drone fournit le conflit ou la position à éviter, et le service de mise à jour de la trajectoire renvoie une trajectoire mise à jour avec un "pont" au-dessus de la position à éviter, c'est-à-dire l'ajout de 4 points de passage pour créer un segment vertical, suivi d'un segment horizontal et enfin d'un autre vertical. Un pont est soit ascendant, soit descendant (en fonction de l'altitude). Nous appellerons elevate, les UAV effectuant uniquement cette action de déconfliction.

Skip. Enfin, on peut simplement sauter un segment conflictuel, en supprimant son point de départ. Ainsi, le drone contournera le conflit en se déplaçant directement vers le point de passage après le segment conflictuel. Lorsqu'il demande à sauter un segment, le drone fournit simplement les conflits au service de mise à jour de la trajectoire qui supprimera le point de passage correspondant et renverra la nouvelle trajectoire. Nous appellerons skip, les UAVs effectuant uniquement cette action de déconfliction.

4 Coordination basée sur les DCOP

Cette section définit une coordination coopérative entre les drones, de sorte qu'ils décident conjointement quels drones déclencheront quelle action de déconfliction pour un conflit donné. Nous modélisons ce problème de décision collective comme un DCOP.

4.1 Le cadre des DCOP

Un problème d'optimisation avec contraintes distribuées (DCOP) est la variante distribuée de l'optimisation avec contraintes [8]. Ici, un groupe d'agents doit choisir des valeurs pour un ensemble de variables de manière décentralisée afin de minimiser une fonction de coût. Formellement, un DCOP est un tuple $\langle \mathcal{A},\mathcal{X},\mathcal{D},\mathcal{C},\mu,f\rangle$, où : $\mathcal{A}=\{a_1,...,a_{|A|}\}$ est un ensemble d'agents ; $\mathcal{X}=\{x_1,...,x_n\}$ sont des variables appartenant aux agents ; $\mathcal{D}=\{\mathcal{D}_{x_1},...,\mathcal{D}_{x_n}\}$ est un ensemble de domaines finis, tels que la variable x_i prend des valeurs dans $\mathcal{D}_{x_i}=\{v_1,...,v_k\}$; L'élément $\mathcal{C}=\{f_1,\dots,f_m\}$ est un ensemble de contraintes souples, où chaque f_i définit un coût dans $\mathbb{R}^+\cup\{+\infty\}$ pour chaque combinaison d'affectations à un sous-ensemble de variables (une contrainte est initialement connue des seuls agents concernés) ; $\mu : \mathcal{X} \to \mathcal{A}$ fait correspondre les variables à leur agent ; $f : \prod \mathcal{D}_{x_i} \to \mathbb{R}$ est une fonction objectif représentant le coût global d'une affectation complète de variables. L'objectif d'optimisation est représenté par la fonction f, qui, en général, est considérée comme la somme des coûts : $f=\sum_i f_i$. Une *solution* à un DCOP P est une affectation complète de toutes les variables. Une solution est *optimale* si elle minimise f.

Les DCOP ont été largement étudiés et appliqués à de nombreux domaines [8], car : (i) ils se concentrent sur des approches décentralisées dans lesquelles les agents coordonnent vers une solution commune par le biais d'échanges de messages locaux ; (ii) ils exploitent la structure du domaine (en l'encodant dans des contraintes) pour résoudre des problèmes de calcul difficiles ; (iii) il existe une grande variété de méthodes de résolution allant des méthodes exactes aux techniques heuristiques et approximatives. Les méthodes de résolution utilisent des envois directs de messages qui, dans le contexte de notre UTM, sont effectués via un DMS.

4.2 Résoudre des conflits avec un DCOP

Modélisons maintenant notre problème de coordination en un DCOP qui doit être instancié chaque fois que certains UAV sont conscients d'un conflit. L'idée est double : (i) permettre aux UAV de choisir entre plusieurs actions de déconfliction lorsqu'un conflit est détecté ; et (ii) faire en sorte que les UAV impliqués dans le même conflit se coordonnent pour choisir celui qui est le plus apte à effectuer la déconfliction.

L'ensemble d'agents $\mathcal{A}\subseteq U$ est l'ensemble des drones qui ont été alertés par le *service de détection des conflits* car impliqués dans certains conflits. Chacun de ces drones u connaît ses conflits $C(u)$ et les autres drones avec lesquels il est en conflit, $U(C(u))=\{v\in U \mid v\neq u, C(u)\cap C(v)\neq\emptyset\}$. Pour un conflit donné c, un drone est capable d'effectuer certaines actions de déconfliction ; par exemple $\mathsf{postpone}(c,20)$, $\mathsf{elevate}(c,-15)$, $\mathsf{elevate}(c,+15)$ et $\mathsf{skip}(c)$. On note $\mathcal{I}$ cet ensemble d'actions.

Les décisions consistent à choisir l'action de déconfliction à déclencher pour chaque conflit connu. Notons $x_{u,c,i}\in\{0,1\}$ la variable de décision indiquant si le drone u décide de résoudre le conflit c en utilisant l'action i. Ainsi, $\mathcal{X}=\{x_{u,c,i} \mid u\in\mathcal{A}, c\in C(u), i\in\mathcal{I}\}$, $\mathcal{D}=\{d_{x_{u,c,i}}=\{0,1\} \mid u\in\mathcal{A}, c\in C(u), i\in\mathcal{I}\}$, et $\mu : x_{u,c,i}\mapsto u$.

Les contraintes se divisent en deux catégories : les coûts unaires (préférences pour les actions) et les coûts de coordination qui interdisent de résoudre le même conflit plus d'une fois. En ce qui concerne les coûts unaires, nous modélisons les préférences pour les actions générant moins de conflits sans diminuer la qualité du service (c-à-d. augmentant le nombre de points de passage manqués) et sans retarder la mission. Les agents doivent être capables d'évaluer les actions en utilisant le *service d'évaluation de la trajectoire* (TAS). Nous notons $v_{\text{conf}}(i,c)$ (resp. $v_{\text{miss}}(i,c)$ et $v_{\text{delay}}(i,c)$) le nombre de conflits (resp. le nombre de points manqués et le retard) de la trajectoire lors de l'exécution de l'action i pour résoudre le conflit c. Nous agrégeons ces multiples évaluations objectives locales par linéarisation et hiérarchisation, comme suit, pour tous les $u\in U$, $c\in C(u)$ et $i\in\mathcal{I}$:

$$f_{\text{pref}}(x_{u,c,i})=\omega^2\cdot v_{\text{conf}}(i,c)+\omega\cdot v_{\text{miss}}(i,c)+v_{\text{delay}}(i,c) \qquad (8)$$

avec $\omega\in\mathbb{R}$ un nombre suffisamment grand pour donner la préférence à la résolution des conflits par rapport aux points de passage manqués et à la réduction des retards. Ces évaluations agrégées modélisent les objectifs multiples discutés dans la section 3. Concernant les contraintes de coordination, nous devons nous assurer que exactement une variable $x_{i,c,u}$ est fixée à 1 pour un même conflit. Ainsi, pour chacun de ces conflits c :

$$\sum_{u\in U}\sum_{i\in\mathcal{I}} x_{i,c,u}=1, \quad \forall c\in C(u) \qquad (9)$$

Afin de s'intégrer dans le cadre de la DCOP, cette contrainte dure est codée en une contrainte souple comme suit :

$$f_{\text{exo}}(x_{u_1,c,i_1},...,x_{u_{|U|},c,i_{|\mathcal{I}|}})=\begin{cases}0, \text{ si } (9)\\ +\infty, \text{ sinon}\end{cases} \qquad (10)$$

Par conséquent, $\mathcal{C}$ est l'ensemble des contraintes de (8) et (10). La fonction objectif est la somme de toutes ces contraintes.

Ce DCOP peut être résolu de manière distribuée par les agents concernés, en utilisant n'importe quelle méthode de résolution de la littérature, chaque fois que les agents doivent se coordonner.

FIGURE 3 – Un exemple de scénario sur une zone urbaine de 2 km x 2 km. 20 UAV sont représentés par des cercles (avec leur vecteur de vitesse). Les contrats 4D (et leurs tubes) sont représentés en vert. Les segments actuels sont représentés en bleu.

Dans le cas où un agent détecte un conflit avec une trajectoire non négociable (par exemple, une urgence), il essaiera toujours de résoudre le même problème mono-agent, en décidant quelle action est la meilleure.

5 Evaluation expérimentale

Nous évaluons maintenant la performance des comportements coordonnés et adaptatifs sur des scénarios denses, où plusieurs drones adaptent leurs trajectoires suite à l'occurrence d'incidents et l'ajout de trajectoires d'urgence.

5.1 Cadre expérimental

Nous analyserons les performances des comportements de déconfliction étudiés avec un nombre croissant d'UAV (et de trajectoires). L'environnement de simulation est codé en Java et exécuté sur un processeur 20-core Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2660 v3 @ 2.60GHz, 62GB RAM, Ubuntu 18.04.5 LTS, avec une JVM OpenJDK 11.0.9.1. Nous avons exécuté 30 instances d'ensembles de trajectoires et d'incidents générés aléatoirement pour chaque taille de flotte, et nous traçons les valeurs moyennes, avec un intervalle de confiance de [0,05 ; 0,95]. Les algorithmes DCOP utilisés ici sont issus de la bibliothèque FRODO [12]. Les valeurs générées aléatoirement sont choisies uniformément dans les intervalles fournis. Le temps de calcul indiqué est le temps de simulation d'un processeur mono-CPU à 20 cœurs.

Nous considérons une zone de 2km par 2km, illustrée dans la figure 3, avec des plans verticaux d'espace aérien à 20m, 40m et 60m. Nous considérons des drones avec les caractéristiques suivantes : $h_{max} = 18m.s^{-1}$, $v_{max} = 6m.s^{-1}$, $a_{max} = \Pi/2\text{rad}.s^{-1}$, $\Delta h_{\text{max}} = \Delta v_{\text{max}} = 6m.s^{-2}$, $\Delta a_{\text{max}} = \Pi/2\text{rad}.s^{-2}$. La vitesse initiale est fixée à $(0,0,0)$. Les trajectoires initiales d'un UAV sont générées de manière aléatoire et incrémentale comme suit. Le point de départ est positionné aléatoirement dans l'espace aérien, à l'altitude $z = 0$ et au temps $t = 0$. Les points suivants sont choisis aléatoirement dans une distance comprise entre 200m et 1000m, de manière à ce qu'il n'y ait pas de conflit avec les segments existants, en augmentant ou diminuant éventuellement l'altitude. Le temps pour le prochain point est également fixé en utilisant une vitesse de croisière par défaut, égale à $(12,3,0)$ (équiv. à 40km/h horizontalement). Les UAVs ont initialement 60 points de passage vers leur destination, puis un dernier segment de retour vers leur origine, ce qui conduit à un ensemble dense de trajectoires et de croisements. Les tubes de sécurité sont définis par $(h,v,t) = (30,15,1)$, ce qui signifie que les UAV doivent être séparés d'au moins 30m horizontalement, 15m verticalement, avec 1s de tolérance temporelle. Pour ajouter des événements imprévisibles, nous générons 3 trajectoires d'urgence, consistant à partir d'une position aléatoire à la frontière de la zone, à se déplacer vers un point aléatoire à au moins 1km de distance du point initial, puis un point d'attente pendant 360s (pour simuler une extraction d'urgence), et enfin un retour au point initial. Ces trajectoires d'urgence ne sont pas modifiables. A chaque seconde simulée, il y a également une chance sur 1000 qu'un incident se produise à proximité d'un UAV choisi aléatoirement, devant ainsi capturer la scène pendant une durée aléatoire comprise entre 30s et 120s.

Nous évaluons les comportements suivants : (i) postpone caractérise les drones qui n'effectuent qu'une action postpone$(c,20)$ lorsqu'un conflit est identifié (abonnement aux services CDS et TUS) ; (ii) elevate caractérise les drones qui n'effectuent que des actions elevate$(c,\pm 15)$, selon leur plan actuel, lorsqu'un conflit est identifié (abonnement aux services CDS et TUS) ; (iii) skip représente les drones qui n'exécutent l'action skip(c) que lorsqu'un conflit est détecté (abonnement aux services CDS et TUS) ; (iv) afb [9], dpop [18], dsa (variante C) [23], mgm2 [14] représentent des drones qui prennent une décision coordonnée et adaptative à l'aide d'un algorithme DCOP [2], qui optent entre postpone(c,d) avec $d \in \{20,40,60\}$, elevate$(c,\pm 15)$ et skip(c) (abonnement aux services DMS, CDS, TAS et TUS) ; et enfin, (v) centralized est un algorithme de déconfliction basé sur une recherche arborescente qui calcule la séquence optimale d'actions de réparation (du même ensemble que les DCOP) pour réparer complètement un ensemble de trajectoires conflictuelles, en optimisant l'objectif dérivé de l'équation (8). Tous les drones sont équipés d'une routine et d'un équipement de prévention des collisions. Le service CDS est configuré avec un horizon $k = 10$, ce qui dans notre cas représente environ 10min dans le futur.

La figure 4 présente les performances obtenues par simulation, avec un nombre croissant de drones ; et la figure 5 montre l'évolution de certaines métriques, avec le temps, pour une instance spécifique avec 25 drones, 3 procédures d'urgence et 25 incidents.

5.2 Conflits et contrats

La première ligne de la figure 4 (4a-4d) porte sur les conflits et les trajectoires. Alors qu'en gestion du trafic aérien classique, avec un espace structuré, le report au départ est utilisé pour réduire les conflits [2], dans notre scénario à route libre, postpone génère de nombreux conflits en raison des retards accumulés sur les croisements de trajectoires, qui ne sont pas structurées comme des réseaux de flux, comme le montre la figure 4a. Tous les autres comportements génèrent encore des conflits (environ 200 sur les grandes instances), puisque près de 70 trajectoires sont ajoutées sur les grandes instances.

Face aux conflits, les UAV mettent à jour leurs contrats, qui ne sont plus garantis sans conflit. Ainsi, les drones ont tendance à demander de nombreuses mises à jour de contrats, comme l'illustre la figure 4b. C'est particulièrement vrai pour postpone et elevate, qui retardent les trajectoires d'une certaine durée,

2. Nous n'incluons pas l'algorithme MaxSum [6], car il ne peut pas converger dans la plupart de nos instances, fournissant ainsi des résultats de faible qualité tout en nécessitant de nombreux messages.

©AFIA2022

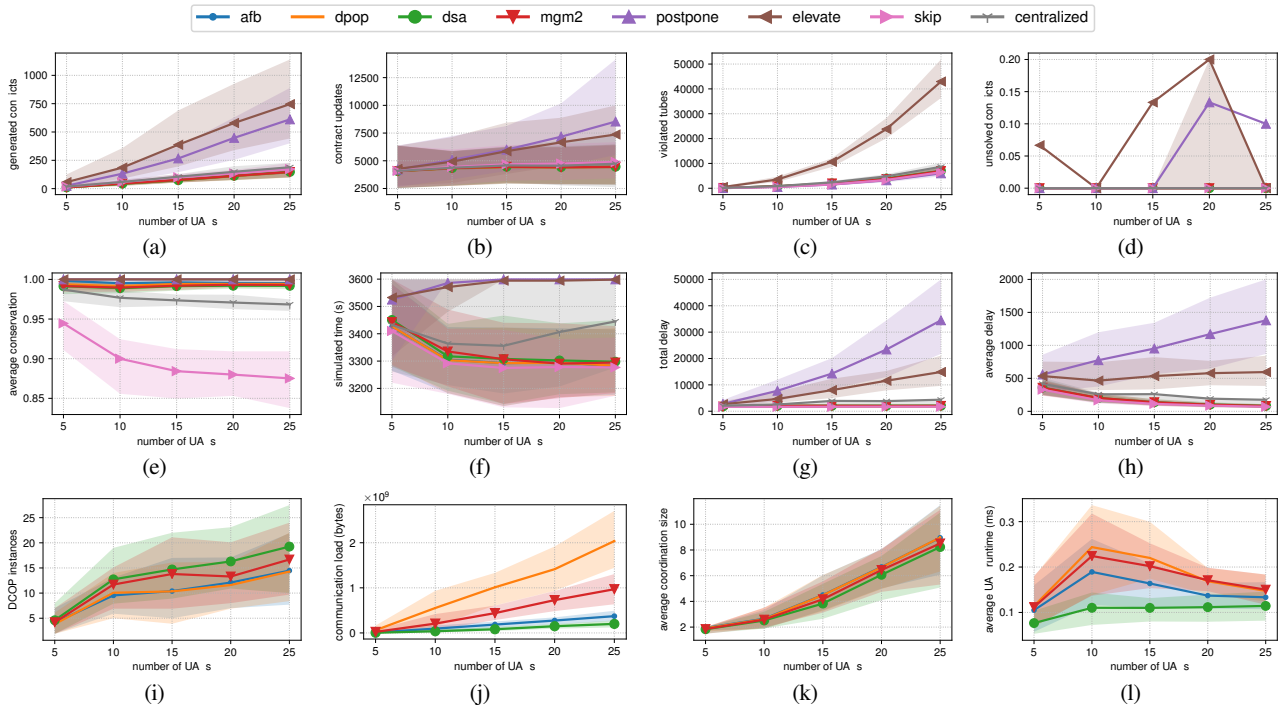


FIGURE 4 – Valeurs moyennes pour plusieurs mesures de performance avec un nombre croissant de drones

ce qui, la plupart du temps, n'est pas suffisant pour résoudre les conflits, ou qui génère d'autres conflits. Dans les grandes instances, une mise à jour de la trajectoire est demandée toutes les secondes, en moyenne. Cette dynamique de mise à jour des trajectoires fait que certains drones violent les tubes de sécurité (figure 4c), et déclenchent les routines anti-collision (figure 4d). En effet, lorsqu'un UAV demande la mise à jour d'un contrat avec un nouveau segment très proche de sa position actuelle (dans l'espace et le temps) et de la position d'un autre UAV, cela peut conduire à de telles situations, avant qu'un des deux UAV ne soit en mesure de mettre à jour à nouveau son contrat. Notamment, elevate fait que les UAVs violent 4 fois plus de tubes de sécurité que les autres comportements. Ces nombres de mises à jour et de violations sont élevés car nous choisissons ici de générer des trajectoires très denses, ce qui représente une sorte de pire scénario, où même les marges de sécurité ne sont pas suffisantes pour éviter les collisions.

En observant notre instance (figure 5), nous pouvons voir à quel point cette configuration est dynamique, ne laissant aucun répit aux drones pour réparer les trajectoires et remplir leurs missions, qui durent environ 1h. Il n'y a qu'une fenêtre "calme" entre $t = 291$ et $t = 744$. Nous pouvons observer comment l'ajout d'incidents déclenche immédiatement des actions de report (que tous les agents mettent en œuvre pour gérer les incidents). En particulier, postpone et elevate génèrent de nombreux conflits juste après l'ajout d'une première trajectoire d'urgence, comme le montre la figure 5a. Face à ces conflits, les drones tentent constamment de réparer les trajectoires, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'incidents et d'urgence dans l'espace aérien, comme l'illustre la figure 5b, après $t = 2290$. Même lorsque les contrats sont stables, les drones peuvent parfois violer certains tubes de sécurité, comme le montre la figure 5c, car ils ont été calculés à l'aide d'une projection temporelle peu précise.

5.3 Conservations des contrats et délais

La deuxième ligne de la figure 4 présente les métriques liées aux deuxième et troisième critères d'optimisation que nous examinons, à savoir la conservation des trajectoires et les retards. Dans la figure 4e, qui indique le pourcentage moyen de points de passage initiaux conservés dans les trajectoires finales, skip est le comportement le moins conservateur (jusqu'à $12{,}5\%$ de points sont abandonnés), car il contourne automatiquement les points de passage en cas de conflit, ce qui permet également de réduire le temps nécessaire pour terminer toutes les trajectoires (indiqué dans la figure 4f). Les deux comportements elevate et postpone ajoutent du retard pour résoudre les conflits (soit en changeant d'altitude, donc en passant du temps en altitude, soit en reportant les prochains points de passage), comme le montrent les figures 4g et 4h montrant le retard total accumulé et le retard moyen par UAV. Notons que chaque comportement ajoute du retard : cela est dû au fait que les drones traitent de nombreux incidents (jusqu'à 35 dans les plus grandes instances) les obligeant à rester en position pendant un certain temps, accumulant ainsi du retard. Le solveur centralisé perd en performance sur les grandes instances car il cherche d'abord à minimiser les conflits et les points de passage manqués, et reporte donc plus fréquemment que les solveurs basés sur DCOP. Les approches basées sur le DCOP co-optimisent localement les conflits, la conservation de la trajectoire et les retards, ce qui en fait un compromis efficace. En examinant notre instance isolée, nous pouvons observer comment skip saute constamment des points de passage pour répondre aux conflits, comme le montrent les figures 5d et 5e. skip supprime 3 fois plus de points que les comportements basés sur les DCOP. Les adaptations aux incidents ajoutent continuellement des retards aux trajectoires, en raison de l'action de report déclenchée dans de tels cas.

5.4 Mise en œuvre des DCOP

La troisième ligne de la figure 4 présente les métriques de fonctionnement des DCOP. Alors que les trajectoires générées sont denses dans une zone limitée, les procédures DCOP entre plusieurs drones sont assez peu fréquemment déclenchées, comme le montre la figure 4i. Cela s'explique par le fait que les décisions coordonnées basées sur la DCOP parviennent à

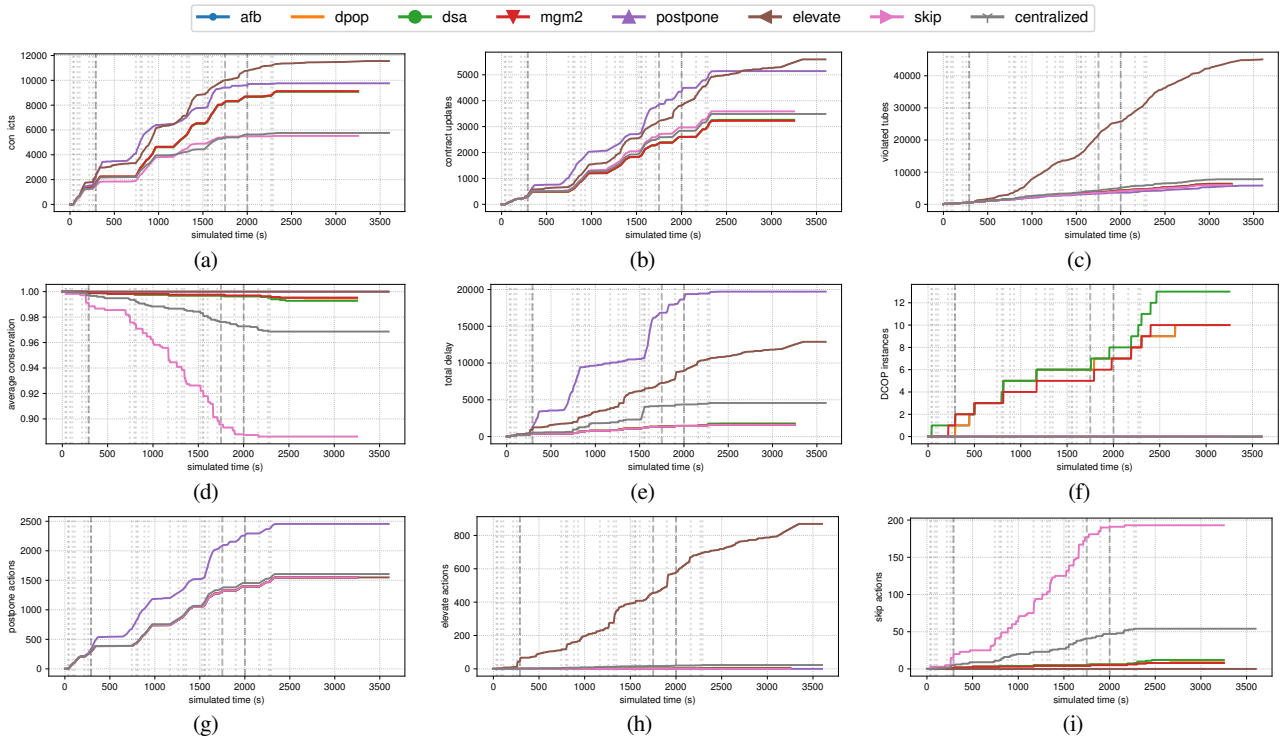


FIGURE 5 – Évolution des mesures de performance au cours d'une simulation avec 25 drones, 3 procédures d'urgence (lignes pointillées grises) et 25 incidents (lignes pointillées grises)

résoudre les conflits pour l'horizon donné, puis ne nécessitent pas d'autre coordination pendant un certain temps, sauf si d'autres perturbations se produisent. Il est intéressant de noter que les solveurs incomplets (dsa, mgm2) nécessitent plus de coordination que les solveurs complets (afb et dpop). En effet, comme les décisions prises par ces solveurs incomplets ne sont pas optimales, elles peuvent donner lieu à des décisions conflictuelles nécessitant une coordination supplémentaire de déconfliction. Pendant la coordination, les conflits concernent en moyenne un tiers de la flotte totale, comme le montre la figure 4k. La coordination peut théoriquement regrouper de nombreux agents, mais dans notre cadre, la taille restreinte des DCOP permet d'utiliser des méthodes de solution complètes comme afb et dpop, ce qui n'a pas d'impact important sur le temps d'exécution de la décision individuelle du drone, comme le montre la figure 4l. Si l'on considère la charge de communication dans la figure 4j, dpop nécessite l'échange de messages peu nombreux mais de grande taille puisque les DCOP à résoudre sont cycliques et nécessitent donc l'échange de messages de taille exponentielle. mgm2, en raison de ses paramètres de coordination à 2, échange de nombreux petits messages.

Les comportements basés sur les DCOP sont déclenchés lorsqu'ils font face à certaines des perturbations, comme le montre la figure 5f, et appliquent les actions avec les meilleures évaluations, à savoir *elevate* (pour conserver les points de passage) et *skip* (pour limiter les retards), comme le montrent les figures 5h et 5i. L'action *postpone* n'est pas utilisée dans ces conditions, comme on peut l'observer dans la période "calme" de la figure 5g. Cela explique comment les DCOP obtiennent de bons résultats en tant que compromis entre la conservation du contrat et les retards. afb est le meilleur concurrent, avec une bonne déconfliction nécessitant une faible charge de communication. Cependant, afb n'est pas robuste à la perte de messages, contrairement à dsa. D'autres expérimentations devraient être menées pour évaluer l'impact du manque de fiabilité des communications sur les performances du DCOP.

5.5 Résumé

Ces résultats soulignent que dans la configuration étudiée extrêmement dynamique, les drones doivent constamment mettre à jour leurs trajectoires. Il est clair que le comportement postpone est mauvais sur deux dimensions : les délais et les conflits (donc la sécurité). Le comportement elevate est un bon candidat pour la conservation de la trajectoire, mais avec des retards supplémentaires et de nombreuses violations de tubes, tandis que skip génère peu de conflits, au prix de quelques points de passage manqués. Le comportement basé sur un DCOP se positionne comme un bon compromis entre elevate et skip, répondant ainsi à notre objectif de minimiser les conflits générés, de maximiser la conservation de la trajectoire et de minimiser les retards – de la même qualité qu'une déconfliction centralisée. Dans d'autres contextes, avec de nombreux carrefours sur des espaces aériens structurés, ces résultats pourraient ne pas être valables. En effet, une grande partie des performances dépend du fait que les UAV peuvent librement changer d'altitude ou contourner certains points de passage. Dans un espace aérien plus structuré, les UAV changent normalement d'altitude dans certains couloirs verticaux limités, et ne peuvent pas voler en dehors des couloirs horizontaux, comme défini dans [4], par exemple. Dans de tels cas, postpone se comporterait probablement mieux, tandis que les DCOP formeraient de plus grands groupes de trajectoires conflictuelles, passant par un nombre limité de carrefours. Nous gardons cette investigation et cette analyse pour des travaux futurs.

6 Conclusion

Dans cet article, nous avons promu et mis en œuvre un mécanisme de coordination multi-agents pour aider les drones évoluant dans un espace aérien dynamique à route libre à adapter leurs

©AFIA2022

trajectoires. La coordination est construite sur un protocole distribué de résolution de contraintes, qui vise à minimiser les conflits futurs, à maximiser la conservation des trajectoires initiales, et à réduire le délai global impliqué par les actions de déconfliction. Sur le scénario simulé que nous avons développé, formant un espace aérien dense avec des événements aléatoires à gérer, nous montrons que l'utilisation d'une déconfliction coordonnée et adaptative, fournit des solutions avec moins de conflits, de points de passage manqués et de retard accumulé, par rapport aux solutions non coordonnées et fixes. Cependant, cette coordination nécessite l'échange de messages de communication supplémentaires. Dans l'ensemble, l'approche basée sur le DCOP est un candidat prometteur pour l'installation de la déconfliction autonome dans l'UTM, et ouvre la voie à de futures recherches.

Puisque les visions de l'UTM et de l'U-Space évoluent, notamment vers des espaces aériens plus structurés [3, 4], nous envisageons d'étendre notre cadre et nos services à de tels contextes, qui promettent d'être plus difficiles à résoudre en raison du manque de liberté de trajectoire et de la plus grande taille des groupes de déconfliction. Nous souhaitons en particulier adapter la méthode de résolution DCOP aux situations de déconfliction de trajectoire. En fait, nous avons utilisé ici une simple agrégation linéaire de trois critères, qui génère toujours des trajectoires non conflictuelles. Les DCOPs multi-objectifs pourraient être une approche pertinente pour des développements futurs [15]. En outre, la conception d'algorithmes de coordination moins gourmands en communications semble être une condition nécessaire au déploiement de ces protocoles et services sur des dispositifs réels et des UTM. Cela pourrait se faire soit en limitant la taille des DCOP de déconfliction, soit en s'appuyant sur des méthodes de solution légères et robustes comme A-DSA [20], au détriment de l'optimalité.

Références

[1] D. Alejo, J. A. Cobano, G. Heredia, and A. Ollero. Particle Swarm Optimization for collision-free 4D trajectory planning in Unmanned Aerial Vehicles. In *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 298–307, 2013.

[2] N. Barnier and C. Allignol. Trajectory deconfliction with constraint programming. *The Knowledge Engineering Review*, 27(3) :291–307, 2012.

[3] A. Bauranov and J. Rakas. Designing airspace for urban air mobility : A review of concepts and approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, 125 :100726, 2021.

[4] C. Capitán, H. Pérez-León, J. Capitán, A. Castaño, and A. Ollero. Unmanned Aerial Traffic Management System Architecture for U-Space In-Flight Services. *Applied Sciences*, 11(9), 2021.

[5] D. Delahaye, S. Puechmorel, P. Tsiotras, and E. Feron. Mathematical Models for Aircraft Trajectory Design : A Survey. In *Air Traffic Management and Systems*, pages 205–247, Tokyo, 2014. Springer Japan.

[6] A. Farinelli, A. Rogers, A. Petcu, and N. R. Jennings. Decentralised Coordination of Low-Power Embedded Devices Using the Max-Sum Algorithm. In *AAMAS 2008*, pages 639–646, 2008.

[7] Federal Aviation Agency. UTM concept of operations version 2.0, 2020.

[8] F. Fioretto, E. Pontelli, and W. Yeoh. Distributed Constraint Optimization Problems and Applications : A Survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 61 :623–698, 2018.

[9] A. Gershman, A. Meisels, and R. Zivan. Asynchronous Forward-Bounding for Distributed Constraints Optimization. In *ECAI 2006*, page 103–107, NLD, 2006. IOS.

[10] Y. Hamadi. Optimization for Urban Air Mobility. In I. S. Kotsireas and P. M. Pardalos, editors, *Learning and Intelligent Optimization*, pages 1–8, Cham, 2020. Springer International Publishing.

[11] A. Islami, S. Chaimatanan, and D. Delahaye. *Large-Scale 4D Trajectory Planning*, pages 27–47. Springer Japan, Tokyo, 2017.

[12] T. Léauté, B. Ottens, and R. Szymanek. FRODO 2.0 : An Open-Source Framework for Distributed Constraint Optimization. In *Proceedings of the IJCAI'09 Distributed Constraint Reasoning Workshop (DCR'09)*, pages 160–164, Pasadena, California, USA, July 13 2009. `https://frodo-ai.tech`.

[13] J. Lieb and A. Volkert. Unmanned Aircraft Systems Traffic Management : A comparsion on the FAA UTM and the European CORUS ConOps based on U-space. In *2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–6, 2020.

[14] R. T. Maheswaran, J. P. Pearce, and M. Tambe. Distributed Algorithms for DCOP : A Graphical-Game-Based Approach. In *ISCA PDCS*, pages 432–439, 2004.

[15] T. Matsui, M. Silaghi, K. Hirayama, M. Yokoo, and H. Matsuo. Distributed Search Method with Bounded Cost Vectors on Multiple Objective DCOPs. In I. Rahwan, W. Wobcke, S. Sen, and T. Sugawara, editors, *PRIMA 2012 : Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, pages 137–152. Springer, 2012.

[16] C. Nava–Gaxiola, C. Barrado, and P. Royo. Study of a Full Implementation of Free Route in the European Airspace*. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–6, 2018.

[17] G. Perozzi, D. Efimov, J.-M. Biannic, and L. Planckaert. Trajectory tracking for a quadrotor under wind perturbations : sliding mode control with state-dependent gains. *Journal of the Franklin Institute*, 355(12) :4809–4838, 2018.

[18] A. Petcu and B. Faltings. A scalable method for multiagent constraint optimization. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'05)*, pages 266–271, 2005.

[19] G. Picard. Trajectory Coordination based on Distributed Constraint Optimization Techniques in Unmanned Air Traffic Management. In *AAMAS 2022*, pages 1065–1073, 2022.

[20] P. Rust, G. Picard, and F. Ramparany. Resilient Distributed Constraint Optimization in Physical Multi-Agent Systems. In *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*. IOS Press, 2020.

[21] SESAR. U-Space : Concept of Operations. Technical report, SESAR Joint Undertaking, 2019.

[22] S. Yan and K. Cai. A multi-objective multi-memetic algorithm for network-wide conflict-free 4D flight trajectories planning. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(3) :1161–1173, 2017.

[23] W. Zhang, G. Wang, Z. Xing, and L. Wittenburg. Distributed Stochastic Search and Distributed Breakout : Properties, Comparison and Applications to Constraint Optimization Problems in Sensor Networks. *Artificial Intelligence*, 161(1–2) :55–87, 2005.

[24] W. Zhao, Z. Fang, and Z. Yang. Four-Dimensional Trajectory Generation for UAVs Based on Multi-Agent Q Learning. *Journal of Navigation*, 73(4) :874–891, 2020.

ATLANTIS : Une ontologie pour représenter les *Instructions nautiques*

H. M. Rawsthorne[1], N. Abadie[1], E. Kergosien[2], C. Duchêne[3], E. Saux[4]

[1] LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN-ENSG, F-94165 Saint-Mandé, France
[2] GERiiCO, Université de Lille, F-59000 Villeneuve d'Ascq, France
[3] LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN-ENSG, F-77420 Champs-sur-Marne, France
[4] IRENav, École navale, Lanvéoc-Poulmic, CC 600, F-29240 Brest Cedex 9, France

helen.rawsthorne@ign.fr

Résumé

Les Instructions nautiques sont une série d'ouvrages produits et publiés par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom) qui donnent aux navigateurs les informations nécessaires pour naviguer près des côtes et accéder aux ports. Dans cet article, nous présentons l'ontologie ATLANTIS (coAsTaL mAritime NavigaTion InstructionS) que nous avons développée pour modéliser les connaissances contenues dans ces ouvrages, ainsi qu'un retour d'expérience et des adaptations que nous avons apportées à la Simplified Agile Methodology for Ontology Development (SAMOD), la méthodologie de développement d'ontologies que nous avons employée.

Mots-clés

Environnement maritime côtier, Instructions nautiques, navigation maritime côtière, ontologie.

Abstract

The Instructions nautiques are a series of books produced and published by the French Naval Hydrographic and Oceanographic Service, the Shom. They contain information on navigating in coastal waters and accessing ports. In this article we present the ATLANTIS (coAsTaL mAritime NavigaTion InstructionS) ontology that we have developed to model the knowledge contained in these books. We also give feedback on the Simplified Agile Methodology for Ontology Development (SAMOD), which we used to create our ontology, and present the modifications that we made to it.

Keywords

Coastal maritime environment, Instructions nautiques, coastal maritime navigation, ontology.

1 Introduction

Les *Instructions nautiques* sont une série d'ouvrages produits et publiés par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom). Elles décrivent l'environnement maritime côtier depuis le point de vue d'un navire et donnent les informations nécessaires pour naviguer près de la côte et accéder aux ports. Les *Instructions nautiques* sont utilisées par les navigateurs (civils ou militaires, professionnels ou plaisanciers) en complément des cartes marines papier ou électroniques pour planifier leur itinéraire de navigation. Elles apportent des informations qui, pour des raisons de lisibilité, ne sont pas affichées sur une carte marine, et contribuent donc à la sécurité de la navigation maritime. Aujourd'hui, les connaissances contenues dans les *Instructions nautiques* existent uniquement sous forme de texte en langage naturel. Ceci impose au Shom un processus exigeant d'actualisation et de vérification manuelle du contenu des ouvrages. Pour les utilisateurs, la forme des *Instructions nautiques* implique une lecture attentive pour trouver les informations recherchées. Sous cette forme, les connaissances sont difficilement réutilisables. Les travaux de thèse de [15] ont porté sur la formalisation des connaissances contenues dans les *Instructions nautiques* du Shom via la création d'un langage contrôlé. Le but du langage proposé est de « servir de pivot entre la rédaction du texte par l'opérateur dédié, la production de l'ouvrage imprimé ou en ligne, et l'interaction avec des bases de connaissances et des outils d'aide à la navigation ». Or, la base de connaissances couvrant le contenu des *Instructions nautiques* sur laquelle le langage est censé s'appuyer n'existe pas à ce jour. Nous visons donc à structurer et à géoréférencer le contenu des *Instructions nautiques* et le stocker dans une base de connaissances. À terme, cette base de connaissances pourra servir à alimenter une plateforme permettant aux utilisateurs des *Instructions nautiques* d'interroger le contenu des ouvrages. Ils pourront, au lieu de lire le texte intégral, accéder aux informations souhaitées en réalisant des recherches par facettes et notamment par zone géographique. Une première étape vers la création de cette base de connaissances consiste à se doter d'une ontologie.

Dans cet article nous présentons ATLANTIS, l'ontologie que nous avons développée pour la base de connaissances, ainsi que la méthodologie que nous avons suivie. Nous avons adopté la *Simplified Agile Methodology for Ontology Development* (SAMOD) [12, 13], à laquelle nous avons apporté des modifications afin de l'adapter à notre projet. Les deux contributions de cet article sont (1) ATLANTIS, l'on-

©AFIA2022

tologie du domaine des *Instructions nautiques* et (2) le retour d'expériences et les adaptations de la méthodologie SAMOD. Dans la section 2, nous recensons les travaux connexes à nos recherches. Un premier état de l'art porte sur les ontologies et thésaurus existants sur le domaine maritime. Le second porte sur les méthodologies de développement d'ontologies et le choix que nous avons fait. La section 3 présente SAMOD, la méthodologie de développement d'ontologie sur laquelle nous nous sommes appuyés, et la manière dont nous l'avons mise en œuvre pour créer et tester ATLANTIS. Enfin, dans la section 4 nous présentons nos adaptations concernant SAMOD avant de conclure dans la section 5. Cet article est une version raccourcie de [14], qui présente plus en détail les *Instructions nautiques* et qui contient un état de l'art plus conséquent.

2 État de l'art

2.1 Ontologies et thésaurus maritimes

D'autres travaux ont porté sur la création d'ontologies et de thésaurus du domaine maritime. En particulier, [9] a proposé une ontologie pour l'information spatiale dans le domaine de la navigation maritime. Elle est fondée sur plusieurs sources officielles de connaissances maritimes, notamment les *United States Coast Pilot*. Cette série d'ouvrages, publiée par la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), constitue l'équivalent des *Instructions nautiques* aux États-Unis. Ce travail pourrait constituer une base importante pour notre cas d'application. Cependant, à notre connaissance, cette ontologie n'est pas publiée sur le Web et nous n'en avons pas retrouvé de trace en dehors des publications qui la décrivent.

L'ensemble d'ontologies *Semantic Web for Earth and Environmental Terminology* (SWEET) a été développé par le *Jet Propulsion Laboratory* au *California Institute of Technology* sous contrat avec la NASA. Il porte sur les sciences de la Terre et contient donc des éléments qui nous intéressent, tels que les phénomènes météorologiques et océanographiques. L'Agence européenne pour l'environnement (AEE) a développé le *GEneral Multilingual Environmental Thesaurus* (GEMET), une source commune de terminologie utilisée dans le cadre de l'agenda environnemental. Il contient de nombreux termes désignant des types d'entités spatiales, dont des entités du domaine côtier telles que *anse* et *port*. Le Thésaurus Eau, qui a été créé par les six Agences de l'Eau, l'Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable ainsi que l'Office International de l'Eau, contient certains termes désignant des types d'entités géographiques du domaine de l'eau telles que *voie navigable* et *zone de mouillage*. Le *NERC Vocabulary Server* (NVS) est géré par le *British Oceanographic Data Centre* et le *National Oceanography Centre* (NOC), et est financé par le *Natural Environment Research Council* (NERC) au Royaume-Uni. Il est destiné aux sciences marines et contient notamment des thésaurus portant sur l'océanographie. Les thésaurus suivants nous intéressent particulièrement : l'*Oregon Coastal Atlas Coastal Erosion Thesaurus*, le *MIDA Coastal Erosion Thesaurus* et le *Marisaurus Thesaurus*. Ils contiennent des types d'entités géographiques du domaine maritime telles que *balise* et *épave*. Le NVS héberge également deux thésaurus qui contiennent des termes désignant des types de navires tels que *navire de pêche* et *navire militaire*. Ce sont le *World Meteorological Organisation voluntary observing ship category* et le *SeaVoX Platform Categories*.

En l'absence d'ontologies existantes qui modélisent les consignes de navigation et l'ensemble des entités et phénomènes de l'environnement maritime côtier, nous en avons développé une et l'avons liée, autant que possible, aux thésaurus existants. Ce travail est décrit dans la section 3.

2.2 Méthodologies de développement d'ontologies

Nous cherchons à créer une ontologie de domaine pour représenter les connaissances contenues dans les *Instructions nautiques* et que des utilisateurs seraient susceptibles de rechercher. Nous avons donc besoin d'une méthodologie de création d'ontologie de domaine extensible, liée à d'autres vocabulaires, qui prenne en compte les besoins des utilisateurs, et qui n'impose pas une structure de données trop complexe à peupler de façon automatique à partir du texte des *Instructions nautiques*. Ces deux derniers critères impliquent de tester le peuplement de l'ontologie et l'interrogation des données au cours de sa construction pour s'assurer de sa bonne adéquation.

Nous avons étudié et comparé 10 méthodologies de développement d'ontologies. Toutes commencent avec une phase d'acquisition de connaissances, de rédaction de documents de spécification ou de questions de compétence. L'étape d'intégration de concepts provenant d'autres ontologies ou ressources existantes permet de différencier les méthodologies car elle n'est pas effectuée au même moment : elle est prévue au début du processus de développement d'ontologies dans *Ontology Development 101* [10] tandis qu'elle est réservée à la dernière étape dans SAMOD. NeOn [22], SAMOD et MOMo [16] proposent des consignes pour créer des ontologies modulaires. Certaines méthodologies, notamment OTK [21], NeOn et SAMOD, explicitent une méthode pour évaluer l'ontologie produite lors de l'étape finale. METHONTOLOGY [2] recommande un guide d'évaluation publié dans une autre ressource et HCOME [7] souligne le besoin d'effectuer une évaluation sans proposer de stratégie. *Ontology Development 101*, DOGMA [6], DOGMA-MESS [1] et MOMo n'intègrent aucune évaluation de l'ontologie produite, les rendant moins adaptées à nos besoins. DOGMA-MESS, DILIGENT [23] et HCOME sont orientées vers une application inter-organisationelle ou multi-acteur car elles permettent ou exigent le développement de l'ontologie en parallèle par les différents acteurs impliqués. Cette façon de travailler n'est pas adaptée à notre contexte, c'est pourquoi nous les avons écartées. SAMOD et MOMo proposent un développement modulaire de l'ontologie qui est construite petit à petit, soit en ajoutant, à chaque itération, la modélisation d'une partie supplémentaire du domaine, soit en

modélisant toutes les parties du domaine d'abord, puis en les fusionnant. NeOn se distingue des autres méthodologies présentées car elle fournit de nombreuses approches pour élaborer une ontologie ou un réseau ontologique. Elle demande aux ontologues de réaliser préalablement une analyse approfondie du projet afin de pouvoir choisir la bonne combinaison des processus et activités proposés.
Finalement, la méthodologie que nous avons choisie est SAMOD, essentiellement pour trois raisons. Premièrement, elle permet de créer un premier squelette qui répond à l'essentiel des besoins puis de l'améliorer et de l'étendre de façon itérative. Deuxièmement, l'approche de développement modulaire est adaptée à un grand domaine comme celui des *Instructions nautiques*. Troisièmement, elle intègre des phases de tests. Une des phases, fondée sur la transformation de questions informelles de compétence en requêtes SPARQL, permet de tester aussi bien le modèle que la création des données destinées à le peupler.

3 Mise en œuvre de SAMOD

SAMOD exige l'implication de deux types de personnes : des experts du domaine et des ontologues. Les experts doivent pouvoir décrire d'une manière détaillée le domaine en question. Les ontologues doivent être capables de construire une ontologie en utilisant un langage formel à partir des descriptions informelles fournies par les experts.

3.1 Sources de connaissances

En premier lieu, SAMOD conseille aux ontologues de récolter les informations à propos du domaine choisi avec l'aide des experts. Nous avons utilisé deux sources principales de connaissances sur le domaine de la navigation et de l'environnement maritime côtier : les documents de référence et les interactions avec les experts du domaine.

3.1.1 Les documents de référence du domaine

Du Shom, en plus de la série d'*Instructions nautiques* nous avons utilisé l'ouvrage *Signalisation maritime* [17], l'ouvrage *Symboles, abréviations et termes utilisés sur les cartes marines papier* [19] et un document décrivant la base de données *Balisage maritime* [18]. De l'Organisation hydrographique internationale (OHI), nous avons consulté l'*S-32 IHO Hydrographic Dictionary* [3] ainsi que le catalogue en ligne des objets décrits dans la norme S-57 [5]. Enfin, de l'Association Internationale de Signalisation Maritime (AISM) nous avons utilisé le manuel des aides à la navigation maritime, le *Navguide* [4].

3.1.2 Les connaissances d'experts du domaine

Nous avons identifié deux types d'experts du domaine des *Instructions nautiques* : les rédacteurs de ces ouvrages d'un côté, et les utilisateurs des ouvrages de l'autre, aussi appelés utilisateurs finaux. Ces deux groupes d'experts interagissent d'une manière différente avec les *Instructions nautiques* et ont donc leurs propres besoins les concernant. Les utilisateurs ont des habitudes de consultation efficace des *Instructions nautiques*, en parallèle des cartes marines et d'autres sources d'informations, pour planifier un itinéraire de navigation. Les rédacteurs, eux, maîtrisent toute la chaîne éditoriale des *Instructions nautiques*. Nous avons ainsi organisé une série d'entretiens avec les utilisateurs et deux réunions avec les rédacteurs. Ces interactions sont détaillées dans la section 4.1.

3.2 Production de documentation

SAMOD conseille ensuite de choisir une sous-partie du domaine à modéliser. Le sous-modèle correspondant est appelé un *modelet*. Les ontologues et les experts du domaine travaillent ensemble afin de rédiger un argumentaire à propos de la sous-partie du domaine. Un argumentaire donne une description en langage naturel du problème à traiter par le modelet ainsi qu'un ou plusieurs exemples illustratifs. L'argumentaire doit être rédigé en utilisant le vocabulaire employé dans le domaine. À partir de l'argumentaire, les ontologues et les experts rédigent une liste de questions informelles de compétence. Ces questions, rédigées en langage naturel, représentent les besoins exprimés dans l'argumentaire et auxquels l'ontologie doit permettre de répondre. Pour chaque question, il faut également préciser le type de réponse attendue et fournir quelques exemples. Le dernier document à produire est un glossaire des termes utilisés dans cette sous-partie du domaine.

Nous avons préparé quatre modelets correspondants aux sous-domaines identifiés dans les *Instructions nautiques* : (1) les navires, (2) les consignes de navigation et les règlements, (3) les entités pérennes de l'environnement maritime côtier et les relations spatiales, et (4) les temporalités et les phénomènes météorologiques et océanographiques. Par la suite, nous allons prendre comme exemple le modelet (3).

L'extrait des *Instructions nautiques* de la figure 5 illustre la manière dont les entités pérennes de l'environnement maritime côtier et leurs relations spatiales sont décrites. La figure 1 montre un extrait de l'argumentaire que nous avons rédigé pour ce modelet, à l'aide des documents de référence décrits dans la section 3.1.1 et après avoir analysé et syn-

Nom : Entités pérennes de l'environnement maritime côtier et relations spatiales
Description : Les *Instructions nautiques* contiennent des références à des entités pérennes de l'environnement maritime côtier et à des relations spatiales entre elles. Une entité pérenne de l'environnement maritime côtier peut être une entité géographique ou une aide virtuelle à la navigation. Elles sont citées dans les *Instructions nautiques* dans les descriptions de paysages, dans les consignes de navigation, dans les règlements et dans les descriptions de phénomènes météorologiques et océanographiques. Elles peuvent être utilisées pendant une navigation pour se situer localement [...]
Exemple 1 : « Le **canal de l'Île de Batz** est un chenal profond de 0,4 à 10 m qui sépare l'Île de Batz de la côte et donne accès aux ports d'échouage de **Porz Kernok** (Île de Batz) et de Roscoff. » [20, p. 398]
Exemple 2 : « La **pointe de Bloscon** porte la **chapelle de Sainte-Barbe** (48° 43,53' N — 3° 58,28' W), de couleur blanche. Plus à l'Ouest, on voit le clocher de Roscoff (48° 43,59' N — 3° 59,16' W) et, juste au Sud, les installations portuaires de Roscoff-Bloscon. » [20, p. 399]

FIGURE 1 – Extrait de l'argumentaire du modelet.

©AFIA2022

thétisé l'utilisation et l'importance de ces concepts et de ces propriétés dans les textes des *Instructions nautiques*. Il contient le nom du modelet, une description expliquant la thématique dans le cadre des *Instructions nautiques* et son importance, ainsi que des extraits du texte qui montrent la manière dont la thématique s'y manifeste.
Nos questions informelles de compétence correspondent aux types d'informations recherchées par les utilisateurs des *Instructions nautiques*, d'après les résultats des entretiens mentionnés dans la section 3.1.2. La figure 2 en montre trois exemples pour le modelet « Entités pérennes de l'environnement maritime côtier et relations spatiales ».

Question 1 : Comment est le phare de l'Île de Batz ?
Type de réponse : Une liste des caractéristiques physiques du phare de l'Île de Batz et de ses relations spatiales.
Exemple de réponse : Le phare de l'Île de Batz est de couleur grise, haut de 43 mètres, équipé d'une balise d'émission AIS, entouré d'un groupe de maisons.

Question 2 : Où se situe le clocher de Roscoff ?
Type de réponse : Les coordonnées géographiques du clocher de Roscoff et une liste de ses relations spatiales.
Exemple de réponse : Le clocher de Roscoff est situé à 48° 43,59' N — 3° 59,16' W, à l'ouest de la chapelle de Sainte-Barbe et au nord des installations portuaires de Roscoff-Bloscon.

Question 3 : Quels amers sont visibles sur l'Île de Batz ?
Type de réponse : Une liste des amers sur l'Île de Batz.
Exemple de réponse : L'Île de Batz porte le phare de l'Île de Batz, la chapelle de Notre-Dame de Bon Secours, le clocher de l'Île de Batz, un sémaphore et la tour du sémaphore.

FIGURE 2 – Trois exemples de questions informelles de compétence du modelet.

Nous avons ensuite rédigé le glossaire (cf. figure 3) dans lequel nous expliquons les termes du domaine, comme par exemple « Alignement » et « Marque latérale », grâce aux définitions données dans les documents de référence. Nous donnons également nos propres définitions pour les concepts que nous avons créés dans le cadre du modelet, tels que « Lieu de stationnement ».
À partir de l'argumentaire, des questions informelles de compétence et du glossaire, SAMOD indique que les ontologues commencent ensuite à travailler sans les experts du domaine afin de créer le modelet dans un langage formel.

3.3 Structure et formalisation d'un modelet

Un extrait du graphe du modelet « Entités pérennes de l'environnement maritime côtier et relations spatiales » est présenté dans la figure 4. Ce modelet contient trois classes principales. La première, `gsp:Feature`, est une classe issue de l'ontologie GeoSPARQL. GeoSPARQL est un standard de représentation et d'interrogation d'entités géographiques. Ce standard nous permet de définir la géométrie des entités et d'accéder à leurs descriptions (en WKT ou GML) par des propriétés. Nous avons identifié deux types distincts d'entités pérennes de l'environnement maritime côtier : des entités physiques,

Alignement : « Ligne droite définie par deux ou plusieurs amers clairement indiqués sur une carte, le long de laquelle un navire peut faire route en toute sécurité, pour entrer dans une passe, parer un danger, etc. » [3]. Un alignement est une aide virtuelle à la navigation.
Lieu de stationnement : Un lieu de stationnement est un point ou une zone géographique où un navire peut stationner temporairement ou d'une manière permanente soit en mouillant (jeter l'ancre du navire), soit en amarrant (attacher le navire à un amarrage), soit en échouant (laisser le navire toucher le fond à marée basse). Un lieu de stationnement peut être défini par la position d'un corps-mort, [...]
Marque latérale : « Les marques latérales, dont l'emploi est associé à un « sens conventionnel de balisage », sont généralement utilisées pour des chenaux bien définis. Ces marques indiquent les côtés bâbord et tribord de la route à suivre. [...] Les marques latérales diffèrent suivant qu'elles sont employées dans l'une ou l'autre des régions de balisage A et B. » [17]. Dans la région A, une marque de bâbord est de couleur rouge et une marque de tribord est de couleur verte. Dans la région B, les couleurs sont inversées.

FIGURE 3 – Extrait du glossaire du modelet.

visibles, et des entités virtuelles, telles que des alignements, des dispositifs de séparation du trafic et des secteurs de feux. La classe `gsp:Feature` est donc divisée en deux sous-classes : `nav:EntiteGeographique` et `nav:AideVirtuelleALaNavigation`. Les deux autres classes principales, `nav:DirectionCardinale` et `nav:DirectionLaterale`, sont dédiées à contenir les instances permettant de décrire les caractéristiques d'entités telles que les marques latérales (cf. figure 3) et les directions de phénomènes météorologiques et océanographiques tels qu'un vent ou un courant.

Nous avons décidé de créer un thésaurus SKOS pour les entités géographiques physiques : `nav:TypeDEntiteGeographique`. Ce choix a été fait parce que le formalisme d'un thésaurus SKOS est plus simple que le formalisme descriptif rigoureux des ontologies définies avec OWL, et ne nécessite pas une description formelle de la sémantique [11]. Cela signifie qu'il sera plus facile d'enrichir un thésaurus par de nouveaux concepts SKOS que de créer automatiquement de nouvelles classes lors du peuplement de la base de connaissances. De plus, les éléments décrivant les types d'entités géographiques ne nécessitent pas l'ajout d'axiomes en plus de leurs relations hiérarchiques. Dans ce thésaurus nous avons créé trois sous-thésaurus : `nav:TypeDAmer`, `nav:TypeDeDanger` et `nav:TypeDeLieuDeStationnement`. Ils servent à rassembler les groupes d'entités géographiques physiques que nous pourrions vouloir isoler dans une requête.

Grâce aux entretiens avec des utilisateurs des *Instructions nautiques*, nous avons appris qu'ils cherchent en priorité quatre éléments principaux. Les informations sur les communications à réaliser sont recherchées pour savoir qui contacter, à quel moment et comment (numéro de téléphone ou canal VHF). Les photographies, surtout d'amers, sont fortement recherchées afin d'avoir une meilleure représentation de ce qu'il faut s'attendre à voir à l'horizon et de

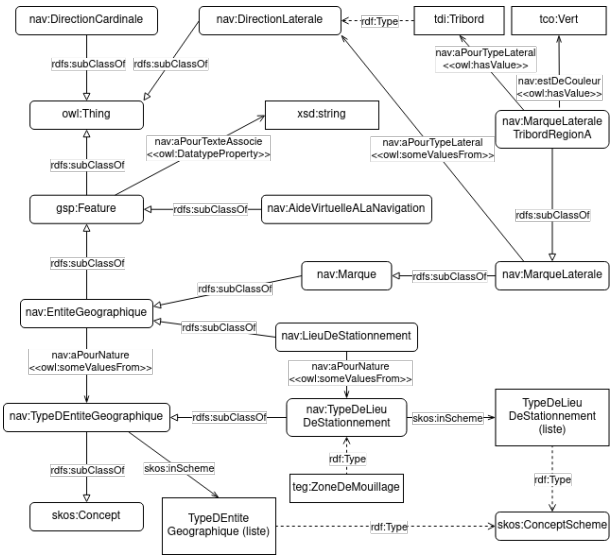


FIGURE 4 – Un extrait du graphe du modelet.

ce à quoi ressemble le paysage côtier en réalité. Les informations sur les ports, surtout sur les approches et les entrées, sont très recherchées ainsi que les informations administratives, celles sur le pilotage ou encore celles plus spécifiques à chaque port. Enfin, également très recherchés sont les amers, les alignements (cf. figure 3) et les feux. En cherchant des informations à propos, par exemple, d'un amer, les utilisateurs cherchent plutôt l'ensemble des caractéristiques le décrivant. Avant de consulter les *Instructions nautiques*, ils ne savent pas a priori quelles informations seront disponibles. Nous répondons à ce besoin spécifique en créant une hiérarchie dans les propriétés d'objets afin de pouvoir récupérer par inférence toutes les caractéristiques d'une instance de la classe `gsp:Feature`. Le propriété d'objets `nav:aPourCaracteristique` a donc plusieurs sous-propriétés telles que `nav:aPourForme` et `nav:estDeCouleur`.

Pendant les réunions avec les rédacteurs des *Instructions nautiques*, nous avons pris conscience qu'il est vital, pour des raisons de sécurité, de conserver les indications d'importances relatives mentionnées dans le texte. La phrase « Vue du Nord, l'Île de Batz montre la tour du sémaphore (48° 44,78' N — 4° 00,69' W) et surtout le phare (48° 44,72' N — 4° 01,61' W), tour grise haute de 43 m, entourée de maisons. » [20, p. 398] illustre ce problème. La hiérarchie indiquée par le mot « surtout » permet d'aider un navigateur dans des conditions de mauvaise visibilité en lui conseillant de privilégier, comme amer, le phare plutôt que la tour du sémaphore. Afin de résoudre ce problème, et d'autres problèmes similaires possibles liés à des nuances subtiles mais importantes dans le texte, nous avons décidé d'associer à chaque instance la phrase initiale qui la mentionne dans le texte. La propriété de données `nav:aPourTexteAssocie` a donc comme domaine `gsp:Feature` et comme range `xsd:string`.

Nous avons également créé des axiomes permettant de classer automatiquement certaines entités selon leurs propriétés et d'inférer de nouvelles connaissances. Nous allons prendre comme exemple la classe `nav:MarqueLateraleTribordRegionA` qui est destinée à stocker les instances de marques latérales tribord (cf. figure 4). Dans les *Instructions nautiques*, les marques peuvent être aussi bien désignées (1) uniquement par leur nature physique (balise, bouée, espar, tourelle) et leur type (cardinal, eaux saines, danger isolé, latéral, spécial) que (2) en utilisant le terme « marque » avec une nature physique et un type. À titre d'exemple, l'extrait « Cette route laisse dans l'Ouest la balise latérale tribord » [20, p. 320] correspond au cas (1) et l'extrait « la tourelle « Grand Pot de Beurre » (48° 37,22' N — 4° 36,47' W), marque latérale bâbord du Grand Chenal » [20, p. 413] correspond au cas (2).

Dans notre ontologie, nous avons donc déclaré la classe `nav:MarqueLateraleTribordRegionA` comme :

```
nav:MarqueLateraleTribordRegionA owl:
    equivalentClass [ owl:intersectionOf ( [
     a owl:Class ;
    owl:unionOf ( nav:Balise
                  nav:Bouee
                  nav:Marque
                  nav:Tourelle ) ]
    [ a owl:Restriction ;
    owl:onProperty nav:aPourTypeLateral ;
    owl:hasValue tdi:Tribord ]
    [ a owl:Restriction ;
    owl:onProperty nav:estDeCouleur ;
    owl:hasValue tco:Vert ] ) ;
    a owl:Class ] .
```

De cette manière, toute entité classée comme une instance de la classe `nav:MarqueLateraleTribordRegionA` sera inférée, par exemple, comme étant de couleur verte (cf. figure 3). Inversement, toute entité classée comme `nav:Bouee`, par exemple, ayant une propriété `nav:aPourTypeLateral` pointant vers l'instance `tdi:Tribord` et une autre propriété `nav:estDeCouleur` pointant vers l'instance `tco:Vert`, sera inférée comme faisant partie de la classe `nav:MarqueLateraleTribordRegionA`.

Puis, nous avons aligné manuellement notre ontologie avec les ressources maritimes cités dans la section 2.1 qui ont été publiés sur le Web, ainsi que des ontologies plus génériques telles que la *Spatial Relations Ontology* de l'*Ordnance Survey* au Royaume-Uni et l'*Extent module* de l'ontologie de haut-niveau PROTON, créée pour la gestion de connaissances et les applications du Web sémantique.

3.4 Tests et résultats

La dernière étape de SAMOD consiste à tester les modelets produits, d'abord avec un test de modèle, puis avec un test de données et finalement avec des tests de requêtes. Le modelet doit être ajusté jusqu'à ce que tous les tests soient concluants.

Un test de modèle implique la vérification de la cohérence

©AFIA2022

globale d'un modèle. Nous avons effectué des tests de modèle sur chaque modelet et sur l'ontologie fusionnée en utilisant le raisonneur HermiT 1.4.3.456 intégré à Protégé.

Un test de données consiste à vérifier la validité du modèle après son peuplement à l'aide de triplets d'instances. Les amers de l'Île de Batz, ainsi que les principaux dangers qui entourent l'île, sont décrits sur la figure 5. Nous avons modélisé en triplets RDF et RDF-star une partie de cet extrait pour instancier l'ontologie (cf. figure 6, où l'entité `ent:4004` correspond au phare de l'Île de Batz). RDF-star est une extension de RDF qui permet de créer des triplets dont le sujet ou l'objet est lui-même un triplet. Le fait qu'il ait été possible de modéliser des textes grâce à notre ontologie assure la validation du test de données.

Un test de requête consiste à transformer une question informelle de compétence en requête SPARQL, l'exécuter et, si le test est probant, obtenir les réponses attendues. Considérons la question 3 présentée sur la figure 2 : « Quels amers sont sur l'Île de Batz ? ». La requête SPARQL ci-dessous identifie l'entité spatiale « Île de Batz » et puis sélectionne les entités spatiales étant des amers ayant une relation spatiale `geof:sfContains` avec l'île :

01 **5.4.2. De Roscoff à l'anse de Kernic**

01 **5.4.2.1. Île de Batz et canal de l'Île de Batz**

07 Vue du Nord, l'**Île de Batz** montre la tour du sémaphore (48° 44,78′ N — 4° 00,69′ W) et surtout le phare (48° 44,72′ N — 4° 01,61′ W), tour grise haute de 43 m, entourée de maisons. L'île est débordée de tous côtés par des dangers. Les plus au large sont :
- à l'Est, la **Basse Astan**, couverte de 0,8 m d'eau, marquée par la bouée « Astan » (48° 44,91′ N — 3° 57,66′ W), cardinale Est lumineuse ;
- au Nord, la **Grande Basse** (48° 45,92′ N — 4° 01,64′ W), couverte de 0,5 m d'eau ;
- à l'Ouest, **Men Aodi** (48° 44,64′ N — 4° 03,39′ W), roche non balisée découvrant de 0,1 m.

13

5.4.2.1.A. — Phare de l'Île de Batz, au SW (2012).

FIGURE 5 – Un extrait des *Instructions nautiques* [20, p. 398].

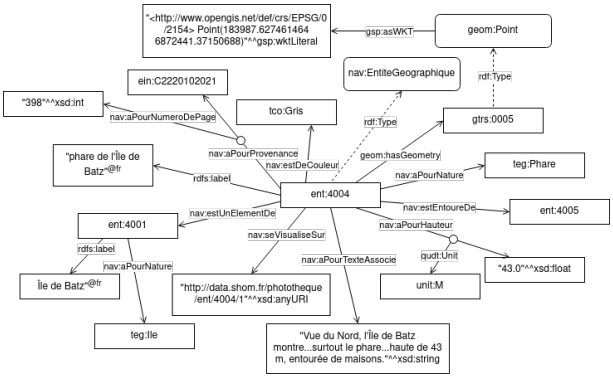


FIGURE 6 – Un graphe de quelques triplets représentant l'entité correspondant au phare de l'Île de Batz.

```
SELECT DISTINCT ?typeDAmer ?labelAmer
WHERE {
    ?entite nav:aPourNature teg:Ile.
    ?entite rdfs:label ?label.
    FILTER (regex(str(?label), "Batz"))
    ?entite geom:hasGeometry ?GeomIdB.
    ?GeomIdB gsp:asWKT ?WKTIdB.
    ?amer nav:aPourNature ?typeDAmer.
    ?typeDAmer a nav:TypeDAmer.
    ?amer geom:hasGeometry ?GeomAmer.
    ?GeomAmer gsp:asWKT ?WKTAmer.
    OPTIONAL {?amer rdfs:label ?labelAmer}.
    FILTER (geof:sfContains(?WKTIdB, ?
        WKTAmer)).}
```

Le tableau 1 présente les résultats de cette requête qui a identifié dans la base de connaissances cinq amers sur l'Île de Batz. Quatre d'entre eux sont cités dans l'extrait des *Instructions nautiques* de la figure 5 ; l'autre est cité sur une autre page. Grâce à l'ontologie puis à cette requête, nous avons pu rassembler ces informations qui étaient dispersées dans le texte. Pour chaque amer, la requête a récupéré son type et, si disponible, son nom. Ceci correspond à un test de requête réussi.

typeDAmer	labelAmer
teg:Phare	"phare de l'Île de Batz"@fr
teg:Chapelle	"chapelle Notre-Dame de Bon Secours"@fr
teg:Clocher	"clocher de l'Île de Batz"@fr
teg:Semaphore	
teg:Tour	"tour du sémaphore"@fr

TABLE 1 – Résultats de la requête SPARQL.

Le processus itératif de documentation, modélisation, évaluation et amélioration des quatre modelets et de l'ontologie fusionnée est retracé sur ce dépôt GitHub. Il contient également un fichier qui contient la liste des prefixes utilisés. L'ontologie est composée de 110 classes, 90 propriétés d'objets, 90 propriétés de données et 2190 axiomes au total.

4 Adaptations de SAMOD

4.1 La relation entre les ontologues et les experts du domaine

SAMOD conseille aux ontologues et aux experts du domaine de recueillir des informations et de rédiger ensemble l'argumentaire, la liste de questions informelles de compétence et le glossaire. N'ayant pas la possibilité de collaborer constamment avec des experts du domaine, nous avons travaillé de manière autonome en les consultant ponctuellement pour compléter nos connaissances et valider nos travaux. Pour ce faire, nous nous sommes d'abord familiarisés avec le contenu des *Instructions nautiques* ainsi qu'avec les documents de référence détaillés dans la section 3.1.1.
Pour guider utilement la modélisation de l'ontologie, la liste des questions informelles de compétences doit refléter les besoins des utilisateurs. Nous avons donc réalisé une série d'entretiens semi-directifs auprès de personnes, ayant des

niveaux d'expertise différents, qui utilisent les *Instructions nautiques* dans le cadre de leur travail ou de leurs études, dans le domaine militaire ou civil. Au total, nous avons réalisé 10 entretiens allant de 30 à 60 minutes, en petits groupes ou individuellement, avec cinq élèves en deuxième année du cycle ingénieur à l'École navale, quatre instructeurs militaires de l'École navale et trois instructeurs civils de l'École nationale supérieure maritime (ENSM). Au début de chaque entretien, nous avons présenté le cadre du projet et le but de ces entretiens, de manière à être compréhensibles pour des personnes non familières avec le Web sémantique. Nous avons précisé l'objectif de notre projet, à savoir : extraire, organiser et stocker numériquement les informations contenues dans les *Instructions nautiques*, de manière à pouvoir les utiliser différemment, en dehors de leur format habituel, en les liant à des informations provenant d'autres sources. Ensuite, nous avons indiqué que les entretiens servaient à analyser les besoins des utilisateurs des *Instructions nautiques* afin de pouvoir orienter notre travail vers des solutions adéquates. Ces entretiens ont été réalisés pendant la phase de préparation de la documentation. Ils nous ont non seulement permis de compléter nos connaissances sur le domaine des *Instructions nautiques* et leur utilisation, mais également de vérifier et de faire valider par des experts la documentation produite.

Pour recueillir l'avis des rédacteurs nous avons réalisé deux entrevues avec les membres de l'équipe de rédaction des *Instructions nautiques*. Pendant ces entrevues, nous avons présenté l'approche globale de notre projet et plus précisément l'ontologie que nous avons développée. Ensuite, nous avons eu l'opportunité de discuter et de poser des questions, pour améliorer les modelets produits.

4.2 Le développement en parallèle des modelets

SAMOD conseille de développer un seul modelet à la fois. Les nombres de classes, d'attributs, de relations et d'individus doivent chacun être limités à 7 ± 2. Ceci correspond à la Loi de Miller, qui indique le nombre d'éléments qu'un humain peut garder dans sa mémoire à court terme. Contrairement à ces recommandations, nous avons travaillé sur le développement de tous les modelets en parallèle. Cela nous a permis d'avoir une vue complète du domaine à tout moment et ainsi de travailler sur la modélisation de chacune de ses parties de manière non pas indépendante mais plutôt complémentaire. Cette façon de travailler nous a conduits à estimer la Loi de Miller trop contraignante, car elle aurait demandé une division trop fine du domaine des *Instructions nautiques*. Pendant la modélisation, il y a eu un va-et-vient constant inter- et intra-modelets. Il a été nécessaire d'avoir des éléments en commun entre certains modelets, comme par exemple la classe `nav:EntiteGeographique`. De cette manière, il a été plus facile de créer des liens entre des éléments de différents modelets lors de leur fusion. Après avoir défini chaque modelet, nous les avons fusionnés afin de créer l'ontologie complète. Nous les avons intégrés au fur et à mesure, en réalisant à chaque fois un test de modèle, un test de données et des tests de requêtes.

4.3 La production des jeux de données

Pour réaliser les tests de données, SAMOD demande aux ontologues de créer pour chaque modelet un jeu de données relatif aux exemples introduits dans la documentation. Il est conseillé de réaliser cette tâche après avoir produit le modelet et après avoir fait le test de modèle. Cependant, nous avons décidé de commencer à construire un jeu de données pour chaque modelet directement après la phase de récolte d'informations et avant de produire la documentation. Pour construire les jeux de données, nous avons structuré quelques extraits de texte des *Instructions nautiques* en construisant à la main des triplets en RDF et RDF-star. Le fait d'identifier les instances et leurs relations dès le début nous a conduits à mieux connaître le domaine et nous a aidés à mieux structurer notre modèle ontologique. Plus précisément, ceci nous a aidés à (1) identifier les sous-domaines à représenter par un modelet, (2) rédiger l'argumentaire et les questions informelles de compétence, (3) identifier les classes et propriétés nécessaires dans chaque modelet et (4) structurer le modèle global d'une manière qui permet de répondre aux usages auxquels on la destine, notamment répondre aux questions des navigateurs qui préparent leur sortie en mer. Nous avons ensuite élargi les jeux de données tout au long du développement des modelets.

5 Conclusions et perspectives

Nous avons produit l'ontologie ATLANTIS qui modélise le contenu des *Instructions nautiques* du Shom. Ce modèle permet de décrire les entités pérennes de l'environnement maritime côtier, les phénomènes météorologiques et océanographiques qui peuvent se produire dans cet environnement, les consignes de navigation côtière, les règlements en vigueur dans le domaine maritime côtier, les relations spatiales, les temporalités et enfin les navires.

Pour créer l'ontologie nous nous sommes fondés sur SAMOD, une méthodologie agile et itérative pour le développement d'ontologies de domaine. Nous lui avons apporté quelques modifications afin de l'adapter à notre contexte. Cela nous a permis de travailler directement à partir de données réelles sur un domaine très large sans devoir le découper trop finement. De plus, nous avons pu travailler de manière autonome et orienter les interactions avec les experts du domaine vers le raffinement du modèle tout en tenant compte des besoins des utilisateurs finaux de la base.

La base produite offre de nouvelles possibilités concernant à la fois l'accès aux connaissances contenues dans les *Instructions nautiques* et leur fiabilité. À terme, elle pourra alimenter une plateforme permettant aux utilisateurs des *Instructions nautiques* de chercher directement les informations précises souhaitées, par catégorie ou par zone géographique, au lieu de lire le texte intégral.

En perspectives à court terme, sur la base du peuplement de l'ontologie avec des triplets RDF et RDF-star extraits manuellement des *Instructions nautiques*, nous prévoyons d'automatiser l'extraction des connaissances géoréférencées du texte, puis de peupler la base de connaissances. Nous comptons nous appuyer sur la méthode d'extraction

©AFIA2022

automatique initiée par [8], fondée sur une combinaison d'une approche lexicale et d'une approche à base de patrons linguistiques. Une fois le modèle ontologique instancié, il sera possible de réaliser une évaluation rigoureuse de l'ontologie produite pour ce cas d'usage.

Remerciements

Ce travail est co-financé par le Shom et l'IGN et réalisé au LASTIG, une unité de recherche de l'Université Gustave Eiffel. Nous remercions les utilisateurs des *Instructions nautiques* qui ont accepté de s'entretenir avec nous ainsi que les rédacteurs des *Instructions nautiques* au Shom.

Références

[1] A. de Moor, P. De Leenheer, and R. Meersman. DOGMA-MESS: A Meaning Evolution Support System for Interorganizational Ontology Engineering. In *Proceedings of the 14th International Conference on Conceptual Structures*, volume 4068 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 189–202, Aalborg, Denmark, 2006. Springer.

[2] M. Ferndández, A. Gómez-Pérez, and N. Juristo. Methontology: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. Technical Report SS-97-06, Laboratorio de Inteligencia Artificial, Facultad de Informáitica, Universidad Politécnica de Madrid, Spain, 1997.

[3] Hydrographic Dictionary Working Group (HDWG). S-32 IHO Hydrographic Dictionary, 2019.

[4] International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA). Navguide. Marine Aids to Navigation Manual, 2018.

[5] International Hydrographic Organization. S-57 IHO Object Catalogue.

[6] M. Jarrar and R. Meersman. Ontology Engineering - The DOGMA Approach. In *Advances in Web Semantics I*, volume 4891 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin and Heidelberg, 2008.

[7] K. Kotis and G. A. Vouros. Human-centered ontology engineering: The HCOME methodology. *Knowledge and Information Systems*, 10:109–131, 2006.

[8] L. Lamotte, N. Abadie, E. Saux, and E. Kergosien. Extraction de connaissances pour la description de l'environnement maritime côtier à partir de textes d'aide à la navigation. In *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information*, volume Extraction et Gestion des Connaissances, RNTI-E-36, pages 341–348, Bruxelles, Belgium, 2020. Éditions RNTI.

[9] R. Malyankar. Maritime Information Markup and Use in Passage Planning. In *Proceedings of the National Conference on Digital Government*, pages 25–32, Marina del Rey, California, USA, 2001.

[10] N. F. Noy and D. L. McGuiness. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. Technical Report Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI- 2001-0880, Stanford University, Stanford, California, USA, 2001.

[11] J.-A. Pastor-Sánchez, F. J. Martínez Mendez, and J. V. Rodríguez-Muñoz. Advantages of thesaurus representation using the Simple Knowledge Organization System (SKOS) compared with proposed alternatives. *Information Research*, 14(4), 2009.

[12] S. Peroni. SAMOD: an agile methodology for the development of ontologies. 2016.

[13] S. Peroni. A Simplified Agile Methodology for Ontology Development. In *OWL: Experiences and Directions – Reasoner Evaluation*, Bologna, Italy, 2016.

[14] H. M. Rawsthorne, N. Abadie, E. Kergosien, and E. Saux. ATLANTIS : Une ontologie pour représenter les Instructions nautiques. In *Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC) PlateForme Intelligence Artificielle (PFIA 2022)*, Saint-Étienne, France, 2022. In the press.

[15] J. Sauvage-Vincent. *Un langage contrôlé pour les instructions nautiques du Service Hydographique et Océanographique de la Marine*. PhD thesis, Université Bretagne Loire, 2017.

[16] C. Shimizu, K. Hammar, and P. Hitzler. Modular Ontology Modeling. *Semantic Web*, pages 1–31, 2022.

[17] Shom. *Signalisation maritime*. Ouvrages généraux. 3e edition, 2016.

[18] Shom. Balisage maritime. Descriptif de contenu du produit externe, 2019.

[19] Shom. *Symboles, abréviations et termes utilisés sur les cartes marines papier*. 7e edition, 2019.

[20] Shom. *Instructions nautiques. C22 : France (côtes Nord et Ouest). Du cap de La Hague à la pointe de Penmarc'h*. 2021. Version à jour au 20 octobre 2021.

[21] Y. Sure. A Tool-Supported Methodology for Ontology-Based Knowledge Management. In H. Stuckenschmidt, E. Stubkjær, and C. Schlieder, editors, *The Ontology and Modelling of Real Estate Trasnsactions*, International Land Management Series, pages 115–126. Routledge, London, 2003.

[22] M. C. Suárez-Figueroa, A. Gómez-Pérez, and M. Fernández-López. The NeOn Methodology for Ontology Engineering. In M. C. Suárez-Figueroa, A. Gómez-Pérez, E. Motta, and A. Gangemi, editors, *Ontology Engineering in a Networked World*, pages 9–34. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.

[23] D. Vrandečić, S. Pinto, C. Tempich, and Y. Sure. The DILIGENT knowledge processes. *Journal of Knowledge Management*, 9(5):85–96, 2005.

Découverte de règles causales dans les graphes de connaissances à l'aide de plongements dans les graphes

L. Simonne[1], N. Pernelle[2], F. Saïs[1], R. Thomopoulos[3]

[1] LISN, CNRS (UMR 9015), Université Paris-Saclay
[2] LIPN, CNRS (UMR 7030), Université Sorbonne Paris Nord
[3] INRAE (UMR IATE)

simonne@lisn.fr

Résumé

La découverte de relations causales est l'objectif de nombreuses expériences. Lorsque des données observationnelles sont disponibles, l'utilisation du cadre d'étude des résultats potentiels est un des standards pour découvrir de telles relations. Dans cet article, nous nous plaçons dans ce cadre afin de découvrir des règles causales au sein de graphes de connaissances (KGs). Ces règles expriment que des différences de traitements conduisent à des différences de valeur pour une caractéristique étudiée. Cependant, ce cadre repose sur la similarité entre instances, et sa quantification dans un KG n'est pas triviale, notamment parce que leurs descriptions peuvent être incomplètes et erronées. Nous proposons une nouvelle méthode de découverte de règles causales qui exploite un appariement basé sur les plongements de graphes de connaissances. Les expérimentations menées sur deux KG de domaines différents ont montré la capacité de notre approche à découvrir des règles qui expliquent plus de différences dans la caractéristique étudiée que les approches existantes, et qui est plus robuste en cas d'information incomplète.

Mots-clés

Règles causales, Plongements de graphes, Explicabilité, Graphes de connaissances

Abstract

Discovering causal relationships between different observations is the goal of many experiments in science. When observational data are available, the potential outcome framework is a well-used framework for discovering such relationships. In this paper, we place ourselves in this framework to discover causal rules in Knowledge Graphs (KGs) that express that differences in treatments lead to differences in a studied characteristic. However, quantifying the similarity between individuals represented in a knowledge graph is challenging, especially because their descriptions can be incomplete and erroneous. We propose a new approach based on knowledge graph embeddings to discover causal rules in KGs. The experiments that we conducted on two KGs, including a scientific knowledge graph, showed that our approach is able to discover rules that explain much more differences in the studied characteristic than existing state of the art approaches.

Keywords

Causal Rules, Graph Embeddings, Explainability, Knowledge Graphs

1 Introduction

L'adoption des technologies du web sémantique pour la représentation des données et des connaissances est en plein essor. Cela a conduit à la disponibilité de nombreux ensembles de données représentés sous forme de graphes de connaissances (KG). Ces KG peuvent contenir des données et des connaissances de différents domaines, et peuvent être exploités pour découvrir de nouvelles connaissances telles que des règles d'associations. Ces associations peuvent être utiles pour prédire de nouveaux faits, détecter des erreurs, mais elles expriment rarement des relations causales.
Une *relation causale* décrit la relation entre deux variables, où une variable nommée *traitement* a un *effet* sur une variable nommée *résultat*. Les relations causales sont intéressantes dans de nombreux domaines, comme par exemple en santé pour déterminer si un médicament traite ou non une maladie. Il existe différents cadres pour étudier le problème de la découverte de relations causales à partir de données d'observation tabulaires, tels que le *modèle causal structurel* [13] ou le *cadre des résultats potentiels* [15]. Dans ce dernier cas, l'effet d'un traitement peut être estimé en comparant des instances similaires qui diffèrent sur le traitement. Bien que de nombreuses approches existent pour découvrir les relations causales dans les données tabulaires, seules quelques approches [10, 17] se concentrent sur la découverte des effets d'un traitement dans les KG. L'approche proposée dans [17] permet de découvrir des règles causales différentielles qui expriment qu'une différence de valeurs sur le traitement explique une différence de valeurs sur le résultat. Cette approche s'appuie sur une étape d'appariement tronqué fondé sur le regroupement de certains chemins de propriétés. Les règles découvertes sont très expressives, car elles représentent explicitement le sous-ensemble de classes d'instances pour lesquelles la règle est valide. Un processus de généralisation des règles est effectué, mais

©AFIA2022

il conduit à très peu de règles générales. Ainsi, seule une faible partie des différences de résultats peut être expliquée. Dans cet article, nous présentons une nouvelle approche hybride appelée Dicare-E combinant les plongements de graphes et les techniques de fouille de règles symboliques pour découvrir des règles différentielles causales. Ce type de règle permet à la fois d'expliquer des différences de valeur sur une propriété étudiée comme la croissance de la taille d'une tumeur, ou le taux de réinsertion des chômeurs, et d'en tirer des conclusions pour effectuer des décisions. Nous adaptons le cadre des résultats potentiels pour pouvoir découvrir de telles règles. Pour apparier des instances, nous exploitons des plongements pré-entraînés et mesurons la similarité de deux vecteurs intégrés en observant la similarité des prédictions utilisant ces vecteurs. Ainsi, la méthode d'appariement est plus robuste aux données erronées et incomplètes. En outre, elle permet d'obtenir des règles plus générales qui peuvent être appliquées à un plus grand nombre d'instances. Nos contributions sont (i) la définition d'une nouvelle méthode d'appariement basée sur les plongements de graphes, (ii) un algorithme s'appuyant sur ces appariements pour découvrir des règles exprimant des effets causaux de traitements et (iii) une évaluation expérimentale sur un jeu de données réel qui montre l'efficacité de l'approche développée en comparaison avec l'état de l'art.

2 Travaux antérieurs

Nous présentons les travaux traitant de la découverte causale dans les données tabulaires et dans les KG, ainsi que les principales méthodes de comparaison d'instances.

Causalité dans les données tabulaires. De nombreuses approches existent pour la découverte de relations causales, comme le modèle causal structurel [13] ou les BN [11].

L'étude de la découverte de relations causales peut être introduite par le biais du problème fondamental de l'inférence causale [15]. Étant donné $Y_i(T)$ le résultat de l'individu i lors de l'étude du traitement T, l'effet du traitement individuel est défini comme $TE_i = Y_i(1) - Y_i(0)$, c.-à-d. la différence entre le résultat de i avec et sans le traitement. TE_i ne peut pas être calculé car, pour un individu donné i, si $Y_i(1)$ est observé, le contrefactuel $Y_i(0)$ ne peut pas être observé. Le standard pour trouver les effets du traitement est de planifier une expérience avec une attribution aléatoire du traitement. De telles expériences sont difficiles à planifier pour des raisons d'éthique et de coût. Par conséquent, la plupart des études causales sont menées en exploitant des données observationnelles, où l'attribution du traitement ne se fait pas de manière aléatoire. Dans ces approches, deux ensembles d'individus sont créés : l'ensemble *traité* des individus ($T = 1$), et l'ensemble *contrôle* des individus non traités ($T = 0$). Comparer naïvement les résultats des deux ensembles introduit un biais de sélection, car la distribution des covariables n'est pas la même dans les deux groupes. Par exemple, en étudiant l'effet de l'âge sur la probabilité qu'une personne ait un cancer, l'ensemble de contrôle pourrait être composé d'une majorité d'hommes, et l'ensemble traité d'une majorité de femmes, ce qui introduirait un biais.

Le cadre d'étude des *résultats potentiels* estime un effet en déterminant un contrefactuel pour les individus traités [15]. Le contrefactuel peut être estimé ou tiré parmi les individus du *contrôle* [18]. Une technique est l'appariement, qui vise à sous-échantillonner l'ensemble de données pour équilibrer la distribution des covariables et supprimer le biais de sélection. Elle consiste à comparer un individu traité à un individu contrôle similaire. Dans l'exemple, cela consiste à comparer des personnes de même sexe, taille et poids (et autres), mais qui diffèrent sur l'âge de traitement. Bien que l'appariement soit populaire, il devient de plus en plus difficile avec la complexité de la description des individus [1]. Des alternatives ont donc été proposées, comme l'appariement tronqué [6] qui consiste à relâcher la contrainte d'appariement exact. En plus de faciliter le processus d'appariement, elle minimise également le biais dans les effets découverts. L'estimation du contrefactuel doit être adaptée aux descriptions RDF des instances d'un KG, pouvant être encore plus complexes que les données tabulaires.

Causalité dans les graphes de connaissances. À notre connaissance, seules trois approches se sont concentrées sur l'exploration des relations causales dans les KG. Dans [10], les auteurs proposent de transformer les données du KG en utilisant des connaissances expertes et en apprenant un modèle relationnel probabiliste. Cependant, les résultats représentent la distribution conjointe entre les variables et n'indiquent pas nécessairement les relations causales. De plus, comme elle repose sur des réseaux bayésiens, l'approche ne peut pas prendre en compte de grands graphes de connaissances et elle a été évaluée sur un petit ensemble de données ($\approx$ 7k triplets). [17] découvre des règles différentielles causales expressives, qui expriment un effet de traitement pour un sous-ensemble d'instances décrites par un motif de graphe nommé strate. De telles règles sont intéressantes car elles peuvent montrer des effets locaux. Cependant, une règle définie sur une strate donnée est sélectionnée si sa validité est vérifiée sur toutes les strates les plus spécifiques. Une telle contrainte stricte empêche de découvrir des règles génériques. Enfin, [5] exploite les plongements de graphes afin de découvrir de nouvelles hypothèses scientifiques à partir d'hypothèses recueillies sur un ensemble de papiers scientifiques. Bien qu'elle ne mentionne pas de causalité, cette approche compare des plongements d'un méthode qui peut s'apparenter au cadre d'étude des résultats potentiels.

Appariement d'instances dans les graphes de connaissances. Des approches de liaison de données visent à découvrir les liens d'identité représentés par le prédicat *owl :sameAs* dans les KG [12]. Cependant, notre objectif est de comparer des entités distinctes et non identiques. Des prédicats moins stricts comme *identiConTo* [14] expriment une relation d'identité entre des entités dans un contexte conceptuel donné (c.-à-d. une sous-partie de l'ontologie), mais ne fournissent pas de similarité quantifiée et ne sont pas adaptés aux données incomplètes. Plus récemment, [16] développe une approche reposant sur de l'appariement strict, applicable sur des graphes ayant des schémas simples mais non applicable lorsque le schéma est com-

plexe. [17] propose un appariement tronqué pour notamment traiter l'incomplétude des données en utilisant des propriétés abstraites qui sont dérivées de clusters de propriétés obtenus grâce à leur co-occurrence. Le processus de clustering doit cependant être guidé par un expert du domaine lorsque le nombre de propriétés est élevé.
La recherche par similarité a également été étudiée pour la relaxation de requêtes [3]. L'utilisation de telles approches repose sur la définition d'un espace de recherche de requêtes, ce qui n'est pas trivial. La similarité entre instances peut également être quantifiée en étudiant les clauses de Horn basée sur des prédicats et des arguments (non)-partagés par les instances [2]. Reposant sur des descriptions de logique de premier ordre complètes, cette approche n'est pas conçue pour des données incomplètes.
Enfin, les modèles de plongements présentent des caractéristiques intéressantes pour notre approche. Ces modèles capturent la sémantique des entités tels que (i) des instances RDF similaires ont des vecteurs similaires dans l'espace de plongements [19] et (ii) les vecteurs similaires dans l'espace de plongements représentent des instances RDF similaires [9, 7]. Cependant, utiliser ces approches afin de déterminer si des instances sont similaires et non identiques implique de fixer un seuil de distance entre deux vecteurs pour décider si deux instances sont suffisamment similaires.

Fouille de règles d'association. Les règles d'association sont composées d'un corps $\vec{B}$ et d'une tête $\vec{H}$ et expriment le lien $\vec{B} \Rightarrow \vec{H}$. Les méthodes de fouille de règles d'association, e.g. [4], sont utilisées afin d'obtenir de nouvelles connaissances ou de supprimer des triplets erronés. Bien qu'une association soit représentée dans ces règles, elle n'indique pas nécessairement un lien de causalité. De plus, une règle d'association n'indique pas clairement l'effet d'un traitement, et les algorithmes utilisés pour les déterminer ne prennent pas en compte la similarité des instances, *i.e.* il n'y a pas d'étape de contrôle réalisée. Par exemple, un effet présent dans la tête d'une règle pourrait être du à un traitement non indiqué dans le corps. Ainsi, une telle règle ne peut être utilisée pour expliquer l'effet d'un traitement.

3 Préliminaires et Définitions

Nous cherchons des règles causales exprimées en logique du premier ordre sous la forme $\vec{B} \Rightarrow \vec{H}$ où des différences de valeurs dans $\vec{B}$, représentant le *traitement* expliquent des différences de valeurs dans $\vec{H}$ qui représente le *résultat*.

3.1 Définitions

Graphes de connaissances. Nous considérons un graphe de connaissances KG défini par une paire $(\mathcal{O}, \mathcal{F})$ où $\mathcal{O}$ est une ontologie représentée en OWL composée d'un ensemble de classes et de propriétés. $\mathcal{F}$ est un ensemble de triplets RDF décrivant des instances de classes de $\mathcal{O}$.

Traitement. Dans le cadre des KG, nous considérons des chemins de propriétés $P_t : p_1(X, Y_1) \wedge p_2(Y_1, Y_2) \wedge \ldots \wedge p_n(Y_{n-1}, Y_n)$ de longueur maximale l_{tmax}. Les propriétés se trouvant à l'extrémité de ces chemins peuvent avoir des valeurs catégorielles ou numériques, être mono-valuées ou multi-valuées. Par abus de langage, nous considérons la (les) valeur(s) d'un chemin de propriété comme faisant référence à la (les) valeur(s) de la propriété à l'extrémité du chemin. Les règles s'appliquent à deux instances (X_1, X_2) d'une classe de $\mathcal{O}$, et un traitement T représente une différence de valeurs de P_t entre X_1 et X_2. Nous distinguons un *traitement catégoriel* T_c impliquant un chemin de propriétés dont l'extrémité est une propriété catégorielle (e.g, littéral, date, valeurs hiérarchisées) d'un *traitement numérique* T_n impliquant un chemin de propriétés dont l'extrémité est une propriété numérique (e.g, entier, réel).

Traitement catégoriel. Soient X_1 et X_2 deux instances d'une classe, un chemin de propriétés P_t et deux ensembles de valeurs V_1 et V_2 du chemin P_t pour X_1 et X_2 respectivement. Un traitement catégoriel T_c est défini par :

$$T_c(X_1, X_2) : P_t(X_1, V_1) \wedge P_t(X_2, V_2) \wedge belongs(v_1, V_1) \wedge belongs(v_2, V_2) \wedge \neg belongs(v_1, V_2) \wedge \neg belongs(v_2, V_1)$$

où $belongs(v, V)$ est une fonction qui vérifie que v appartient à l'ensemble des valeurs V.

Traitement numérique. Soient X_1 et X_2 deux instances d'une classe, un chemin de propriétés P_t et deux ensembles de valeurs V_1 et V_2 du chemin P_t pour X_1 et X_2 respectivement. Un traitement numérique T_n est défini par :

$$T_n(X_1, X_2) : P_t(X_1, V_1) \wedge P_t(X_2, V_2) \wedge compare_{Tn}(s(V_1), s(V_2))$$

où $compare_{Tn}$ est une fonction de comparaison de valeurs numériques pouvant être implémentée par $lessThan$ ou $greaterThan$ et s est une fonction d'agrégation qui peut être par exemple max, min, sum, etc.
Par exemple, un traitement T_c peut être que deux athlètes ont des manualités différentes : l'un est droitier et le second est gaucher. Un traitement T_n exprime une différence sur une valeur numérique, par exemple que le budget du club d'un athlète est plus élevé que celui d'un autre athlète.

Résultat. Nous considérons un chemin de propriétés menant à des valeurs numériques $P_o : p_1(X, Z_1) \wedge p_2(Z_1, Z_2) \wedge \ldots \wedge p_m(Z_{m-1}, Z_m)$. Soient X_1 et X_2 deux instances d'une classe, P_o, deux ensembles de valeurs numériques V_1 et V_2 de P_o pour X_1 et X_2 respectivement, et s une fonction d'agrégation. Le résultat O est défini par :

$$O(X_1, X_2) : P_o(X_1, V_1) \wedge P_o(X_2, V_2) \wedge lessThan(s(V_1), s(V_2))$$

Règle Différentielle Causale. Une règle causale différentielle RDC_T représente la relation de causalité entre le traitement T et son résultat. Elle exprime que le traitement, i.e., une différence de valeurs sur un chemin de propriétés P_t, explique un résultat, i.e., une différence de valeurs sur un chemin de propriétés P_o tel que $lessThan(P_o(s(V_1)), P_o(s(V_2)))$.

©AFIA2022

Définition 1. (Règle Différentielle Causale). Étant données X_1 et X_2 deux instances d'une classe cible de l'ontologie, le chemin de propriétés menant au résultat P_o, un traitement $T \in \{T_n(X_1, X_2), T_c(X_1, X_2)\}$ défini par le chemin de propriété P_t, et s une fonction d'agrégation, une règle différentielle causale RDC_T est définie comme suit :

$$RDC_T : T \wedge P_o(X_1, V_1) \wedge P_o(X_2, V_2) \Rightarrow lessThan(s(V_1), s(V_2))$$

Le résultat O est exprimé en partie dans le corps de la règle et dans sa conclusion. Une règle impliquant un traitement numérique (resp. catégoriel) est appelée une *règle différentielle causale numérique (resp. catégorielle)*.

Exemple. Soit un KG décrivant des athlètes. Un résultat à étudier pourrait être le classement des athlètes, i.e., expliquer pourquoi des athlètes ont des performances différentes. Une règle différentielle causale numérique RDC_{age} peut exprimer qu'être plus jeune qu'un autre athlète peut expliquer un meilleur classement, i.e., un rang plus bas : $age(X_1, Y_1) \wedge age(X_2, Y_2) \wedge lessThan(Y_1, Y_2) \wedge rank(X_1, Z_1) \wedge rank(X_2, Z_2) \Rightarrow lessThan(Z_1, Z_2)$. Une règle différentielle causale catégorielle $RDC_{manualite}$ peut indiquer qu'être gaucher plutôt que droitier pourrait être une autre explication d'une meilleure performance.

3.2 Effet d'un Traitement

L'effet d'un traitement d'une règle est quantifié par la mesure $causal_T$ inspirée de [8]. Elle correspond à un odds ratio OR, qui compare les chances qu'un résultat se produise en fonction d'une exposition aux chances qu'il se produise en l'absence de cette exposition. Alors que l'OR considère un ensemble d'instances, $causal_T$ considère un ensemble de paires d'instances similaires vérifiant le traitement.

Compte tenu des définitions des règles différentielles causales, nous définissons d'abord les deux supports utilisés pour calculer $causal_T$. Soit T un traitement tel que $T \in \{T_n(X_1, X_2), T_c(X_1, X_2)\}$, et O un résultat, $supp_{TO}$ représente le nombre de paires d'instances telles que le traitement et le résultat sont tous deux vérifiés :

$$supp_{TO} = \#(X_1, X_2) : \exists\{Y_1, .., Z_m\}\ tq\ T \wedge O(X_1, X_2)$$

$supp_{T\overline{O}}$ représente le nombre de paires d'instances où le traitement et l'inverse du résultat sont vérifiés, *i.e.* avec le chemin de propriété P_o instancié pour les deux instances mais des valeurs numériques qui vérifient le prédicat $greaterThan$ au lieu de $lessThan$. Il est calculé de manière analogue à celui de $supp_{TO}$, sauf que le résultat O est remplacé par $\overline{O}$, avec $\overline{O} \equiv P_o(X_1, V_1) \wedge P_o(X_2, V_2) \wedge greaterThan(s(V_1), s(V_2))$.

Étant donné un ensemble de paires, la mesure de l'effet d'un traitement est défini dans l'équation 1 suivante :

$$causal_T = \frac{supp_{TO}}{supp_{T\overline{O}}} \quad (1)$$

$causal_T$ retourne un score dans $[0, +\infty[$ et mesure la force de la relation entre le traitement et le résultat. S'il est égal à 1, le traitement et le résultat sont considérés comme indépendants, et plus il est différent de 1, plus cette relation est forte. Une valeur supérieure à 1 montre que le traitement et le résultat sont positivement associés.

Nous utilisons cette mesure pour sélectionner les règles pertinentes et ordonner les explications fournies. Un intervalle de confiance CI est construit pour tester si $causal_T$ est significativement supérieur à 1 : $CI_\alpha(causal_T) = exp(ln(causal_T) \pm u_{1-\alpha/2}\sqrt{\frac{1}{supp_{TO}} + \frac{1}{supp_{T\overline{O}}}})$ avec $u_{1-\alpha/2}$ le $(1-\alpha/2)$ quantile de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$.

4 Appariement d'instances fondé sur les plongements de graphes

L'effet d'une règle est calculé en considérant des paires d'instances similaires. Les méthodes classiques d'appariement symbolique pouvant échouer lorsque les descriptions des instances sont hétérogènes, erronées ou incomplètes, nous avons besoin d'une mesure de similarité capable de déterminer des instances similaires, et ce, même lorsque le KG est imparfait. Nous avons défini une nouvelle mesure de similarité exploitant les plongements de graphes.

Dans la Fig. 1, nous présentons le déroulement général de notre approche. Nous considérons un KG et entraînons un modèle de plongements de graphe qui fournit une représentation vectorielle de chaque instance et relation du KG (a). Dans (b), un ensemble de paires est sélectionné aléatoirement, puis la distance de leur vecteurs d et leur similarité sim_e (c.f. équation 2 en section 4.1) sont calculées. Dans (c), un modèle $g(d) = sim_e$ est appris pour définir le seuil de distance d_{tr} étant donné un paramètre sim_{tr}. À (d), un ensemble d'instances appariées, i.e., avec une distance d telle que $d < d_{tr}$, est alors créé. Enfin (e), nous calculons l'effet de traitement sur le résultat analysé.

4.1 Mesures de similarité sur plongements

Distance basée sur des vecteurs de plongements. Étant donné un KG, nous entraînons un modèle de plongements pour obtenir des vecteurs qui représentent les entités et les relations du KG dans un espace de faible dimension.

Une distance d entre deux vecteurs v_{i_1} et v_{i_2} peut être calculée à l'aide de diverses fonctions telles que la distance euclidienne. Cette distance peut être utilisée pour décider que deux instances sont similaires en utilisant un seuil donné d_{tr} (*i.e.* i_1 et i_2 considérés similaires si $d(v_{i_1}, v_{i_2}) < d_{tr}$). Ce seuil d_{tr} est à définir pour (i) sélectionner des paires d'instances suffisamment similaires pour analyser un traitement, et (ii) élaguer les paires trop différentes.

La définition d'un tel seuil d_{tr} est difficile sans connaissance de ce que les distances représentent. Sans seuil défini, l'étape d'appariement pourrait sélectionner, pour une instance i_1, i_2 tel que $\min_{\forall i_x \in I} d(v_{i_1}, v_{i_x})$, mais i_1 et i_2 pourraient être très différents. Par exemple, un KG pourrait décrire des pays comme la France, les États-Unis et l'ensemble des pays d'Asie. Le pays le plus similaire à la France pourrait être les États-Unis, cependant, ces 2 pays restent très différents.

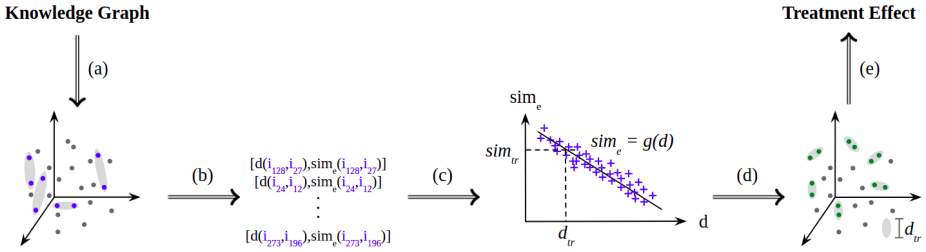


FIGURE 1 – Vision globale de l'approche

Mesures de similarité basées sur des prédictions de plongements. Nous proposons sim_e, une mesure de similarité reposant sur les plongements des instances. sim_e mesure la similarité de deux vecteurs appris en observant les prédictions utilisant ces vecteurs. Nous supposons que deux instances ayant deux descriptions RDF similaires conduiront à des vecteurs similaires dans l'espace de plongement [19], et que ces vecteurs produiront des prédictions similaires de la part du modèle de plongement f. Nous rappelons que f reçoit en entrée un triplet (h, r, t), et retourne un score $f_r(h, t)$ qui sera élevé si le modèle considère le triplet correct, et bas avec un triplet considéré faux. La comparaison des vecteurs permettra à l'approche d'être moins sensible aux données incomplètes ou erronées.

Étant donné un sujet et une propriété p_k, un modèle de plongements f prédit un score pour chaque objet possible de p_k et peut trier les objets par score décroissant. Ainsi, deux instances similaires devraient avoir des prédictions similaires sur les propriétés qu'elles instancient. Pour calculer sim_e, les prédictions sur chaque propriété p_k instanciant les instances sont étudiées. Pour une propriété p_k d'un chemin P de longueur $l_P < l_{max}$, un degré de fonctionnalité $degre(p_k)$ est défini et représente le nombre moyen d'objets distincts qui instancient p_k. l_{max} est un paramètre qui définit la longueur maximale d'étude d'un chemin de propriétés. Avec $n = degre(p_k)$, la similarité entre deux instances sur la propriété p_k est étudiée en analysant les n premiers objets prédits par f pour chaque instance. Par exemple, pour les pays visités par une personne, nous pouvons poser le degré de fonctionnalité $n = 3$. Ainsi, les 3 pays les mieux classés pour chaque personne sont sélectionnés et utilisés. La similarité sim_{p_k} de deux instances i et j sur une propriété p_k de la classe cible est calculée récursivement comme suit :

$$sim_{p_k}(i,j) = \begin{cases} 1,\ si\ p_k(i) = p_k(j) \\ 0,\ si\ p_k(i) \neq p_k(j),\ i \in L,\ j \in L \\ \\ \frac{\sum_{o_i \in p_k(i)} Max_{o_j \in p_k(j)} sim_e(o_i, o_j)}{degre(p_k)} \\ si\ p_k(i) \neq p_k(j),\ i \in I,\ j \in I \end{cases}$$

où L (resp. I) est l'ensemble des littéraux (resp. des IRIs), $p_k(i)$ est l'ensemble des objets liés à i par p_k.

La similarité $sim_e(i, j)$ entre i et j est obtenue en moyennant les similarités obtenues pour chaque propriété p_k de

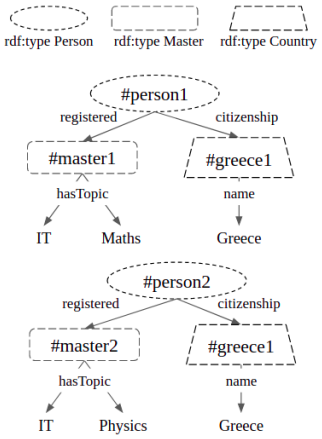


FIGURE 2 – Descriptions prédites de 2 instances

l'ensemble P des propriétés instanciées par i et j :

$$sim_e(i,j) = \frac{\sum_{p_k \in P} sim_{p_k}(i,j)}{\mid P \mid} \quad (2)$$

Un poids relatif w_i représentant l'importance d'une propriété p_i dans le calcul de similarité peut être introduit et défini par des experts du domaine (par exemple, w_i peut être fixé à 0 pour le nom d'une personne). Nous proposons un exemple pour illustrer sim_e basé sur la Fig. 2.

Premièrement, $sim_{registered}(\#person1, \#person2) = \frac{sim_e(\#master1, \#master2)}{1} = \frac{sim_{hasTopic}(\#master1, \#master2)}{2} = \frac{(max(sim_e(IT,IT), sim_e(IT,Physics)) + max(sim_e(Maths,IT), sim_e(Maths,Physics)))}{2} = \frac{1}{2}$.

Ensuite, $sim_{citizenship}(\#person1, \#person2) = 1$ car $\#greece1$ est l'objet de $\#person1$ et $\#person2$. Enfin, $sim_e(\#person1, \#person2) = \frac{1/2}{2} + \frac{1}{2} = \frac{3}{4}$.

4.2 Définition du seuil de similarité d_{tr}

d_{tr} est défini en analysant la distribution entre sim_e et d (parties (b) et (c) de Fig. 1). Un modèle g, tel que $g(d) = sim_e$, est appris. Étant donné sim_{tr} le seuil défini sur la similarité sim_e fixé par l'utilisateur, le seuil d_{tr} est défini tel que $g(d_{tr}) = sim_{tr}$. Des instances peuvent ensuite être appariées en fonction de leur distance et de d_{tr}.

Le calcul de sim_e étant complexe en temps, la distribution entre sim_e et d est étudiée sur un échantillon de paires.

©AFIA2022

5 Algorithme

L'algorithme Dicare-E est composé de 2 parties : (i) la première consiste à déterminer d_{tr}, et (ii) la seconde crée des appariements d'instances similaires en utilisant d_{tr} afin d'évaluer la règle différentielle causale pour un traitement.

5.1 Définition de d_{tr}

Dans la première partie, d_{tr} est déterminé. L'algorithme prend en entrée le KG, la classe cible t_c, les chemins de propriétés liés au résultat et au traitement étudiés P_o et P_t, un modèle de plongement f et le paramètre sim_{tr} pour définir d_{tr}. Le graphe de connaissances KG_{tr}, utilisé pour entraîner f, est obtenu en retirant les derniers prédicats de P_o et P_t de KG. Étant donné $\mathcal{I}_{tc}$ l'ensemble des instances de t_c, un échantillon de paires de t_c, $\{(i_i, i_j) \in \mathcal{I}_{tc} \times \mathcal{I}_{tc}\} \subset \mathcal{I}_{tc} \times \mathcal{I}_{tc}$, est tiré, et les distances entre les vecteurs correspondants $d(v_{i_i}, v_{i_j})$ et les sim_e sont calculées pour chaque paire grâce au modèle appris f. g est appris pour obtenir les paramètres de la distribution entre d et sim_e pour obtenir d_{tr} tel que $g(d_{tr}) = sim_{tr}$.

5.2 Création des paires et découverte de règles RDC_T

La deuxième partie consiste à déterminer des règles causales différentielles. En entrée, l'algorithme considère la classe cible t_c, les chemins P_o et P_t, d_{tr} et α.

L'extraction des règles se fait en deux étapes. La première étape consiste à construire les paires d'instances similaires vérifiant T grâce à d_{tr}. Premièrement, pour chaque paire $(i_i, i_j) \in \mathcal{I}_{tc} \times \mathcal{I}_{tc}$, la distance euclidienne entre leurs vecteurs $d(v_{i_i}, v_{i_j})$ est calculée. Les distances sont stockées dans une matrice de distance $\mathcal{D}$. Ensuite, l'ensemble d'instances appariées $\mathcal{M}$ est créé en sélectionnant à chaque itération la paire présentant la plus petite distance et vérifiant le traitement, $\min_{\forall (i_i,i_j) \in \mathcal{I}_{tc} \times \mathcal{I}_{tc}} \mathcal{D}$ et en l'enlevant de $\mathcal{D}$ ensuite. Ce processus est appliqué jusqu'à ce qu'il ne reste aucune paire (i_i, i_j) dans $\mathcal{D}$ telle que $d(v_{i_i}, v_{i_j}) < d_{tr}$.

La deuxième étape consiste à calculer l'effet du traitement. Pour cela, l'algorithme prend en entrée $\mathcal{M}$, les chemins P_o et P_t, et α, et est initialisé en fixant à 0 les deux supports décrits dans l'équation 1. Ensuite, pour chaque paire, le traitement et le résultat sont obtenus en utilisant P_o et P_t, et les supports sont modifiés en conséquence. Une fois que toutes les paires ont été traitées, l'effet du traitement peut être calculé et son intervalle de confiance construit.

Cet algorithme permet de déterminer l'effet d'un traitement. Afin de déterminer l'effet d'un autre traitement, KG_{tr} doit être mis à jour en enlevant le nouveau traitement et en ajoutant l'ancien, et f réentrainé en conséquence.

6 Expériences

6.1 Données Utilisées

Il n'existe pas de référence pour la découverte de causalité dans les KGs. Nous avons exploité deux KGs déjà utilisés décrits dans Tab. 1 : *Vitamin* [17], et un extrait relativement simple de *DBPedia*, que l'on nomme *DBPediaW* [10, 17].

TABLE 1 – Description des Données

	DBPediaW	***Vitamin***
# Triplets	6908	86006
# Classes	4	19
# Instances t_c	185	1714
# Propriétés	8	22

TABLE 2 – Résultats

	DBPediaW	***Vitamin***
# Règles ([16])	12	0
# Règles ([17])	12	77
# Règles Dicare-E	3	48
% Paires expliquées ([16])	21,2	0
% Paires expliquées ([17])	21,2	50.1
% Paires expliquées Dicare-E	**78,1**	**92,8**
% Règles pertinentes ([17])	83,3	66,6
% Règles pertinentes Dicare-E	**100**	**76,6**

Vitamin décrit des personnes et leurs caractéristiques socio-économiques telles que leur âge, travail, sexe, régime alimentaire actuel et idéal, opinions sur des faits liés au bien-être animal et au changement climatique. Ce graphe a une profondeur de 2 et 1714 instances de la classe cible $Person$. Nous souhaitons expliquer la différence entre le régime actuel et idéal d'une personne, i.e., sa volonté de réduire sa consommation de viande, indiquée par le prédicat *reduceMeat* ayant des valeurs $\in \mathbb{N}$.

DBPediaW [10] a une profondeur de 2 et décrit des auteurs, leurs parcours académique et livres. La classe $Writer$ est composée de 185 instances. Nous cherchons pourquoi des auteurs publient leur premier livre plus jeunes que d'autres.

6.2 Évaluation et Résultats

L'objectif est de montrer l'efficacité et la robustesse de l'utilisation de modèles de plongements de graphes pour la découverte de règles causales différentielles dans les KGs.

Nous avons entraîné et évalué plusieurs modèles de plongements. Ensuite, nous avons étudié la distribution entre la distance euclidienne d et la métrique de similarité sim_e afin de montrer que cette distribution peut être estimée par un modèle. Enfin, nous avons appliqué notre algorithme pour découvrir des règles causales différentielles et comparons les résultats obtenus à ceux de [16] - appariement strict - et [17] - appariement par communautés.

Entraînement des modèles de plongements. $ConvE$ est le plus performant pour *Vitamin*, *i.e.* avec les *MRR* et *Hits@n* les plus élevés, et est donc utilisé par la suite. Pour *DBPediaW*, *DistMult* obtient les meilleures performances. Les performances sont présentées à ce lien [1].

Association entre distance d et similarité sim_e. Pour *Vitamin*, la distribution entre d et sim_e est présentée dans la Fig. 3. Comme prévu par [19], plus la distance d entre les vecteurs de deux instances est élevée, moins les instances sont similaires. La distribution entre d et sim_e de la Fig. 3

1. https ://github.com/IC2022RuleEmbeddings/Soumission

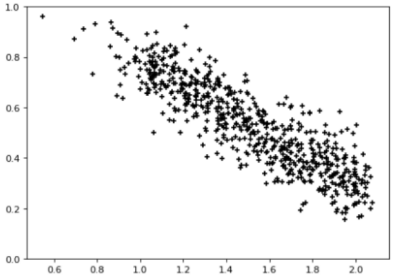


FIGURE 3 – Distribution des valeurs de distance d (axe x) et de similarité sim_e (axe y) pour un ensemble de paires

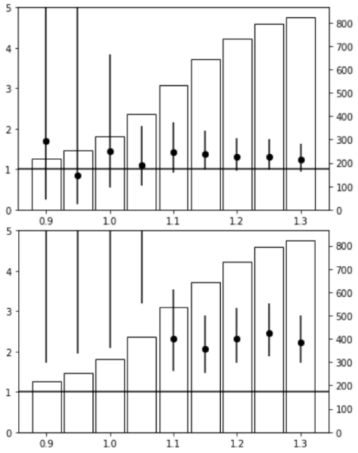


FIGURE 4 – $causal_{OR_T}$ (axe y gauche, points) et nombre de paires créées (axe y droite, histogramme) selon d_{tr} (axe x). Traitements : (haut) genre (X_1 : femme, X_2 : homme) ; (bas) lieu d'habitation (X_1 : campagne, X_2 : aire urbaine)

est modélisée par un modèle linéaire avec $(r^2 = 0,78)$. En utilisant ce modèle, le seuil de distance d_{tr} est fixé à $1,1$ pour obtenir une similarité sim_{tr} de 0,75.

Règles découvertes et effet de d_{tr}. Deux traitements différents sont analysés pour illustrer l'importance de la détermination de d_{tr} dans la Fig. 4. : le sexe et le lieu de vie. Une règle est valable si la barre d'erreur ne croise pas la barre horizontale placée à 1. Cette figure montre que plus d_{tr} est faible, plus les barres d'erreurs sont larges. Les paires d'instances des ensembles obtenus sont très similaires, mais la taille de ces ensembles diminuent avec d_{tr}, résultant en une variance élevée dans l'effet estimé. Inversement, plus d_{tr} est élevé, plus les ensembles sont grands mais avec des paires moins similaires, menant à une plus faible variance de l'effet et à un biais plus élevé [18]. Le fait que d_{tr} soit fixé avant le calcul des effets de traitement évite l'introduction d'un biais de la part de l'utilisateur. La Fig. 4 nous indique que, pour d_{tr} fixé à 1,1, la volonté de réduire sa consommation de viande est indépendante du genre car la barre d'erreur correspondante croise la barre horizontale. Il semble en revanche y avoir un effet du lieu d'habitation, habiter en campagne plutôt qu'en aire urbaine pourrait expliquer une volonté de réduire sa consommation de viande.

$$RDC_{hasDiet} : hasDiet(X_1, omnivorous) \wedge hasDiet(X_2, vegetarian) \wedge reducing(X_1, Z_1) \wedge reducing(X_2, Z_2) \Rightarrow lessThan(Z_2, Z_1) \quad (3)$$

$$RDC_{bornIn} : bornIn(X_1, Y_1) \wedge bornIn(X_2, Y_2) \wedge publishedIn(X_1, Z_1) \wedge publishedIn(X_2, Z_2) \wedge greaterThan(Y_2, Y_1) \Rightarrow lessThan(Z_2, Z_1) \quad (4)$$

Évaluation qualitative et quantitative et comparaison. Trois critères ont été évalués. Qualitativement, les règles des deux approches ont été évaluées. Quantitivement, nous avons étudié le pourcentage de paires pour lesquelles les approches peuvent fournir une explication concernant une différence de régimes, et testé la robustesse des deux approches aux données incomplètes.

Notre approche découvre 48 règles différentielles causales pour *Vitamin*, et 3 pour *DBPediaW*. 2 règles sont présentées dans les équations 3 et 4 [2] et invitons le lecteur à visiter le GitHub pour obtenir la liste exhaustive des règles. La règle de l'équation 3 exprime qu'être omnivore plutôt que végétarien explique une volonté plus forte de réduire sa consommation de viande. Cette règle fait sens car, pour A et B deux personnes similaires, si A consomme déjà moins de produits animaux que B, alors B est plus susceptible de réduire sa consommation de produits animaux. La règle de l'équation 4 exprime qu'être né plus tard qu'un autre auteur explique une publication à un âge plus jeune de son premier livre. Une explication peut être le nombre grandissant d'éditeurs ou les réductions de coûts de publication.

Vitamin. Les règles découvertes par [17] et Dicare-E ont été évaluées par un expert du domaine. Aucunes instances n'ont pu être appariées avec [16] qui nécessite que leurs représentations soit isomorphes au traitement et au résultat près. En conséquence, aucune règle n'a pu être extraite (voir table 6.1). Pour faciliter la comparaison des approches, les 30 meilleures règles de [17] et Dicare-E ont été évaluées.

Les règles générées dans [17] peuvent utiliser un motif de graphe plus ou moins spécifique, nommé strate, définissant l'ensemble des instances auxquelles la règle est appliquée. L'expert a souligné que plus la strate est spécifique, plus elles sont difficiles à interpréter, alors que la plupart des règles de Dicare-E sont faciles à interpréter.

Pour chaque règle, quatre possibilités sont étudiées par l'expert : la règle (1) *semble être pertinente*, (2) *pourrait être pertinente*, (3) l'expert *ne sait pas si la règle est pertinente* et (4) *semble être fausse*. Pour Dicare-E, 11 règles ont été classées dans (1), 12 dans (2), 6 dans (3) et 1 dans (4). Pour [17], 12 règles ont été classées en (1), 8 en (2), 6 en (3) et 4 en (4). 66,6% des règles de [17] semblent donc pertinentes ou pourraient l'être, contre 76,6% pour Dicare-E. De plus, Dicare-E n'a qu'une seule règle qui semble fausse, contre 4 pour [17]. Par ailleurs, notre approche fournit un ensemble

2. La représentation des chemins a été simplifiée, les *belong* sont omis, et la fonction s n'est pas définie car les propriétés numériques sont monovaluées dans $Vitamin$ et $DBPediaW$.

©AFIA2022

plus large de traitements, des chemins de propriété supplémentaires par rapport à [17] ont été déterminés.

Le pourcentage de paires pour lesquelles au moins une explication du résultat peut être fournie est de 92,8% pour notre approche et de 50,1% pour [17]. En supprimant 15% des triplets de *Vitamin* pour tester la robustesse des deux approches, le nombre de règles extraites et le pourcentage de paires expliquées ont été réduits dans les deux approches : le pourcentage de paires expliquées est passé de 92,8% à 89,5% pour notre approche, et de 50,1% à 24,7% pour [17]. Ceci s'explique du fait qu'une instance avec une description incomplète ne sera pas utilisée pour la détermination de règles dans [17] alors qu'elle le sera dans notre approche.

DBPediaW. Les 3 règles obtenues par Dicare-E sont compréhensibles et semblent pertinentes. De plus, elles comportent des traitements également obtenus dans [17]. Sur les 12 règles obtenues par [17], 9 semblent pertinentes. Les résultats de [16] sont les mêmes que [17] car, le schéma étant simple, aucune détection de communauté n'a été réalisée. Il est intéressant de voir que, par opposition à *Vitamin*, pour un KG ayant un schéma relativement simple comme *DBPediaW*, les règles issues de [17] sont facilement compréhensibles car contenant peu d'éléments dans leurs strates. Elles sont plus expressives que Dicare-E, qui expriment un effet moyen d'un traitement sur les instances de *DBPediaW*.

Dicare-E permet d'expliquer 78,1% des paires contre 21,2% pour [17]. En enlevant 15% des triplets, les règles obtenues avec notre approche sont les mêmes. Avec [17], ce pourcentage passe à 6,0%. Comme sur *Vitamin*, notre approche permet d'expliquer plus de paires et est plus robuste aux données manquantes.

7 Conclusion

Nous avons proposé une approche combinant des modèles de plongements de graphes et des techniques de fouille de règles symboliques pour la découverte de règles différentielles causales dans les graphes de connaissances. Cette approche hybride est capable de traiter des données incomplètes tout en fournissant des règles interprétables pouvant expliquer les différences dans une caractéristique numérique étudiée. Elle peut être utilisée pour apparier des instances similaires grâce à leur représentation dans un espace de plongements, permettant ainsi l'application du cadre des résultats potentiels. La métrique de similarité proposée, basée sur les prédictions du modèle de plongements, garantit la création de paires similaires uniquement. Notre expérience montre que notre approche peut être utilisée sur des domaines variés ainsi que sur des KGs complexes.

Références

[1] Althauser, R.P., Rubin, D. : The Computerized Construction of a Matched Sample. American Journal of Sociology 76(2), 325–346 (1970)

[2] Ferilli, S., Basile, T.M., Biba, M., Di Mauro, N., Esposito, F. : A general similarity framework for horn clause logic. Fundamenta Informaticae 90(1-2), 43–66 (2009)

[3] Ferré, S. : Answers Partitioning and Lazy Joins for Efficient Query Relaxation and Application to Similarity Search. Lecture Notes in Computer Science 10843 LNCS, 209–224 (2018)

[4] Galárraga, Luis Teflioudi, Christina Hose, Katja Suchanek, Fabian. (2013). AMIE : Association rule mining under incomplete evidence in ontological knowledge bases. WWW 2013. 413-422.

[5] Haan, Rosaline Tiddi, Ilaria Beek, Wouter. Discovering Research Hypotheses in Social Science Using Knowledge Graph Embeddings. The Semantic Web 477-494 (2021)

[6] Iacus, S.M., King, G., Porro, G. : Causal inference without balance checking : Coarsened exact matching. Political Analysis 20(1), 1–24 (2012)

[7] Jain, N., Kalo, J.C., Balke, W.T., Krestel, R. : Do embeddings actually capture knowledge graph semantics ? The Semantic Web. pp. 143–159.

[8] Li, Jiuyong le, Thuc Liu, Lin Liu, Jixue Jin, Zhou Sun, Bingyu. (2013). Mining Causal Association Rules. ICDMW 2013. 114-123.

[9] Moon, C., Jones, P., Samatova, N.F. : Learning entity type embeddings for knowledge graph completion. CIKM '17 p. 2215–2218. ACM, NY, USA (2017)

[10] Munch, M., Dibie, J., Wuillemin, P., Manfredotti, C.E. : Towards interactive causal relation discovery driven by an ontology. In : FLAIRS (2019)

[11] Neapolitan, R.E. : Learning Bayesian Networks. Pearson Prentice Hall. (2003)

[12] Nentwig, M., Hartung, M., Ngomo, A.N., Rahm, E. : A survey of current link discovery frameworks. Semantic Web 8(3), 419–436 (2017)

[13] Pearl, J. : Causality. Cambridge University Press (2009)

[14] Raad J., Pernelle N., Saïs F. Detection of Contextual Identity Links in a Knowledge Base. In Proceedings of the Knowledge Capture Conference (K-CAP 2017). Association for Computing Machinery

[15] Rubin D. B : Estimating causal effects of treatment in randomized and nonrandomized studies. Journal of Educational Psychology 66(5), 688–701 (1974)

[16] Simonne, L., Pernelle, N., Sais, F. : Fouille de règles différentielles causales dans les graphes de connaissances, EGC 2021, pp.293-300

[17] Simonne L., Pernelle N, Saïs F., Thomopoulos R. Differential Causal Rules Mining in Knowledge Graphs. In Proceedings of the Knowledge Capture Conference (K-CAP '21). Association for Computing Machinery.

[18] Stuart, E.A. : Matching methods for causal inference : A review and a look forward. Statistical science : a review journal of the Institute of Mathematical Statistics 25(1), 1–21 (2010)

[19] Wang, C., Pan, S., Hu, R., Long, G., Jiang, J., Zhang, C. : Attributed graph clustering : A deep attentional embedding approach. IJCAI 2019 (2019), 3670-3676.

Learning Path Constraints for UAV Autonomous Navigation under Uncertain GNSS Availability

Marion Zaninotti[1,2] Charles Lesire[2] Yoko Watanabe[2] Caroline P. C. Chanel[1]

[1] ISAE-SUPAERO, University of Toulouse, France
[2] ONERA, University of Toulouse, France

marion.zaninotti@isae-supaero.fr, charles.lesire@onera.fr
yoko.watanabe@onera.fr, caroline.chanel@isae-supaero.fr

Résumé

Cet article adresse un problème de planification de chemin sûr pour la navigation de drone en environnement urbain, sous une disponibilité du GNSS incertaine. Le problème peut être modélisé comme un POMDP et résolu en utilisant des algorithmes à base d'échantillonnage. Cependant, un domaine aussi complexe souffre d'un coût de calcul important et atteint des résultats médiocres sous des contraintes temps-réel. Des recherches récentes visent à intégrer un apprentissage hors ligne afin de guider de manière efficace la planification en ligne. Inspiré par la formalisation de l'état de l'art CAMP (Context-specific Abstract Markov decision Process), cet article propose de réaliser une étape d'apprentissage hors ligne de contrainte sur le chemin et d'appliquer le résultat pour réduire l'espace de recherche de politique pendant la résolution en ligne du POMDP. Plus précisément, le sélecteur de la meilleure contrainte est appris de manière hors ligne et il est utilisé pour sélectionner la contrainte à imposer, pendant la planification en ligne, en fonction des caractéristiques de la tâche, i.e. la probabilité de disponibilité du GNSS dans notre cas d'application. Les conclusions des expériences menées pour différents environnements montrent qu'utiliser l'approche proposée permet d'améliorer la qualité d'une solution atteinte par un planificateur en ligne, en particulier lorsque la probabilité de disponibilité du GNSS est faible.

Mots Clef

Planification de chemin en ligne, Apprentissage pour la planification, POMDP.

Abstract

This paper addresses a safe path planning problem for UAV urban navigation, under uncertain GNSS availability. The problem can be modeled as a POMDP and solved with sampling-based algorithms. However, such a complex domain suffers from high computational cost and achieves poor results under real-time constraints. Recent research seeks to integrate offline learning in order to efficiently guide online planning. Inspired by the state-of-the-art CAMP (Context-specific Abstract Markov decision Process) formalization, this paper proposes to perform an offline path constraint learning process and to apply its result to reduce the policy search space during online POMDP solving. More precisely, the best constraint selector is learnt offline and it is used to select the constraint to impose, during online planning, according to features of the task, i.e. GNSS availability probability in our application case. Conclusions of experiments carried out for different environments show that using the proposed approach allows to improve the quality of a solution reached by an online planner, particularly when GNSS availability probability is low.

Keywords

Online path planning, Learning for planning, POMDP.

1 Introduction

Solving autonomous navigation problems consists in finding a path from an initial position to a goal with a maximum efficiency, while avoiding the obstacles. These problems become challenging when the state of the vehicle is uncertain. Particularly, most of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are equipped with a Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver as navigation system. In an urban environment, the visibility of the GNSS satellite constellation can be reduced by the buildings surrounding the UAV, the accuracy or even the availability of the measured position can then be significantly altered, what can lead to a fatal collision.

[Delamer *et al.*2021] formalize the UAV urban navigation problem under uncertain GNSS availability as a Partially Observable Markov Decision Process (POMDP) [Kaelbling *et al.*1998]. The latter is a principled approach to solve planning problems under uncertainty. However, POMDP planning faces two notorious problems. The first one is the *curse of dimensionality* : the size of the belief state space grows up exponentially with that of the state space. The second problem is the *curse of history* : the number of action/observation sequences to evaluate during

©AFIA2022

research grows up exponentially with the planning horizon [Pineau *et al.*2006]. The use of a Partially Observable Monte-Carlo Planning (POMCP) [Silver and Veness2010] algorithm makes it possible to overcome these difficulties. Nevertheless, the performance remains dependent on the search depth reached within the planning horizon, which is itself dependent on the *branching factor* of the search tree [Hostetler *et al.*2014]. The branching factor includes both the *action factor*, *i.e.* the number of actions available in each belief state, and the *stochastic factor*, *i.e.* the number of possible observations for each action. The stake is then to reduce the branching factor in order to scale up planning. This is all the more important for online planning : the planner has to make a decision quickly whereas the long-planning horizon of such a real-world task incurs prohibitive computational cost. For that, incorporating domain abstraction is a promising approach. [Chitnis *et al.*2021] introduce Context-specific Abstract Markov Decision Process (CAMP), an abstraction of the original MDP model, obtained by imposing the *best constraint* on the states and actions considered by the agent. This best constraint is chosen by an offline learnt *context selector* according to the *features* of a task.

Inspired by this way of domain abstraction of CAMP, this paper proposes to learn offline the best constraint to impose in order to reduce the policy search space during online POMDP solving. In our application case, the context selector returns the constraint which reduces the UAV position state space while preserving the solution optimality, in function of the GNSS availability probability map of a task. Unlike the original CAMP, we address a partially observable domain. In our case, applying action space abstraction is not straightforward as states are not fully observable. Nevertheless, a state space abstraction can be achieved through modification of the cost function for penalizing the constraint violation, which will modify the action outcomes. Additionally, as our objective is to perform online planning for the UAV safe navigation problem, whereas an offline POMCP variant is used in the offline process, an online version is applied for planning. As result, we investigate the use of different algorithms for learning and planning, which has not been done in the original work of CAMP. Thus, regarding the UAV navigation problem with uncertain GNSS availability, our contribution is twofold : (i) we investigate if domain abstraction, by adapting the CAMP framework for a partially observable domain, gives better results when compared to a full POMDP model, and (ii) we evaluate if such a CAMP-inspired approach is robust if we use a different algorithm for learning and planning.

After providing the theoretical background and the related work in the next section, we present the CAMP method adapted to our problem in Section 3. Experimental results are reported in Section 4, demonstrating the planning performance improvement. Section 5 includes concluding remarks and future works.

2 Background and Related Work

2.1 POMDP Preliminaries

A POMDP [Kaelbling *et al.*1998] is defined as a tuple $(\mathcal{S}, \mathcal{A}, \Omega, \mathcal{T}, \mathcal{O}, \mathcal{C}, b_0, \gamma)$, where $\mathcal{S}$, $\mathcal{A}$, and Ω denote respectively spaces of states, actions, and observations. The *transition function* $\mathcal{T}(s, a, s') = p(s'|s, a)$ represents the dynamics of the agent as the probability of transiting from s to s' by taking action a. The *observation function* $\mathcal{O}(a, s', o) = p(o|s', a)$ specifies the probability of observing o after taking action a to reach s'. The *cost function* $\mathcal{C}(s, a)$ defines the cost of taking action a in s. b_0 denotes the initial belief state. $\gamma \in [0, 1]$ is a discount factor expressing a preference for minimizing immediate over future cost.
POMDPs capture partial observability of the system using the *belief state* b, *i.e.* a probability distribution over $\mathcal{S}$, which is updated after each action a and observation o using the Bayes' rule. A POMDP policy $\pi : \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{A}$ prescribes an action for each belief state in the *belief space* $\mathcal{B}$. Solving a POMDP requires finding the *optimal policy* π^* minimizing the expected future cost, called the *value*, for all $b \in \mathcal{B}$. The value of the policy π^* in belief b is defined as :

$$V^{\pi^*}(b) = \min_{\pi} \mathbb{E}\left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t \mathcal{C}(b_t, \pi(b_t)) \Big| \, b_0 = b\right] \quad (1)$$

Additionally, the Q-value of an action a in a belief state b can be defined as :

$$Q^{\pi}(b, a) = \mathbb{E}\left[\mathcal{C}(b, a) + \sum_{t=1}^{\infty} \gamma^t \mathcal{C}(b_t, \pi(b_t))\right] \quad (2)$$

2.2 UAV Urban Navigation POMDP-based Problem

The original planning model proposed by [Delamer *et al.*2021] is formalized as a Mixed-Observability Markov Decision Process (MOMDP) [Ong *et al.*2010], a special class of the POMDP framework. The state space is factorized into fully and partially observable state variables, respectively denoted by s_v and s_h, what reduces the belief state space dimension, and in turn, reduces policy computation time. The state tuple $s = (s_h, s_v) \in \mathcal{S}$ is defined with $s_h = (\mathcal{X}, \mathcal{V}, \beta_a)$ where $\mathcal{X}$ and $\mathcal{V}$ are the vehicle position and velocity, and β_a is the IMU acceleration measurement bias, and $s_v = (F_{col}, F_{GNSS}, P, t_{flight})$ with F_{col} and F_{GNSS} the collision and GNSS availability Boolean flags, P the estimation error covariance matrix over s_h, and t_{flight} the flight time elapsed. An action $a \in \mathcal{A}$ corresponds to the desired velocity direction. The action space $\mathcal{A}$ is a finite set of 10 actions, following 8 radial directions in the 2D horizontal plane, plus up and down. An observation $o \in \Omega$ is defined as the sub-tuple $o = s_v$ of the state tuple, given a full observability of (F_{col}, F_{GNSS}) and a deterministic transition of (P, t_{flight}). This partial state

observability limits the branching factor of the search tree. The transition function follows a GNC (Guidance, Navigation and Control) model, composed of the vehicle motion model, a guidance law, a state estimator, and the IMU and GNSS sensor models. The GNSS availability F_{GNSS} affects how the state estimator propagates the error covariance P, which affects the belief state b' after transition. In brief, P grows when GNSS is unavailable, resulting in more collision risk. Finally, the cost function is defined as :

$$\mathcal{C}(s,a) = \begin{cases} 0 & \text{if goal reached} \\ K_{col} - t_{flight} & \text{if collision} \\ \Delta T_a & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

with $\Delta T_a > 0$ the action execution time, and $K_{col} > 0$ the cost penalty in case of collision. When a collision occurs, the cost of any action is this penalty subtracted with the flight time elapsed. It avoids penalizing more if the collision occurs after a long flight time or near the goal.

2.3 MinPOMCP-GO Algorithm

[Delamer *et al.*2021] propose the POMCP - Goal-Oriented (POMCP-GO) algorithm, an offline goal-oriented variant of POMCP [Silver and Veness2010]. It samples a state s from the initial belief state b_0 corresponding to the *root node*, and simulates action/observation sequences, through *trials*, in order to evaluate actions while building a tree of nodes. To perform a *trial*, POMCP-GO follows a given action selection strategy and a heuristic node value initialization. For the action selection, it relies on the Upper Confidence Bounds (UCB1) strategy [Kocsis and Szepesvári2006] to deal with the exploration–exploitation dilemma. A trial is stopped when a terminal state is reached (a goal or collision state), and this procedure is repeated during a fixed timeframe.

Each tree node h represents a history of action/observation sequences from the initial belief state. The Q-value (Eq. 2) of an action a in a belief state is approximated by $Q(h,a)$, which is the mean cost returned from all trials started from h when action a was selected. This approximation incurs a well-known bias, which decreases as the number of trials increases [Keller and Helmert2013]. To accelerate the policy value convergence by reducing the Q-value bias, [Carmo *et al.*2020] propose the MinPOMCP-GO algorithm which uses a *Min-Monte-Carlo backup* [Keller and Helmert2013].

The present paper approach is based on this MinPOMCP-GO algorithm. During tree building, MinPOMCP-GO initializes the Q-value of a newly created node to a precomputed heuristic value, corresponding to the flight time left to the goal estimated by the Dijkstra algorithm [Dijkstra1959]. Even if this heuristic function is more informative than the traditional rollout used in POMCP, it does not consider GNSS availability probability, hence sampling trajectories that may lead to collisions due to the uncertain UAV position estimate. The impact of GNSS unavailability is only considered indirectly, by back-propagating the cost penalty when a collision occurs.

2.4 Domain Abstraction

Sampling-based algorithms, such as POMCP and variants, suffer from exponential complexity with respect to the branching factor of the search tree. In our UAV navigation problem under uncertain GNSS availability, the solver cannot explore enough, within a short decision-making timeframe, to prevent collisions. In difficult environments, with obstacles reducing GNSS probability availability, navigation mission safety may be compromised. So, we focus on incorporating domain abstraction to reduce the branching factor and to improve online planning solutions.

State Aggregation. One well-known technique of domain abstraction is *state aggregation* : the state space is reduced by clustering equivalent states, *i.e.* states that share some fully-identical properties - *exact aggregation* - or nearly-identical properties - *approximate aggregation* - and treating each of these resulting state clusters as one. In [Li *et al.*2006], the authors list the existing methods of exact state aggregation and unify them to deduce five generic functions. However, since two states rarely share some fully-identical properties, exact abstraction is often useless, while approximate abstraction can achieve greater degrees of compression. In [Abel *et al.*2016], the authors present four types of approximate aggregation and demonstrate that they lead to a bounded loss of optimality of behavior. In [Hostetler *et al.*2014], the authors generalize the formulation of two of these four types of aggregation and apply them to Monte-Carlo Tree Search (MCTS). AS-UCT [Jiang *et al.*2014], ASAP-UCT [Anand *et al.*2015], and OGA-UCT [Anand *et al.*2016] are other implementations of state or state-action pair aggregation to UCT, a MCTS algorithm variant. All of these methods have not been applied in the partially observable framework.

Hierarchical Planning. Another approach to domain abstraction is *hierarchical planning*. It consists in decomposing the planning problem into a network of independent subgoals. *Hierarchical Dynamic Programming* (HDP) [Bakker *et al.*2005] is an example of hierarchical planning for navigation problems. A hierarchy of MDPs is constructed and solved using a hierarchical variation of value iteration. *Abstract Markov Decision Process* (AMDP) [Gopalan *et al.*2017] is a more general method, which allows any MDP planner to be used. Both HDP and AMDP are *top-down* approaches : they select the subgoal before performing planning to reach it. Contrary to *bottom-up* approaches, they present the advantage that planning is necessary only for subgoals used for task completion. Nevertheless, the way to define appropriate subgoals remains an open question.

Integrating Learning for Planning. A third method is to integrate an offline learning phase as a first step, to guide the search during online planning. The CAMP approach [Chitnis *et al.*2021], that has inspired this paper,

©AFIA2022

is part of it. It searches the best reduced state and action spaces of a MDP by imposing a constraint learnt according to the features of a task. Another example is Macro-Action Generator-Critic (MAGIC) [Lee *et al.*2021], which learns the more efficient set of candidate macro-actions to cut down the effective planning horizon for online POMDP planning, being a kind of *temporal abstraction*.

As previously discussed in Section 2.3, one of the weaknesses of MinPOMCP-GO is that the heuristic function does not consider the GNSS availability probability, what can misguide the search. The planning efficiency can hence be improved if we could use this information to further focus the search on more relevant areas, *i.e.* where GNSS is more likely available. For this purpose, the CAMP method seems a good candidate to leverage. Implementing a similar approach for our problem allows to reduce the UAV position state space in function of a probability map of GNSS availability, considering the latter as a task feature.

3 Learning Path Constraints based on GNSS Availability

3.1 Approach Overview

The objective of the CAMP method [Chitnis *et al.*2021] is to learn a context selector $f : \Theta \rightarrow \mathcal{C}$. Each *training task* corresponds to a *feature vector* $\theta \in \Theta$. For each feature vector, the best constraint $C^* \in \mathcal{C}$ is identified. The pairs (θ_i, C_i^*) are given to a neural network to learn f. Once the context selector f is learnt, the best constraint C^* returned from the feature vector θ is then imposed to guide online planning.

In our navigation problem under uncertain GNSS availability, we assume a given environment, *i.e.* known obstacles on a map, and a given navigation mission, *i.e.* fixed initial position and goal. Figure 1 describes our application of the context selector learning process to our problem. The probability maps of GNSS availability are used as feature vectors. For each training map of GNSS availability probability, the best constraint is identified. We define a constraint as a corridor of the environment in which the UAV must stay, and we evaluate it by performing planning within a *training timeout*. Then, these probability maps of GNSS availability and the associated best constraints are used to learn the context selector. Finally, the *test tasks* are solved online, imposing the best constraints returned by the context selector from the test maps of GNSS availability probability. Each step of this process is detailed in the following sub-sections.

3.2 Feature Vectors

As previously discussed, the GNSS availability is crucial to determine safe paths for our UAV. As the GNSS satellites are orbiting around the Earth, the GNSS availability probability varies with the time-of-the-day even for a fixed obstacle environment. We then propose to leverage the context selector learning approach to reduce the UAV position state space by computing navigation constraints based on probability maps of GNSS availability.

A quality of the GNSS position estimate is given as a metric called *Position Dilution Of Precision* (PDOP) [Kleijer *et al.*2009]. Given the satellite geometry, user location and surrounding environment, a PDOP map is generated by using a GNSS simulator. We consider PDOP value as a standard deviation of the GNSS positioning error, assumed to follow a zero-mean Gaussian distribution [Delamer *et al.*2021]. Then, the PDOP map is transformed to a probability map of GNSS availability by using $\mathbf{erf}$, the Gauss error function, and by setting a maximum position error threshold ϵ :

$$\Pr(F_{GNSS} = 1) = \mathbf{erf}\left(\frac{\epsilon}{\sqrt{2}\mathrm{PDOP}}\right). \quad (4)$$

First, we generated test task features by setting different ϵ values to cover the easy and difficult cases where GNSS is most-like available/unavailable. Then, the training task features were generated by linear combination of these test task features with randomly selected coefficients, for more feature variety.

3.3 Constraint Definition and Evaluation

Constraint Definition. We divide the environment map into $n_L \times n_l \times n_h$ areas in an uniform way. n_L denotes the number of areas over the length, n_l over the width, and n_h over the height. For each of these areas, we define a corridor of areas leading from the initial position to the goal one, passing through this area, called *passage area*. For that, we concatenate the paths resulting from the A* algorithm [Hart *et al.*1968] from the area including the initial position to this passage area, and from the latter to the area including the goal position. We use the number of areas constituting the path as cost function in the A* algorithm. We obtain thus at most $n_L \times n_l \times n_h$ different corridors of areas, corresponding to *candidate constraints*, in which the UAV is allowed to navigate. The sub-figure in the middle of Figure 2 shows a candidate constraint defined by dividing the environment map into $(n_L = 5) \times (n_l = 5) \times (n_h = 1)$ areas, and using the top left area as passage area, highlighted in blue.

Planning with Constraint. For each training map of GNSS availability probability, all the candidate constraints are evaluated. For that, offline planning imposing the candidate constraint is executed. We use the *MinPOMCP-GO* planning algorithm [Carmo *et al.*2020], adapting its heuristic function, which estimates the flight time left to the goal, so that the navigation constraint is respected. Figure 2 illustrates an example of the heuristic map obtained from a given environment, navigation mission, and candidate constraint. On the environment map on the left, as on the following maps, the initial position and the goal are respectively represented by a point and a star, and the obstacles

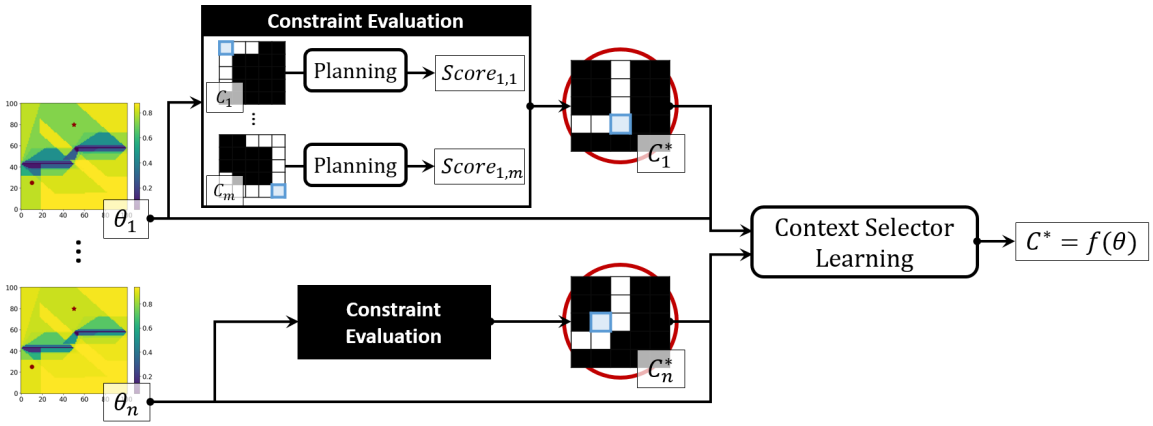


FIGURE 1 – Learning the context selector f by identifying the best constraint C_i^*, for each training task i associated to a probability map of GNSS availability θ_i.

are depicted in yellow. On the heuristic map on the right, the estimated flight time left to the goal is represented inside the constraint. To impose a constraint, the cost function of the planning model (Eq. 3) is also adapted so that it considers a violation of the constraint as a terminal state which leads to a cost penalty K_{constr}. In addition, the collision cost is saturated by a minimal threshold $K_{col_{thr}}$, as some imposed constraints incur long flight times. The cost function then becomes :

$$\mathcal{C}(s,a) = \begin{cases} 0 & \text{if goal reached} \\ \max(K_{col} - t_{flight}, K_{col_{thr}}) & \text{if collision} \\ K_{constr} & \text{if constraint violation} \\ \Delta T_a & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

Best Constraint Identification. In [Chitnis *et al.*2021], a candidate constraint is evaluated using a score formulation, which expresses the trade-off between *how much planning is sped up* and *how much optimality is preserved* imposing this constraint. Reaching the convergence on the policy value is required to estimate the planning time and the policy value. However, it is difficult to judge and can take too long to achieve this convergence in our problem. Therefore, to evaluate a candidate constraint, we stop planning when a *training timeout* is reached, and we express the score as the opposite of the resulting initial belief state value $V^{\pi}(b_0)$. For a probability map of GNSS availability θ_i, the candidate constraint that achieves the highest score, *i.e.* the lowest initial belief state value, is chosen as the best constraint, and is noted C_i^*.

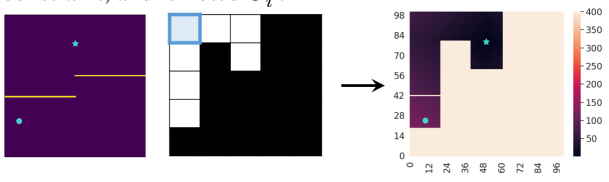


FIGURE 2 – Generation of the heuristic map (right) from an environment, a navigation mission (left), and a candidate constraint (middle).

3.4 Context Selector Learning and Online Planning

The feature vectors $\{\theta_i\}$ of the training tasks and the associated best constraints $\{C_i^*\}$ are used to train a neural network with cross-entropy loss, resulting in the context selector f (Fig. 1). The generic neural network available in the CAMP framework is applied, with the proposed Fully Connected Network architecture [Chitnis *et al.*2021].
At test time, the best constraint is returned by the context selector, given the feature vector of the test task : $C^* = f(\theta)$. This constraint is then integrated in the model to reduce the state space, by imposing to compute navigation paths that stay within the constraint, *i.e.* the corridor. We use two planning algorithms to compute these navigation paths. The first one is *MinPOMCP-GO*, also used for evaluating the candidate constraints in the training phase. The second algorithm is *MinPOMCP-GO** : it is a variant of MinPOMCP-GO in which trials end whenever a previously unvisited leaf node is encountered instead of ending a trial only when a terminal state is reached. MinPOMCP-GO* is aimed to be used online, as it produces more trials with a shortest depth, hence favoring short-term performance that would help avoiding collisions, while taking into account actual observations in an online setting.

4 Experiments

We implement the previously described method to three navigation benchmark environments available in [Mettler *et al.*2010] : *Cube Baffle*, containing two cubes, *Wall Baffle*, containing two walls, and the real downtown of *San Diego*. They are illustrated in Figure 3.
To evaluate our approach, four test tasks are solved for each environment, numbered from 1 to 4, corresponding to the maps presenting from the lowest to the highest GNSS availability probabilities. We compare the results obtained imposing the best constraint returned by the context selector with those obtained without constraint. The performance metrics are the number of collisions and the mean costs obtained considering a fixed decision-making timeframe.

©AFIA2022

(a) (b) (c)

FIGURE 3 – *Cube Baffle* (a), *Wall Baffle* (b), and *San Diego* (c).

The lower they are, the better performance is.

4.1 Material

To carry out the experiments, we use a supercomputer constituted of 24 cores. For each of these cores, the frequency is of 2.60 GHz, the Random Access Memory size is of 96 Go, and the cache size is of 19.25 Mo.

4.2 Settings

In the following, we describe the settings used in our experiments. The GNC model and the reference velocity settings are the same as those described in [Delamer *et al.*2021].

Initial Position and Goal. The mean initial position is set to X_0 = [10, 25, 5] for *Cube Baffle* and *Wall Baffle*, and X_0 = [110, 60, 5] for *San Diego*. The goal position is set to X_G = [85, 78, 5] for *Cube Baffle*, X_G = [50, 80, 5] for *Wall Baffle*, and X_G = [200, 125, 5] for *San Diego*.

Map Decomposition. The map size of *Cube Baffle* and *Wall Baffle* is [101, 101, 21]. For *San Diego*, it is [217, 167, 24]. The maps are uniformly divided into $(n_L = 5) \times (n_l = 5) \times (n_h = 1)$ areas.

Model and Solver. The action cost ΔT_a is set to 2.2. The collision penalty K_{col}, its threshold $K_{col_{thr}}$, and the constraint violation penalty K_{constr} (Eq. 5) are respectively set to 450, 350, and 450. The exploration coefficient c of UCB1 is set to 6.

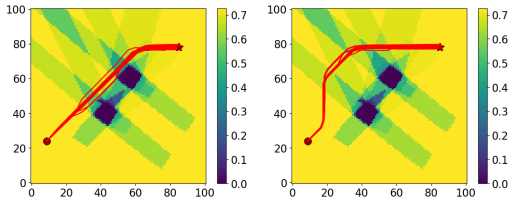
Training Tasks. The training timeout is set to 2 minutes and the number of training tasks, *i.e.* the number of probability maps of GNSS availability used for training, is 30.

Neural Network and Test Tasks. The neural network loss threshold is set to 1.8. The decision-making timeframe is set to 2 seconds and the number of test tasks, *i.e.* the number of probability maps of GNSS availability used for testing, is 4. These maps are generated with the error thresholds : ϵ = 1, 2, 5, and 10 meters. For each test task, 50 episodes are launched.

4.3 Results

The performance metric values obtained for each environment are summarized in Table 1. The probability maps of GNSS availability at the initial and goal altitude are displayed as background of the following figures, the resulting paths are plotted in red and the collisions are represented by black dots.

For the *Cube Baffle* environment, the costs obtained without constraint and imposing the best constraint, using MinPOMCP-GO or MinPOMCP-GO*, are similar for all the test tasks. Indeed, the UAV does not fly close enough to the cubes and the GNSS availability probability is sufficiently high. Hence, very few collisions occur, even without constraint. Figure 4 shows the resulting paths without constraint and imposing the best constraint for the first test task, corresponding to the lowest GNSS availability. The imposed constraint makes the resulting paths deviate to avoid the zones of possible GNSS loss to reduce the collision risk.



(a) (b)

FIGURE 4 – Results obtained for *Cube Baffle*, for test task 1 : paths obtained using MinPOMCP-GO*, without constraint (a), and with the best constraint (b).

Figure 5 shows the resulting paths without constraint and imposing the best constraint for the *Wall Baffle* environment. With MinPOMCP-GO or MinPOMCP-GO*, the number of collisions and the cost obtained imposing the best constraint are considerably lower than those without constraint for the test tasks (1) and (2), corresponding to the two maps presenting the lowest GNSS availability probabilities. For test task (1), using MinPOMCP-GO, the number of collisions obtained imposing the best constraint is reduced of almost 72% ; and using MinPOMCP-GO*, it is reduced to 0. For these test tasks, the best constraint forces to fly over the wall, where GNSS availability probability is greater, instead of flying between the two walls as obtained when no constraint is imposed. Even if the flight time becomes a bit longer, the cost is much reduced because less collisions occur. That is, the mission safety is largely improved. For the third test task, with MinPOMCP-GO or MinPOMCP-GO*, the cost is slightly increased when imposing the best constraint, still favoring the safer paths flying over the wall. Finally, for the fourth test task presenting the highest GNSS availability probabilities, the best constraint only imposes to slightly move away from the first wall. It results in a slight decrease of the collision rate, with MinPOMCP-GO or MinPOMCP-GO*.

The *San Diego* environment includes multiple buildings, that incurs a lot of regions where GNSS availability probability is low. Without constraint, the mission leads to a collision in most episodes, for each test task. The best constraints returned correspond to pass to the left of the obstacles (Fig. 6). With MinPOMCP-GO or MinPOMCP-GO*, the number of collisions and the cost are decreased imposing the best constraint, particularly for the two maps presenting the highest GNSS availability probabilities, test

		MinPOMCP-GO						*MinPOMCP-GO**					
		No constraint		**Constraint**		**Relative Gain (%)**		**No constraint**		**Constraint**		**Relative Gain (%)**	
		N_{col}	$Cost$	N_{col}	$Cost$	N_{col}	$Cost$	N_{col}	$Cost$	N_{col}	$Cost$	N_{col}	$Cost$
Cube Baffle	1	2	115.144	0	114.296	100.00	0.74	0	91.912	0	106.072	/	-15.41
	2	0	96.936	0	97.808	/	-0.90	0	93.592	0	95.144	/	-1.66
	3	1	104.360	0	105.688	100.00	-1.27	2	108.848	0	100.720	100.00	7.47
	4	1	102.648	0	98.384	100.00	4.19	0	94.824	0	99.368	/	-4.79
Wall Baffle	1	21	243.848	6	162.936	**71.43**	**33.18**	12	179.696	0	116.664	**100.00**	**35.08**
	2	14	191.600	3	141.616	**78.57**	**26.09**	9	152.024	0	116.720	**100.00**	**23.22**
	3	0	85.336	0	95.632	/	-12.07	0	84.816	0	95.768	/	-12.91
	4	3	110.976	2	102.616	33.33	7.53	1	95.216	0	87.280	100.00	8.33
San Diego	1	37	387.776	36	370.904	2.70	4.35	40	385.800	35	355.352	12.50	7.89
	2	39	381.368	31	347.800	**20.51**	8.80	27	305.408	23	278.600	14.81	8.78
	3	34	355.872	18	249.392	**47.06**	**29.92**	32	334.264	8	180.576	**75.00**	**45.98**
	4	27	305.496	9	189.824	**66.67**	**37.86**	28	311.352	11	199.136	**60.71**	**36.04**

TABLE 1 – Comparison of the performance metrics obtained by imposing the best constraint with the ones without constraint. The relative gains are computed as relative changes, taking the performance metric value obtained without constraint as reference. The considerably performance gains are presented in bold.

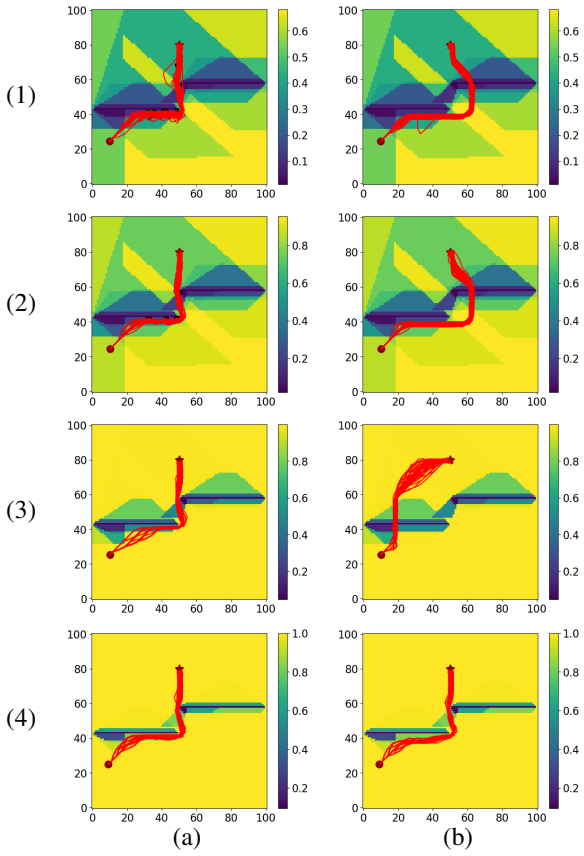


FIGURE 5 – Results obtained for *Wall Baffle* : paths obtained using MinPOMCP-GO*, without constraint (a), and with the best constraint (b)

tasks (3) and (4). For the third test task, the cost is decreased to almost 46% using MinPOMCP-GO*, and for the fourth task, it is reduced to almost 38% using MinPOMCP-GO.

In conclusion, for the three environments, imposing the best constraint always reduces the number of collisions, with any MinPOMCP-GO variant. This gain on the number

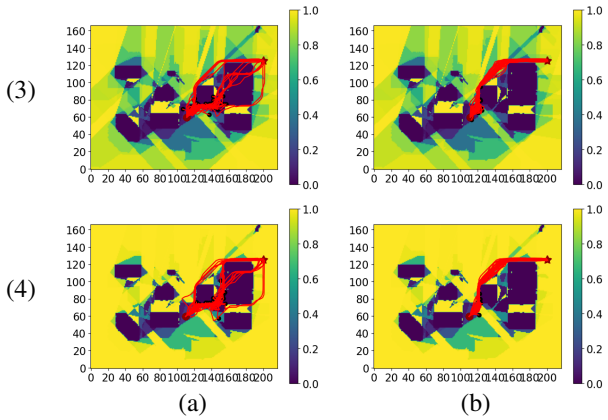


FIGURE 6 – Results obtained for *San Diego*, for test tasks (3) and (4) : paths obtained using MinPOMCP-GO*, without constraint (a), and with the best constraint (b)

of collisions and the one on the cost are much greater for difficult environments, comprising multiple obstacles and presenting low GNSS availability probabilities. Moreover, although the context selector is learnt from MinPOMCP-GO, imposing the best constraint that it returns improves clearly the planning performance even when using the online equivalent, MinPOMCP-GO*.

5 Conclusion

In this paper, we have proposed a learning-based state abstraction approach to address a partially observable problem of UAV autonomous navigation, where the GNSS availability may have a dramatic impact on the UAV path. We have then implemented a process to learn the best path constraint, *i.e.* the best corridor in which the UAV must navigate, from a set of GNSS availability probability maps. We have evaluated this approach on different environments, including a realistic urban one. The presented results have shown that first, imposing these learnt path constraints based on GNSS availability can indeed improve the quality of the online computed paths, especially when

©AFIA2022

uncertainty is high, and second, it has good performances on problems where only the state space is abstracted, and in situations where the constraint is learnt using one algorithm, and then used online with another algorithm.

Future works will generalize this approach by not only considering the GNSS availability map as feature, but also the initial and goal positions. To do so, we will avoid to evaluate all the possible constraints by only considering the most suitable candidate constraints, in order not to generate a huge number of training data. For example, in our navigation problem, only three constraints may be considered for each feature vector : the one corresponding to the shortest path, the one maximizing GNSS availability probability, and the one weighting the both of them.

Références

[Abel *et al.*2016] David Abel, D. Ellis Hershkowitz, and Michael L. Littman. Near optimal behavior via approximate state abstraction. In *International Conference on International Conference on Machine Learning (ICML)*, New York City, NY, USA, 2016.

[Anand *et al.*2015] Ankit Anand, Aditya Grover, Mausam Mausam, and Parag Singla. ASAP-UCT : Abstraction of State-Action Pairs in UCT. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, Buenos Aires, Argentina, 2015.

[Anand *et al.*2016] Ankit Anand, Ritesh Noothigattu, Mausam, and Parag Singla. OGA-UCT : On-the-Go Abstractions in UCT. In *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, London, UK, 2016.

[Bakker *et al.*2005] Bram Bakker, Zoran Zivkovic, and Ben Kröse. Hierarchical dynamic programming for robot path planning. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, 2005.

[Carmo *et al.*2020] Ana Raquel Carmo, Jean-Alexis Delamer, Yoko Watanabe, Rodrigo Ventura, and Caroline Ponzoni Carvalho Chanel. Entropy-based adaptive exploit-explore coefficient for Monte-Carlo path planning. In *International Conference on Prestigious Applications of Intelligent Systems (PAIS)*, (Digital ECAI), 2020.

[Chitnis *et al.*2021] Rohan Chitnis, Tom Silver, Beomjoon Kim, Leslie Kaelbling, and Tomas Lozano-Perez. CAMPs : Learning Context-Specific Abstractions for Efficient Planning in Factored MDPs. In *Conference on Robot Learning*, London, UK, 2021.

[Delamer *et al.*2021] Jean-Alexis Delamer, Yoko Watanabe, and Caroline Ponzoni Carvalho Chanel. Safe path planning for UAV urban operation under GNSS signal occlusion risk. *Robotics and Autonomous Systems*, 142 :103800, 2021.

[Dijkstra1959] Edsger W. Dijkstra. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1 :269–271, 1959.

[Gopalan *et al.*2017] Nakul Gopalan, Marie desJardins, Michael L. Littman, James MacGlashan, Shawn Squire, Stefanie Tellex, John Winder, and Lawson L. S. Wong. Planning with Abstract Markov Decision Processes. In *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, Pittsburgh, PA, USA, 2017.

[Hart *et al.*1968] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, and Bertram Raphael. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2) :100–107, 1968.

[Hostetler *et al.*2014] Jesse Hostetler, Alan Fern, and Tom Dietterich. State Aggregation in Monte Carlo Tree Search. In *AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, Québec City, QC, Canada, 2014.

[Jiang *et al.*2014] Nan Jiang, Satinder Singh, and Richard Lewis. Improving UCT Planning via Approximate Homomorphisms. In *International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*, Paris, France, 2014.

[Kaelbling *et al.*1998] Leslie Pack Kaelbling, Michael L. Littman, and Anthony R. Cassandra. Planning and acting in partially observable stochastic domains. *Artificial Intelligence*, 101 :99–134, 1998.

[Keller and Helmert2013] Thomas Keller and Malte Helmert. Trial-Based Heuristic Tree Search for Finite Horizon MDPs. In *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, Rome, Italy, 2013.

[Kleijer *et al.*2009] Frank Kleijer, Dennis Odijk, and Edward Verbree. Prediction of GNSS Availability and Accuracy in Urban Environments Case Study Schiphol Airport. In *Location Based Services and TeleCartography II. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.

[Kocsis and Szepesvári2006] Levente Kocsis and Csaba Szepesvári. Bandit Based Monte-Carlo Planning. In *European Conference on Machine Learning (ECML)*, Berlin, Germany, 2006.

[Lee *et al.*2021] Yiyuan Lee, Panpan Cai, and David Hsu. MAGIC : Learning Macro-Actions for Online POMDP Planning. In *Robotics : Science & Systems (RSS)*, (Held Virtually), 2021.

[Li *et al.*2006] Lihong Li, Thomas J. Walsh, and Michael L. Littman. Towards a Unified Theory of State Abstraction for MDPs. In *International Symposium on Artificial Intelligence and Mathematics (ISAIM)*, Fort Lauderdale, FL, USA, 2006.

[Mettler *et al.*2010] Berenice Mettler, Zhaodan Kong, Chad Goerzen, and Matthew Whalley. Benchmarking of obstacle field navigation algorithms for autonomous

helicopters. In *Forum of the American Helicopter Society (AHS)*, Phoenix, AZ, USA, 2010.

[Ong *et al.*2010] Sylvie C. W. Ong, Shao Wei Png, David Hsu, and Wee Sun Lee. Planning under Uncertainty for Robotic Tasks with Mixed Observability. *The International Journal of Robotics Research*, 29(8) :1053–1068, 2010.

[Pineau *et al.*2006] Joelle Pineau, Geoffrey Gordon, and Sebastian Thrun. Anytime Point-Based Approximations for Large POMDPs. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 27 :335–380, 2006.

[Silver and Veness2010] David Silver and Joel Veness. Monte-Carlo Planning in Large POMDPs. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, Vancouver, BC, Canada, 2010.

©AFIA2022

Activité AFIA

1er août 2020 – 31 juillet 2022

Éditeurs : Conseil d'Administration de l'AFIA – Année 2022

Table des matières

Flyer AFIA 2022.
À propos de l'AFIA v

Conseil d'Administration de l'AFIA.
CA AFIA vii

Collèges AFIA.
Collèges Industriel, C2A, I&H, R&R, SIC, SMAA, TLH, CECILIA ix

Prix de Thèse IA.
2021 et 2022 xxv

Bulletins Trimestriels.
Résumé des numéros 110 à 117 xxvii

Journées propres.
FIIA 2020, EFIA 2021, PDIA 2021, FIIA 2021, EFIA 2022, PDIA 2022 xxix

Journées communes.
Période : de août 2020 à juillet 2022 xxxv

Plates-formes IA.
Affiches PFIA 2021 & 2022 li

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

A propos de l'AFIA

L'objet de l'AFIA, Association Loi 1901 sans but lucratif, est de promouvoir et de favoriser le développement de l'Intelligence Artificielle (IA) sous ses différentes formes, de regrouper et de faire croître la communauté française en IA, et, à la hauteur des forces de ses membres, d'en assurer la visibilité.

L'AFIA anime la communauté par l'organisation de grands rendez-vous. Se tient ainsi chaque été une semaine de l'IA, la « Plate-forme IA » (PFIA 2020 Angers, PFIA 2021 Bordeaux, PFIA 2022 Saint-Etienne) au sein de laquelle se tiennent les « Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle » (CNIA), « Rencontres des Jeunes Chercheurs en IA » (RJCIA) et « Conférence sur les Applications Pratiques de l'IA » (APIA) ainsi que plusieurs conférences thématiques hébergées qui évoluent d'une année à l'autre, sans récurrence obligée.

C'est ainsi que PFIA 2022 héberge du 27 juin au 1 juillet 2022 à Saint-Etienne, outre les 25e CNIA, 20e RJCIA et 8e APIA, les 33es IC, les 17e JFPC, les 17es JFPDA, les 30es JFSMA, les 16e JIAF, quatre journées thématiques (EIAH & IA, IoT & IA, Résilience & IA, Santé & IA) et une section de tutoriels accessibles à tous les inscrits à la plateforme.

Forte du soutien de ses 264 adhérents à jour de leur cotisation en 2022, l'AFIA assure :

- Le maintien d'un site web dédié à l'IA, reproduisant également les Brèves de l'IA,
- Une journée Industrielle, plus connue sous le nom « Forum Industriel en IA » (FIIA 2021),
- Une journée Recherche sur les « Perspectives et Défis en IA » (PDIA 2022),
- Une journée Enseignement intitulée « Enseignement et Formation en IA » (EFIA 2022),
- La remise annuelle d'un Prix de Thèse de Doctorat en IA,
- Le soutien à plusieurs Collèges, actuellement au nombre de huit, ayant leur propre activité déléguée :
  - Collège Industriel (depuis janvier 2016),
  - Collège Apprentissage Artificiel (depuis janvier 2020),
  - Collège Interaction avec l'Humain (depuis juillet 2020),
  - Collège Représentation et Raisonnement (depuis avril 2017),
  - Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances (depuis avril 2016),
  - Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes (depuis janvier 2017),
  - Collège Technologies du Langage Humain (depuis juillet 2019) ,
  - Collège Création d'Événements (depuis octobre 2018)
- La parution trimestrielle des bulletins de l'AFIA, en accès libre,
- Un lien entre membres et sympathisants sur les réseaux sociaux LinkedIn, Facebook et Twitter,
- Le parrainage scientifique, mais aussi éventuellement financier, d'événements en IA,
- La diffusion mensuelle de brèves sur les actualités de l'IA en France,
- La réponse aux consultations officielles ou officieuses (Ministères, Missions, Organismes),
- La réponse aux questions de la presse, écrite ou orale, également sur internet,
- La divulgation d'offres de collaborations, de formations, d'emploi, de thèses et de stages.

L'AFIA organise aussi mensuellement des Journées Communes avec d'autres Associations. Ont ainsi eu lieu au premier semestre 2022 : Réalité Virtuelle & IA 2022, et Simulation & IA 2022.

Enfin, l'AFIA encourage la participation de ses membres aux grands événements de l'IA, dont PFIA. Ainsi, les membres de l'AFIA, pour leur inscription à PFIA bénéficient-ils en présentiel d'une réduction équivalente à deux fois le coût de leur adhésion, leur permettant d'assister aux 5 jours de PFIA pour 114 € TTC.

Rejoignez-nous vous aussi et adhérez à l'AFIA pour contribuer au développement de l'IA en France. L'adhésion peut être individuelle ou, à partir de trois adhérents, être réalisée au titre de personne morale. Certaines personnes morales voudront aller plus loin et rejoindre notre Collège Industriel, au plus près de l'IA !

Merci également de susciter de telles adhésions en diffusant ce document autour de vous !

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Conseil d'Administration 2021

Président	Benoit LE BLANC	GT Bureau, Prix Thèse, International, Journée
V.-Présidente	Domitile LOURDEAUX	GT Bureau, GT Collèges, Parrainages, Représentation
Trésorière	Isabelle SESE	GT Bureau, Adhésions, Partenariats
Secrétaire	Grégory BONNET	GT Rédaction, Prix Thèse
Webmestre	Emmanuel ADAM	GT Web&Mail, GT Communication, Brèves
Rédacteur	Dominique LONGIN	GT Rédaction
Membres	Sandra BRINGAY	GT Journées, EFIA 2021
	Yves DEMAZEAU	GT Communication, GT Plateforme, PFIA 2021, FIIA 2021
	Gaël DIAS	GT Enseignement, Ecole de Printemps
	Catherine FARON	EFIA 2021
	Pierre FEILLET	Collège Industriel, Réseaux, FIIA 2021
	Thomas GUYET	GT Plateforme, PFIA 2021
	Marie LEFEVRE	GT Web&Mail, Adhésions, Collèges
	Frédéric MARIS	PFIA 2021
	E. Mephu NGUIFO	GT Journées, Dossier n°110
	Gauthier PICARD	GT Enseignement, EFIA 2021, Tutoriels PFIA 2021
	Valérie REINER	Collège Industriel, Ecole de Printemps, FIIA 2021
	Céline ROUVEIROL	Collège Industriel, Cartographie, FIIA 2021
	Laurent SIMON	Dossier n°111
	Charlotte TRUCHET	GT Collèges, Dossier n°111

Conseil d'Administration 2022

Président	Benoit LE BLANC	GT Bureau, Prix Thèse, International, Représentation
V.-Présidente	Domitile LOURDEAUX	GT Bureau, GT Collèges, Parrainages, Représentation
Trésorière	Isabelle SESE	GT Bureau, Adhésions, Partenariats
Secrétaire	Grégory BONNET	GT Rédaction, Prix Thèse
Webmestre	Emmanuel ADAM	GT Web&Mail, GT Communication, Brèves, Réseaux
Rédacteur	Dominique LONGIN	GT Rédaction
Membres	Yves DEMAZEAU	GT Communication, GT Plateforme, PFIA 2022
	Gaël DIAS	GT Enseignement, Ecole de Printemps
	Bernard GEORGES	Collège Industriel
	Thomas GUYET	GT Plateforme, PFIA 2022
	Frédéric MARIS	GT Bureau, Adhésions
	Davy MONTOCILO	GT Plateforme, PFIA 2022, PDIA 2022
	E. Mephu NGUIFO	GT Journées, Dossier n°114, PDIA 2022
	Gauthier PICARD	GT Enseignement, EFIA 2022
	Valérie REINER	Collège Industriel, Ecole de Printemps, Représentation
	Catherine ROUSSEY	GT Web&Mail
	Céline ROUVEIROL	Collège Industriel, Cartographie
	Fatiha SAIS	GT Journées, PDIA 2022
	Ahmed SAMET	GT Plateforme, Tutoriels PFIA 2022
	Charlotte TRUCHET	GT Collèges

Collège Industriel

Objectif du Collège

L'objet du Collège Industriel de l'AFIA est de favoriser les échanges en France dans le domaine de l'IA entre sa composante industrielle et sa composante académique ainsi que diverses actions de promotion de l'IA.

Rejoindre le Collège Industriel de l'AFIA pour une société, c'est, en plus des bénéfices accordés à toutes les personnes morales de l'AFIA (pointeur vers site Web adhésions) :

- Accroître la visibilité du collège industriel de l'AfIA ;
- Pouvoir faire état ses relations académiques et leurs recherches de partenariat académique sur des problématiques ciblées ;
- Proposer aux collèges thématiques des actions intéressant les membres du collège industriel ;
- Pouvoir discuter avec les autres sociétés adhérentes au collège et les autres adhérents, de problématiques dans le domaine de l'IA, de partager des solutions, en garantissant la confidentialité des échanges entre les sociétés ;
- Promouvoir l'IA auprès des décideurs et dirigeants industriels ;
- Contribuer à équilibrer tous les domaines de l'IA et leurs hybridations ;
- Témoigner auprès des collèges thématiques de cas d'usage qui intéressent le CI. ;
- Témoigner de l'apport de l'IA dans l'industrie lors d'événements AFIA (FIIA, tutoriels). ;
- Faire du lobbying au niveau français auprès des Ministères, des pôles de compétitivité, de l'ANR et tout autre organisme, également au niveau européen ;
- Pouvoir bénéficier d'un lien privilégié pour faire connaître aux académiques ses besoins en recrutement offrir des opportunités à la communauté académique de valoriser leurs formations.

En outre, les sociétés membres du Collège Industriel à jour de leur cotisation mensuelle au printemps apparaissent en tant que partenaires de la Plateforme Intelligence Artificielle (PFIA) de la même année.

Programme de Travail

- Contribuer au pilotage d'événements annuels à forte visibilité, le Forum Industriel de l'IA (FIIA) et la Conférence sur les Applications Pratiques de l'IA (APIA) ;
- Cartographier les relations académiques et industriels (Services du 1er Ministre, MA, MC, MEAE, MESRI, MI, MINEF, MJ, MS, MTES, ALLISTENE, CNRS, IMT, INRAE, INRIA, ONERA + IRT) ;
- Solliciter les collèges thématiques de l'AFIA pour des contacts / interventions ;
- Solliciter les collèges thématiques de l'AFIA pour des partenariats de projet ;
- Organiser des réunions régulières au sein du collège ;
- Organiser des réunions avec invités externes ;
- Co-programmer le prochain AI Summit France ;
- Diffuser : bulletins, dossiers du collège en français avec résumés en anglais ;
- Motiver les facilités d'accès à toutes les approches d'IA et leurs hybridations dans les formations, open-sourcer.

Le programme de travail comprend au moins la liste des actions en délégation du CA de l'AFIA énumérées précédemment. Le programme de travail est complété en début d'année civile par les membres du Collège.

Le Collège Industriel se réunit mensuellement pour coordonner les avancées sur les actions engagées par le Collège et en décider d'autres, échanger sur un sujet particulier et/ou sur l'actualité en IA sur le mois écoulé.

Les réunions du CI font l'objet de comptes rendus qui distribués aux membres du Collège Industriel et à tous les membres du CA de l'AFIA.

Comité de Pilotage

Le Collège Industriel est composé de l'ensemble des sociétés s'étant acquittées des Droits d'Adhésion pour l'année en cours.

Le Collège Industriel est complété par la présence d'au moins deux académiques membres du Conseil d'Administration de l'AFIA.

Le Comité de Pilotage du Collège Industriel est constitué de dix personnes physiques, dont au moins : le coordinateur du Collège Industriel, le responsable de la feuille de route, et le responsable des séminaires.

Ces responsables sont désignés pour une durée d'une année par les membres du Collège Industriel, lors de la première réunion annuelle du Collège Industriel.

En 2022, le Collège Industriel est composé de :

- Bruno Carron et Frédéric Perlant
  AIRBUS, Elancourt
- Alain Berger
  ARDANS, Montigny-le-Bretonneux
- Mustapha Derras, Youssef Miloudi et Valérie Reiner (responsable des séminaires) (CA AFIA)
  BERGER-LEVRAULT, Boulogne Billancourt
- Stéphane Durand et Bruno Patin
  DASSAULT Aviation, Saint-Cloud
- Pierre Feillet et Christian de Sainte-Marie
  IBM FRANCE, Gentilly
- Ghislain Atemezing et Christophe Prigent
  MONDECA, Paris
- Jean-Pierre Desmoulins, Jean-Baptiste Fantun et Véronique Ventos
  NUKKAI, Paris
- Julien Bohne, Bernard Georges et Christelle Launois
  SOCIETE GENERALE, Val de Fontenay
- Patricia Besson, Juliette Mattioli et David Sadek
  THALES, Palaiseau
- Yves Demazeau (coordinateur et responsable de la feuille de route) et Céline Rouveirol
  CA AFIA, Grenoble et Paris

Contacts

Coordinateur et Responsable de la feuille de route : yves.demazeau@afia.asso.fr

Responsable des séminaires : valerie.reiner@berger-levrault.com

Quatre membres du Collège Industriel sont membres du Conseil d'Administration (CA) de l'AFIA :

- Yves Demazeau, yves.demazeau@afia.asso.fr
- Bernard Georges, bernard.georges.777@gmail.com
- Valérie Reiner, valerie.reiner@berger-levrault.com
- Céline Rouveirol, celine.rouverirol@afia.asso.fr

Collège Apprentissage Artificiel

Objectif du Collège

L'objectif du Collège Apprentissage Artificiel (C2A) est de contribuer à l'animation de la communauté de recherche française en apprentissage automatique (ou artificiel), et ce en synergie avec les structures d'animation déjà existantes. Les thématiques de recherche sont celles d'apprentissage artificiel, adossées aux principales conférences de la communauté que sont : Conférence d'Apprentissage Artificiel (CAp), Journées Francophones sur les Réseaux Bayésiens et les Modèles Graphiques Probabilistes (JFRB), Rencontres de la Société Francophone de Classification (SFC), Reconnaissance de Formes, Image, Apprentissage et Perception (RFIAP), ... et concerne principalement l'ensemble des travaux autour de l'étude, la conception et l'évaluation d'algorithmes d'apprentissage artificiel, sous ses différentes formes : supervisé, non supervisé ou semi-supervisé ; statistique ou symbolique ; par renforcement ; par transfert.

Plus précisément, en lien avec le CA de l'AFIA, le collège a pour buts l'animation de la communauté autour de l'Apprentissage Artificiel (parrainage d'événements, organisation de journées bilatérales ou thématiques), et la représentation de la communauté en Apprentissage Artificiel au sein de l'AFIA (communications sur le thème de l'Apprentissage Artificiel, participation aux comités de programme).

Programme de Travail

Le collège Apprentissage sera impliqué dans les activités suivantes :

- Organisation de journées communes, par exemple :
  - Cla&IA : Classification et IA, en lien avec la SFC ;
  - Stats&IA : Statistiques et IA, en lien avec la SFdS ;
  - RF&IA : Reconnaissance de formes et IA (partie Apprentissage), en lien avec l'AFRIF ;

- Organisation de journées thématiques, en particulier :
  - Atelier sur la plateforme de l'AFIA ;
  - Atelier en lien avec une conférence spécialisée (CAp, JFRB, SFC, RFIAP) ;
  - Journée industrielle en lien avec le collège industriel de l'AFIA ;

- Interagir avec des conférences (hors AFIA) pour lesquelles l'apprentissage est un thème central, parmi lesquels : CAp, JFRB, SFC, RFIAP (partie Apprentissage) ;

- Interagir avec les autres associations existantes d'animation de la communauté d'Apprentissage artificiel :
  - Société Savante Francophone sur l'Apprentissage Machine (SSFAM) ;
  - Société Francophone de Classification (SFC) ;
  - Société Française de Statistique (SFdS) ;

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage est composé des personnes suivantes :

- Jérôme Azé
  Université de Montpellier, LIRMM

- Isabelle Bloch
  Télécom Paris, LTCI

- Antoine Cornuéjols
  AgroParisTech, MMIP

- Elisa Fromont
  Université Rennes 1, IRISA

- Charlotte Laclau
  Université Jean Monnet à Saint-Etienne, LaHC

- E. Mephu Nguifo
  Université Clermont Auvergne, LIMOS

- Amedeo Napoli
  CNRS, LORIA

- Philippe Preux
  Université Lille 3, CRIStAL

- Céline Rouveirol
  Université Paris 13, LIPN

- Christel Vrain
  Université d'Orléans, LIFO

Le comité de pilotage peut être amené à inviter des membres de la communauté à participer aux discussions et réunions du collège.

Contacts

Coordinateur du Collège : engelbert.mephu_nguifo@uca.fr

Deux membres du comité de pilotage du collège sont membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- E. Mephu Nguifo, engelbert.mephu_nguifo@uca.fr

- Céline Rouveirol, celine.rouveirol@lipn.univ-paris13.fr

Collège Interaction avec l'Humain

Objectif du Collège

Le collège "Interaction avec l'Humain" a pour mission de contribuer aux activités menées par l'AFIA, par des actions relatives au domaine de l'Intelligence Artificielle (IA), en lien avec les domaines de l'Interaction Homme-Machine (IHM), des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH), de la Narration Interactive (NI) et des Environnements Virtuels Interactifs (EVI, incluant la réalité virtuelle, la réalité augmentée, ou encore la réalité mixte).

Les thématiques de recherche couvertes par ce collège sont celles relevant de :

- L'ingénierie et la modélisation des connaissances
    - Connaissances des utilisateurs d'environnement numérique : les apprenants dans les EIAH (tuteurs intelligents, jeux sérieux, MOOC…), les utilisateurs d'une IHM ou d'un EVI, les lecteurs de récits élaborés en NI
    - Connaissances nécessaires au bon fonctionnement de l'environnement numérique : les connaissances des domaines d'enseignements, les connaissances liées à la cognition humaine, les connaissances liées aux environnements virtuels
    - Connaissances nécessaires à l'interaction entre les humains et leur environnement numérique
- Les algorithmes d'apprentissage automatique et semi-supervisés utilisés notamment pour la fouille des données d'interaction : par exemple, l' *Educational Data Mining* et les *Learning Analytics* dans le cadre des EIAH
- Les systèmes de diagnostic et de prise de décisions pour adapter l'environnement aux besoins, capacités et préférences de leurs utilisateurs
- Les modèles de collaboration au sein des environnements complexes où l'humain a une place prépondérante
- L'Intelligence Artificielle pour soutenir l'interaction 3D informée en Environnements Immersifs
- Les approches génératives pour la personnalisation de scénarios en environnements virtuels et narration interactive

Ces thématiques seront coordonnées avec celles couvertes par les autres collèges, notamment pour les parties qui se trouvent aux intersections, comme par exemple la prise en compte de l'humain dans les systèmes à base de connaissances, également couverte par le collège SIC.

Programme de Travail

Les missions du collège "Interaction avec l'Humain" concernent le soutien à l'organisation de manifestations scientifiques (conférences, ateliers), l'animation de groupes de travail, l'édition de dossiers techniques ou de numéros spéciaux de journaux sur des thématiques d'intérêt pour la communauté, ainsi que la diffusion et la communication autour des recherches menées par les communautés françaises sur les disciplines ciblées.

Le collège "Interaction avec l'Humain" contribuera aux actions initiées par l'AFIA sur la mise en place de journées bilatérales, notamment les journées communes « Intelligence Artificielle et Éducation » (EIAH & IA), « Interaction Homme-Machine & Intelligence Artificielle » (IHM & IA), et « Réalité Virtuelle & Intelligence Artificielle » (RV & IA). Il proposera également un soutien similaire à d'autres événements, ponctuels ou récurrents, relevant de son périmètre scientifique.

Il contribuera également à la rubrique « Collèges » du bulletin de l'AFIA. Il pourra de plus proposer un nouveau dossier pour un bulletin de l'AFIA pour faire l'état des lieux des recherches combinant IHM et IA, comment cela vient d'être fait pour la thématique EIAH & IA .

Les actualités du collège "Interaction avec l'Humain" et plus largement des communautés françaises de recherche associées aux journées sont publiées régulièrement sur un site web dédié au collège.

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège "Interaction avec l'Humain" est constitué de chercheurs spécialisés dans les domaines des IHM, des EIAH et de la RV avec une approche IA :

- Armelle Brun
  Université de Lorraine, LORIA, Nancy
- Pierre Chevaillier
  ENI Brest, CERV, Brest
- Nadine Couture
  ESTIA, LABRI, Bordeaux
- Catherine Faron,
  Université Côte d'Azur, I3S, Sophia Antipolis
- Benoit Le Blanc
  ENSC Bordeaux INP, IMS, Bordeaux
- Marie Lefevre,
  Université Lyon 1, LIRIS, Lyon
- Domitile Lourdeaux
  Université de Technologie de Compiègne, HEUDIASYC, Compiègne
- Vanda Luengo,
  Sorbonne Université, LIP6, Paris
- Nicolas Sabouret
  Université Paris-Saclay, LIMSI, Saclay

Contacts

Coordinateur du Collège : benoit.leblanc@ensc.fr

Trois membres du comité de pilotage du collège sont membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- Catherine Faron, faron@i3s.unice.fr
- Marie Lefevre, marie.lefevre@liris.cnrs.fr
- Domitile Lourdeaux, domitile.lourdeaux@hds.utc.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Collège Représentation et Raisonnement

Objectif du Collège

L'objectif du collège est d'animer les communautés de recherche françaises en Représentation et Raisonnement. Les thématiques de recherche sont relatives aux méthodes et outils fondamentaux de l'Intelligence Artificielle. Elles portent sur :

- la définition de modèles de représentation des informations (croyances, connaissances, préférences, obligations et permissions, actions, incertitude, confiance, réputation) comme les langages des logiques classiques ou non classiques, les modèles possibilistes, les ontologies, les langages à base de contraintes, les représentations graphiques, etc.,
- la définition et l'automatisation de raisonnements sur ces informations : raisonnement spatio-temporel, dynamique des informations, révision de croyances, fusion d'informations symboliques, raisonnement par argumentation, raisonnement causal, raisonnement abductif, raisonnement à partir de cas, etc.,
- la perspective algorithmique et de représentation pour des concepts utilisés dans des théories connexes comme la théorie des jeux ou la théorie du choix social (équilibre, stratégie gagnante, manipulation, etc.) : théorie des jeux algorithmique et choix social computationnel,
- la mise au point de méthodes de codage des informations et d'algorithmes de traitement efficaces : compilation de connaissances, SAT, ASP, etc.,
- la modélisation formelle de l'interaction : entre utilisateurs et systèmes informatiques, entre entités informatiques autonomes (agents),
- et généralement le lien avec différentes techniques liées à la décision, la planification, l'ordonnancement, le diagnostic, l'apprentissage, les sciences des données, etc.

Ces thématiques couvrent de très nombreux contextes d'application, comme par exemple le Web sémantique, le Web des données, les systèmes de recommandation ou d'aide à la décision, les agents conversationnels et assistants personnels, la programmation des jeux, la robotique, etc.

Programme de Travail

Le collège R&R est impliqué dans les activités suivantes :

- IAF : Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentales. Ces journées ont lieu tous les ans, à l'initiative du comité IAF. Elles sont articulées autour de 3 ou 4 exposés de synthèse invités, ainsi que d'un programme constitué après appel à communication.
- JFPDA : Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage pour la conduite de systèmes. Ces journées ont lieu tous les ans, à l'initiative des anciens présidents de comités de programme JFPDA et des participants à la liste de diffusion jfpda@loria.fr. Elles sont articulées autour de 2 ou 3 exposés de synthèse invités, ainsi que d'un programme constitué après appel à communication.
- JFPC : Journées Francophones de Programmation par Contraintes. Ces journées ont lieu tous les ans à l'initiative de l'AFPC (Association Française pour la Programmation par Contraintes). Elles sont

articulées autour de 2 ou 3 exposés de synthèse invités, ainsi que d'un programme constitué après appel à communication.

- des ateliers thématiques, qui ont lieu lors d'autres évènements et la contribution à l'organisation de journées communes.

Le Collège consacre une partie de son budget de fonctionnement à l'attribution de bourses permettant à des étudiants d'assister à l'un des évènements organisés par le Collège, ou d'autres manifestations pertinentes au regard des thématiques scientifiques.

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège est constitué des personnes suivantes :

- Elise Bonzon
  Université Paris-Descartes, LIPADE, Paris
- Zied Bouraoui, co-président du comité de programme IAF
  Université d'Artois, CRIL, Lens
- Sylvie Doutre, co-présidente du comité de programme IAF
  Université Toulouse 1, IRIT, Toulouse
- Sébastien Konieczny, directeur du GDR IA
  CNRS, CRIL, Lens
- Fréderic Maris, membre du CA et représentant pour l'AFIA
  Université Paul Sabatier, IRIT, Toulouse
- Nicolas Maudet
  Université Pierre et Marie Curie, LIP6, Paris
- François Schwarzentruber, ancien président du comité de programme JFPDA
  ENS Rennes, IRISA, Rennes
- Laurent Simon, membre du CA de l'AFIA, président de l'AFPC
  Université de Bordeaux, LaBRI, Bordeaux
- Elise Vareilles, membre du CA de l'AFPC
  ISAE Supaero, Toulouse
- Bruno Zanuttini, ancien président du comité de programme JFPDA
  Université Caen Normandie, GREYC, Caen

La composition du comité est amenée à être modifiée bi-annuellement.

Contacts

Coordinateur du collège : frederic.maris@irit.fr

Listes de diffusion : bull-i3@irit.fr, bull-ia@gdria.fr, jfpda@loria.fr

Deux membres du comité de pilotage du collège sont membres du Conseil d'Administration de l'AFIA :

- Fréderic Maris frederic.maris@irit.fr
- Laurent Simon lsimon@labri.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances

Objectif du Collège

À l'heure numérique, les données et les outils se multiplient mais assurer un accès intelligent aux données reste un défi et ce malgré les langages et les technologies qui sont maintenant à disposition des informaticiens et des experts de domaine. Partager des données et des connaissances au sein d'une communauté, d'une entreprise ou sur le web suppose leur explicitation, leur représentation, leur mise en relation, leur diffusion et leur maintenance. L'ingénierie des connaissances est au cœur de ces problématiques.

L'essor des sciences et technologies de l'information et de la communication, et notamment des technologies du web, dans l'ensemble de la société engendre des mutations dans les pratiques individuelles et collectives. L'ingénierie des connaissances accompagne cette évolution, en inventant les modèles, les méthodes, les algorithmes et les outils permettant l'intégration de connaissances et de raisonnements automatiques sur ces connaissances dans des environnements informatiques.

De fait, on constate aujourd'hui une omniprésence des connaissances, en même temps qu'un décloisonnement des communautés de recherche en Intelligence Artificielle pour répondre aux problèmes qui se posent. Ainsi, la construction des systèmes à base de connaissances fait appel à l'ingénierie des connaissances, au traitement automatique des langues, à l'apprentissage automatique, à la fouille de données et à l'interaction homme-machine.

La représentation, l'intégration, l'interrogation, la découverte de connaissances ou le contrôle de la qualité de données et de connaissances issues de données textuelles, semi-structurées, graphes, ou multimédia, potentiellement multi-sources et évolutives, associent ingénierie des connaissances avec recherche d'information, recherche opérationnelle, raisonnement, et analyse de données ; en particulier, la définition de principes évolutifs de représentation des connaissances et de raisonnement dans le cadre unifié des graphes de connaissances devient une thématique émergente traitant par exemple du rôle des ontologies et de l'intégration de données dans ces graphes ; la modélisation des environnements informatiques, de ses acteurs humains ou logiciels, allie ingénierie des connaissances et systèmes multi-agents ; enfin l'ingénierie des connaissances touche à des thématiques classiques dans les communautés de l'interaction homme-machine et des environnements informatiques pour l'apprentissage humain. En plaçant ainsi l'utilisateur au cœur des systèmes informatiques, l'ingénierie des connaissances est sollicitée pour assister l'utilisateur dans le traitement de la masse de données disponibles, pour les visualiser, contextualiser, classer, prédire, approximer, sécuriser, fiabiliser, recommander, expliquer, valider, pallier leur imprécision voire incohérence.

Programme de Travail

Le collège Ingénierie des Connaissances a premièrement un rôle de diffusion de l'information. Il gère une liste de diffusion (comptant plus de 800 incrits) sur l'ingénierie des connaissances et maintient une page web du collège IC sur le site Web de l'AFIA. Il contribue également à l'animation et au dynamisme de la communauté de recherche en Ingénierie des Connaissances. Il est moteur dans l'organisation de la conférence nationale d'Ingénierie des Connaissances (IC) et des Rencontres du Web des Données. Il soutient l'organisation de la conférence internationale Terminology & Ontology: Theories and applications (Toth 2021), l'organisation d'une session spéciale Interaction Management in Digitized Ecosystems dans le cadre de SMC 2021 et l'organisation du workshop international Toth: «Terminology, interoperability and Data integration: Issues and Challenges ». Une journée thématique «Le temps dans tous ses états : détection, representation et exploitation des aspects temporels dans les graphes de données » est prévue.

Ses membres contribuent également à la mise en place de certaines « Journées Communes » de l'AFIA avec d'autres sociétés savantes, à l'organisation d'ateliers sur la Plate-Forme Intelligence Artificielle (PFIA). Enfin, ils participent activement à des événements internationaux tels que EKAW, K-CAP ou encore ISWC.

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège est constitué de 10 chercheurs spécialisés dans le domaine de l'Ingénierie des Connaissances, tous membres des comités de programme de la conférence nationale d'ingénierie des Connaissances (IC) et/ou de la conférence Journées Francophones des Ontologies (JFO), et la plupart des présidents d'éditions passées de la conférence nationale d'Ingénierie des Connaissances :

- Marie-Hélène Abel
  Université de Technologie de Compiègne, HEUDIASYC

- Djamal Benslimane
  Université Claude Bernard Lyon 1, LIRIS

- Sandra Bringay
  Université Paul Valéry Montpellier 3, LIRMM

- Jean Charlet
  Assistance Publique-Hôpitaux de Paris & INSERM, LIMICS

- Sylvie Després
  Université Paris 13, LIMICS

- Catherine Faron
  Université Nice Sophia Antipolis, I3S et Inria

- Nathalie Hernandez
  Université Jean Jaurès Toulouse 2, IRIT

- Nathalie Pernelle
  Université Paris 13, LIPN

- Raphaël Troncy
  EURECOM, Sophia Antipolis

- Haifa Zargayouna
  Université Paris 13, LIPN

Contacts

Coordinateur du Collège : sylvie.despres@univ-paris13.fr

Listes de diffusion : info-ic@inria.fr

Deux membres du comité de pilotage du collège sont membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- Sandra Bringay, andra.bringay@lirmm.fr

- Catherine Faron, faron@unice.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes

Objectif du Collège

Le collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes (SMAA) a pour mission d'organiser les activités du collège au sein de l'AFIA et d'assurer l'interaction entre l'AFIA et la communauté francophone SMA et Agents Autonomes, concernant leur volet IA. Il participe à l'animation scientifique au sein de l'AFIA, en coordination avec les communautés concernées, pour susciter l'implication des membres du collège dans les événements organisés par l'AFIA (ex. PFIA, CNIA) tant en participant aux comités scientifiques, qu'en organisant des manifestations d'intérêt pour la communauté IA en France.

Le collège SMAA évolue dans deux directions :

- Accentuation des interactions avec les communautés robotique, automatique d'une part et simulation, systèmes complexes d'autre part. Concrètement cela se traduira par l'organisation d'événements joints sur des travaux associant SMA et/ou agents conversationnels animés à ces disciplines. Lorsque d'autres champs d'lA seront ciblés, ces événements seront préparés en association avec les autres collèges de l'AFIA concernés.

- Mise en place de webinaires réguliers, issues des équipes impliquées dans le collège SMAA. Les séminaires d'équipes, soutenances de thèses, les soutenances de HDR pourront, sur base du volontariat être diffusées à l'ensemble du collège SMAA.

Programme de Travail

Les missions du collège SMAA concernent l'organisation de manifestations scientifiques (conférences, journées thématiques), l'édition de dossiers techniques ou de numéros spéciaux de journaux sur des thématiques d'intérêt pour la communauté.

Le collège SMAA accompagne notamment l'organisation régulière des JFSMA et de WACAI :

- JFSMA 2021 à PFIA Bordeaux

- JFSMA 2022 à Saint-Etienne

- WACAI 2022 (lieu à définir)

Le collège SMAA accompagne également l'organisation des journées communes suivantes :

- Journée commune MACS & IA

- Journée commune Robotique & IA

- Journée commune Simulation & IA

Il propose également un soutien similaire à d'autres événements, ponctuels ou récurrents, relevant de son périmètre scientifique.

Plus largement le collège envisage des actions d'animation à destination des doctorants, et des actions de médiation scientifique et de communication à destination du large public

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège SMAA est constitué de chercheurs spécialisés dans le domaine des systèmes multi-agents et des agents autonomes, tous membres des comités de programme ou du comité consultatif des Journées Francophones en Systèmes Multi-Agents (JFSMA) et/ou du Workshop Affect, Compagnon Artificiel, Interaction (WACAI).

- Emmanuel Adam
  Université Polytechnique Hauts-de-France, LAMIH, Valenciennes

- Fabien Michel
  Université de Montpellier, LIRMM, Montpellier

- Frédéric Migeon
  Université Paul Sabatier, IRIT, Toulouse

- Maxime Morge
  Université de Lille 1, CRIStAL, Lille

- Magalie Ochs
  Université Aix-Marseille, LSIS, Marseille

- Gauthier Picard
  ONERA, Toulouse

- Nicolas Sabouret
  Université Paris-Sud, LIMSI, Saclay

- Olivier Simonin
  INSA Lyon, CITI, Lyon

- Mahdi Zargayouna
  IFSTTAR, Paris

Contacts

Coordinateur du Collège : emmanuel.adam@uphf.fr

Listes de diffusion : sma@loria.fr, acai@poleia.lip6.fr

Site Web : www.college-smaa.fr

Deux membres du comité de pilotage du collège sont membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- Emmanuel Adam, emmanuel.adam@uphf.fr

- Gauthier Picard, gauthier.picard@emse.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Collège Technologies du Langage Humain

Objectif du Collège

Les Technologies du Langage Humain (TLH) proposent des méthodes permettant une communication homme-machine naturelle, pouvant s'étendre à une interaction homme-homme médiée. Ainsi, les TLH permettent d'analyser, d'interpréter et de produire des actes du langage écrit, parlé ou signé, mais aussi d'interagir avec des données langagières. Ainsi, les TLH englobent traditionnellement le Traitement Automatique des Langues (TAL), la Communication Parlée (CP) et leurs applications les plus emblématiques comme la Recherche d'Information (RI) et la Traduction Automatique.

L'étude du langage humain est une entreprise multidisciplinaire qui nécessite une expertise dans les domaines de la Linguistique, de la Psychologie, des Sciences Cognitives, des Sciences du Numérique, et notamment de l'Intelligence Artificielle (IA). Les TLH occupent une part entière en IA sous le prisme du Test de Turing. Ainsi, elles regroupent tous les axes de recherche de l'IA dans le cadre des données langagières comme la représentation (e.g. plongements lexicaux, analyse syntaxique), le raisonnement (e.g. systèmes de question-réponse), la planification (e.g. argumentation), l'apprentissage (e.g. analyse de sentiments), ou même l'intelligence collective (e.g. détection de communautés). Créer des modèles pouvant interagir de manière élégante et naturelle en utilisant la langue nécessite une compréhension profonde de l'acoustique, de la phonétique et de la prosodie pour le langage oral d'une part (dans le cadre de la reconnaissance et de la synthèse de la parole), et d'autre part, de la morphologie, de la syntaxe, de la sémantique et de la pragmatique pour le langage écrit ou signé (dans le cadre de l'analyse et de la génération de textes). Seulement à cette condition les applications des TLH peuvent offrir la promesse d'un accès « universel » à l'information, notamment à travers les moteurs de recherche, la traduction automatique, le résumé de textes, la veille automatique ou les systèmes de question-réponse. La compréhension globale du langage permet également de caractériser les textes suivant leurs objectifs communicationnels. Ainsi, l'analyse des sentiments et des émotions, l'identification de discours haineux, la détection de plagiats, l'identification et la vérification du locuteur proposent autant de cadres applicatifs importants pour les sociétés numériques.

Puisqu'à l'ère du numérique les données langagières prolifèrent dans des quantités toujours plus importantes et accessibles (*big data*), les champs d'applications des TLH sont nombreux. Ainsi, les archives numériques, les réseaux sociaux, les plateformes collaboratives, les entretiens clients, les textos, les courriels, les commentaires sur des plateformes de vente en ligne sont autant de matières premières pour le développement d'applications des TLH. En particulier, quelques domaines privilégiés sont la santé, l'éducation, le droit, le journalisme et le handicap, mais d'autres émergent comme la finance, l'agriculture, la sécurité, le marketing et les humanités numériques.

Parallèlement au développement de modèles des TLH, de nombreux défis connexes doivent être pris en compte dans le cadre d'une démarche globale, comme la confiance (e.g. reproductibilité, explicabilité, confidentialité), l'éthique (e.g. biais d'apprentissage, représentativité) et l'évaluation (e.g. métriques dédiées) des systèmes proposés.

Le collège TLH de l'AFIA a donc pour mission de promouvoir l'animation et l'interaction scientifiques entre les communautés TAL, CP et RI, et l'ensemble des communautés en IA ayant des intérêts communs dans le but de consolider les collaborations transversales.

Programme de Travail

Afin de mener à bien sa mission, le collège TLH s'engage à soutenir l'organisation de manifestations scientifiques (conférences, ateliers), animer des groupes de travail, éditer des dossiers techniques, organiser des journées thématiques et diffuser et communiquer autour des recherches des communautés françaises du TAL, de la CP, de la RI et de l'IA.

Le collège TLH s'engage à servir de canal de communication entre l'AFIA et ses collèges ainsi qu'avec l'ATALA (Association pour le Traitement Automatique des Langues), l'ARIA (Association Francophone de Recherche d'Information et Applications), et l'AFCP (Association Francophone de la Communication Parlée).

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège est constitué de 10 chercheuses et chercheurs spécialisés dans le domaine du TAL, de la CP et de la RI.

- Florian Boudin
  Université de Nantes, LS2N, Nantes
- Davide Buscaldi
  Université Paris 13, LIPN, Villetaneuse
- Gaël Dias
  Université de Caen Normandie, GREYC, Caen
- Emmanuelle Esperança-Rodier
  Université Grenoble Alpes, LIG, Grenoble
- Corinne Fredouille
  Université d'Avignon, LIA, Avignon
- José Moreno
  Université Paul Sabatier, IRIT, Toulouse
- Aurélie Névéol
  CNRS, LISN, Saclay
- Yannick Parmentier
  Université de Lorraine, LORIA, Nancy
- Mathieu Roche
  CIRAD, TETIS, Montpellier
- Serena Villata
  CNRS, I3S, Sophia Antipolis

Contacts

Coordinateur du collège : mathieu.roche@cirad.fr

Listes de diffusion : ln@cines.fr (TAL), parole@listes.afcp-parole.org (CP), info-aria@lsis.org (RI)

Un membre du comité de pilotage est membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- Gaël Dias, gael.dias@afia.asso.fr

Collège Création d'Evénements Collaboratifs, Inclusifs et Ludiques en IA

Objectif du Collège

Le collège Création d'Événements Collaboratifs, Inclusifs et Ludiques en IA (CECILIA) défend l'apprentissage de l'IA grâce à la pratique coopérative et l'expérimentation.

Il a deux objectifs :

- mettre à disposition des ressources pour l'Intelligence Artificielle par la pratique, en particulier pour les étudiants/lycéens (par exemple lors de la Nuit de l'info),

- favoriser les rencontres dans la communauté IA au travers d'événements instructifs, ludiques et conviviaux (par exemple lors de PFIA).

Ce collège propose de reprendre les activités du collège compétition 2018-2020, et de les étendre à d'autres activités comme des ateliers inspirés des game jams pour être plus inclusives en termes de public et d'approches scientifiques.

Pour mémoire, le collège compétition, a organisé pour l'AFIA les compétitions et animations: « IA sur Robot » lors de RFIA'16 à Clermont-Ferrand, et « BotContest » lors de PFIA'17 à Caen, « DriveToGæther » lors de PFIA'19 (PFIA'20 ayant été finalement organisé en virtuel, nous avons dû annuler notre événement cette année-là).

Programme de Travail

A ce jour, les événements identifiées par le Collège sont les suivants :

- **Nuit de l'Info.** Les participantes et les participants à la Nuit de l'Info répondent en une nuit sur un défi national de programmation, tout en relevant divers défis connexes. Leur programme et un document doivent être remis le lendemain matin avant 8h. Ces résultats sont évalués par un jury national et les jurys des défis connexes. Cette compétition a lieu tous les ans en décembre et l'AFIA y participe en y proposant un défi : intégrer l'IA dans l'application développée. Le jury de ce défi se compose de membres du collège et d'autres personnes de l'AFIA.

- **IA sur Robots.** Le but de ce défi est de mettre en évidence l'IA au sein d'une ou plusieurs plateformes robotiques, dans un scénario figé avec des règles, et une mesure des performances. Ce défi est ouvert à toutes et tous : personnels travaillant dans la recherche, l'enseignement, l'ingénierie, étudiantes et étudiants ainsi que le grand public. Ce défi s'intitule « DriveToGæther » et dispose d'un scénario et d'un règlement. Les projets sélectionnés seront testés par le public (par exemple lors de PFIA). Un de nos souhaits est de formaliser le règlement et les supports de cet événement pour le rendre facilement organisable par des tierces organisations locales (lycées, clubs, etc...).

- **IA et Créativité.** Le but de cet événement est de faire expérimenter au public le potentiel créatif, l'originalité, la performance stratégique et/ou l'adaptativité des méthodes d'IA. Il se déroule sur une ou plusieurs soirées (par exemple lors de PFIA), dans un cadre coopératif et festif.

- Un rassemblement annuel des membres du collège pour revenir sur les activités organisées (par exemple lors de PFIA).

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage se réunira mensuellement ou plus fréquemment en préparation des événements.

- Carole Adam
  Université Grenoble Alpes, LIG
- Florence Bannay
  Université Paul Sabatier, IRIT
- Anne-Gwenn Bosser
  Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest, Lab-STICC
- Victor Charpenay
  Ecole des Mines de Saint-Etienne, LIMOS
- Liana Ermakova
  Université de Bretagne Occidentale, Brest, HCTI
- Thomas Guyet
  Agrocampus Ouest, Rennes, IRISA
- Philippe Morignot
  Aspertise, Paris
- Nicolas Pépin-Hermann
  BA Healthcare, Rennes

Un comité d'organisation sera déterminé en fonction des évènements, et intégrera des membres du comité de pilotage et des membres de comité d'organisation de l'évènement. Un appel à participation sera effectué pour constituer un comité consultatif afin de fédérer une communauté d'actrices et d'acteurs intéressés par l'IA pour tous (responsables d'enseignement ou de fablab, etc).

Ceci pourra nous permettre d'avoir une adhésion plus large à nos projets sur tout le territoire et dans les divers lieux d'enseignements, de pratique et de recherche en IA. Cette communauté sera réunie une fois par an, par exemple lors de PFIA, et/ou en visio selon l'évolution de la situation sanitaire.

Contacts

Coordinateur du Collège : Nicolas.PepinHermann@gmail.com

Adresse de contact : contact@afia-competitions.fr

Un membre du comité de pilotage du collège est membre du conseil d'administration de l'AFIA :

- Thomas Guyet, thomas.guyet@irisa.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Prix de Thèse IA 2021

Le Jury

- Président : Philippe Mathieu (Université de Lille)
- Membres : Salem Benferhat, Christian Bessière, Isabelle Bloch, Pierre Boulet, Mohamed Daoudi, Jean-Gabriel Ganascia, Salima Hassas, Jean-Paul Haton, Andreas Herzig, Marie-Christine Rousset, Thomas Schiex.

Les Lauréats

- 1er Prix: Erwan Lecarpentier "Apprentissage par renforcement en environnement non stationnaire". 06/07/20. Dir. : Guillaume Infantes et Emmanuel Rachelson (ONERA/DTIS, Université de Toulouse).
- Accessit (ex-aequo): Thibault Groueix "Reconstruction et correspondance de formes par apprentissage". 22/10/20. Dir. : Renaud Marlet et Mathieu Aubray (LIGM, Université Paris-Est).
- Accessit (ex-aequo): Romain Wallon "Raisonnement à partir de contraintes pseudo-Booléennes et compilation". 14/12/20. Dir: Daniel Le Berre et Pierre Marquis (CRIL, Université d'Artois).

Prix de Thèse IA 2022

Le Jury

- Présidente : Hélène Fargier (CNRS Toulouse)
- Membres : Meghyn Bienvenu, Isabelle Bloch, Antoine Cornuejols, Sébastien Destercke, , Jean-Gabriel Ganascia, Jérôme Lang, Pierre Marquis, Marie-Christine Rousset, Mathieu Serrurier, Thomas Schiex, Florent Teichtel-Koeningsbuch

Les Lauréats

- 1er Prix: Cédric Colas "Towards Vygotskian autotelic agents: learning skills with goals, language and intrinsically motivated deep reinforcement learning". 30/06/21. Dir. : Pierre-Yves Oudeyer et Olivier Sigaud (Inria, Université de Bordeaux).
- Accessit (ex-aequo): Vincent Le Guen "Deep learning for spatio-temporal forecasting – application to solar energy". 30/11/21. Dir. : Nicolas Thome (CEDRIC, HESAM Université Paris).
- Accessit (ex-aequo): Elise Perrotin "Approches légères pour le raisonnement sur les connaissances et les croyances". 11/10/21. Dir : Andreas Herzig et Emiliano Lorini (IRIT, Université de Toulouse 3).

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Bulletins

Le bulletin de l'AFIA fournit un cadre de discussions et d'échanges au sein de la communauté. Toutes les contributions, pour peu qu'elles aient un intérêt général, sont les bienvenues. Le bulletin contient des rubriques régulières de comptes rendus des conférences, journées et autres événements que l'AFIA organise ou parraine, les résumés d'HDR et de Thèses de Doctorat, et un Dossier qui dresse un état de l'art sur un domaine particulier de l'IA, présente des équipes françaises de recherche en IA (académiques ou industrielles), ou PFIA. Les bulletins de l'AFIA sont accessibles librement depuis le site de l'AFIA.

Le Comité de Rédaction

Le comité de rédaction 2020 avait Dominique Longin comme rédacteur en chef, aidé de Emmanuel Adam, Grégory Bonnet, Claire Lefèvre et Laurent Simon. En 2021, Claire Lefèvre a cédé sa place à Gaël Lejeune, et en 2022 c'est Laurent Simon qui a quitté la rédaction sans être remplacé.

Bulletin 110 **Dossier « PFIA 2020 »** **octobre 2020**

- Le dossier est consacré à PFIA 2020 qui s'est déroulé du 29 juin au 3 juillet 2020 à Angers et qui a hébergé pas moins de 7 conférences (APIA, CNIA, IC, JFPDA, JFSMA, JIAF, RJCIA) en plus de 3 journées (Agronomie & IA, Internet des objets & IA, Santé & IA), de tutoriels, de conférences invitées et de 3 prix AFIA de thèse. Les différents comptes rendus ont été centralisés par E. Mephu Nguifo.
- Ce bulletin comporte en outre un compte rendu de la journée « Recherche Opérationnelle & IA » qui s'est tenue le 10 septembre 2020. Il contient également les thèses et HDR du 3e trimestre 2020.

Bulletin 111 **Dossier « Programmation par contrainte »** **janvier 2021**

- Le dossier, sous la direction de Laurent Simon et Charlotte Truchet, recense 7 contributions d'équipes de recherche académiques ou industrielles françaises menant des travaux dans ce domaine qui, selon Eugène Freuder peut se résumer simplement à : « (…) l'utilisateur décrit le problème, l'ordinateur le résout ».
- Ce bulletin contient également les comptes rendus de PAAMS 2020, FIIA 2020 et de la journée Robotique et IA, en plus des thèses et HDR du dernier trimestres 2020 dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 112 **Dossier « IA & Santé »** **avril 2021**

- Le dossier, dirigé par Fleur Mougin et Lina Soualmia, présente pas moins de 14 contributions autour de cette thématique de la santé, et permet de dégager une tendance forte, absente jusqu'à présent des précédents dossiers publiés dans le Bulletin de l'AfIA : l'imagerie médicale, dopée par les récents progrès en apprentissage.
- Ce bulletin marque l'arrivée de Benoit Leblanc à la présidence de l'AFIA et comporte à ce titre un « Mot du président » accompagné d'une courte biographie. Ce bulletin est complété par le compte rendu des journées « Enseignement et formation en IA » et « Technologies du langage humain et santé », ainsi que les thèses et HDR soutenues pendant le 1er trimestre 2021 et dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 113 Dossier « Instituts et chaires en IA » juillet 2021

- Ce dossier, dirigé par Laurent Vercouter, présente les 4 instituts 3IA (ANITI, Côte d'Azur, MIAI@Grenoble, PRAIRIE) ainsi que 5 chaires en IA réparties un peu partout en France.
- Ce bulletin comporte également le compte rendu de la journée EGC & IA sur le thème « Evolution et dynamique des connaissances formelles » qui s'est déroulée le 18 mai 2021. Il comporte enfin les thèses et HDR soutenues durant le 2e trimestre 2021 et dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 114 Dossier « PFIA 2021 » octobre 2021

- Le dossier est consacré à PFIA 2021 qui s'est déroulé du 28 juin au 2 juillet 2021 à Bordeaux et qui a hébergé pas moins de 7 conférences (APIA, CNIA, IC, JFPDA, JFSMA, JIAF, RJCIA) en plus de 3 journées (Défense & IA, Jeux & IA, Santé & IA), de tutoriels, de conférences invitées et de 3 prix AFIA de thèse. Les différents comptes rendus ont été centralisés par E. Mephu Nguifo.
- Ce bulletin comporte en outre un compte rendu de la journée PDIA sur le thème de « L'explicabilité en IA » qui s'est tenue le 8 avril 2021. Il contient également les thèses et HDR du 3e trimestre 2021.

Bulletin 115 Dossier « Formations en IA » janvier 2022

- Le dossier, sous la direction de Anne Boyet et Laurent Vercouter, recense les formations en IA en France.
- Ce bulletin (à paraître) contient également les comptes rendus de FIIA 2021, en plus des thèses et HDR du dernier trimestres 2021 dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 116 Dossier « IA et explicabilité » avril 2022

- Le dossier, dirigé par Nicolas Maudet, présente pas moins de 12 contributions autour de cette thématique, alors que celle-ci offre probablement un des grands centres d'intérêt du moment en IA.
- Ce bulletin est complété par le compte rendu des journées « Réalité Virtuelle et Intelligence Artificielle » et « Perspectives et Défis de l'IA », et de la journée commune « AfIA & Réseau DEVS », ainsi que les thèses et HDR soutenues pendant le 1er trimestre 2022 et dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 117 Dossier « Équipes industrielles en IA » juillet 2022

- Ce dossier, dirigé par Yves Demazeau, présente les contributions de 9 équipes de recherche industrielles en IA qui exposent leurs travaux du moment. Ces contributions ont été sollicitées auprès des membres du Collège Industriel de l'AFIA, également auprès des partenaires industriels de PFIA.
- Ce bulletin comporte également le compte rendu de la journée PDIA 2022 sur le thème « IA & créativité » qui s'est déroulée le 7 avril 2022. Il comporte enfin les thèses et HDR soutenues durant le 2e trimestre 2022 et dont nous avons eu connaissance.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

FIIA 2020

Ce cinquième FORUM INDUSTRIEL DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE est consacré à « RGPD, DROIT & IA », avec pour sous-thèmes : l'impact de la RGPD sur les algorithmes d'IA, les questions de droits et contrats soulevées par ces algorithmes, et les questions de gouvernance et de régulation qu'ils posent. Chaque thème est composé de courtes présentations suivies d'une mini-table ronde dont l'objectif est d'aboutir à des éléments de feuille de route et de permettre des échanges accrus entre académiques et industriels. Une dernière session est réservée à des présentations rapides par des industriels invités.

Date et Lieu

- Date : 08 octobre 2020
- Lieu : TOTEM / Institut des Systèmes Complexes Paris IdF, 11 Place Nationale, 75013 Paris

Programme

- 08h30 Accueil
- 08h45 Ouverture de David Chavalarias (*Directeur de l'ISC IdF*) et Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Grégory Bonnet (AFIA).
- 09h00 « Droit et innovation : la norme juridique peut-elle être performante ? L'exemple de la RGPD » par Timothée Paris (*Conseil d'Etat Paris*)
- 09h30 « Impacts de la RGPD sur les traitements d'IA » par Bertrand Pailhès (*CNIL Paris*)
- 10h00 « Reconnaissance faciale et RGPD » par Théodore Christakis (*U. Grenoble-Alpes*)
- 10h30 Pause
- 11h00 « Questions de propriété sur les données et modèles d'apprentissage » par Jean-Marc Deltron (*U. Strasbourg*)
- 11h30 « Protection en droit d'auteur des productions de l'IA » par Arnaud Billion (*IBM France Gentilly*)
- 12h00 « Intelligence artificielle et droit des contrats » par Gérard Haas (*Haas-Avocats Paris*)
- 12h30 Buffet
- 14h00 « Quelle gouvernance et quelle responsabilisation pour l'IA » par Juliette Sénéchal (*U. Lille*)
- 14h30 « Intelligibilité et confiance dans les systèmes d'IA » par Raja Chatila (*Sorbonne U. Paris*)
- 15h00 « Enjeux éthiques des algorithmes d'IA dans le contexte réglementaire de la RGPD » par Jean-Michel Livowksy (*DPO-Avocats Paris*)
- 15h30 « Le droit peut-il être artificiel » par Nicolas Lerègle (*Lex Squared Paris*)
- 16h00 Pause
- 16h30 Présentations rapides de sociétés concernées par l'IA en « Trois planches »
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Ghislain Atemezing, Stéphan Brunessaux pour le Collège Industriel de l'AFIA et Grégory Bonnet pour le Conseil d'Administration de l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-fiia/. Le déjeuner est garanti à toutes les personnes qui se seront inscrites avant le 05/10/20, et seulement à celles-ci.

Institut des Systèmes Complexes

cnrs

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

EFIA 2021

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa deuxième journée Enseignement et Formation en IA. La journée a deux objectifs : d'une part, réaliser un tour d'horizon des besoins des entreprises et de la société civile. D'autre part, de dresser un état de l'art des formations académiques en IA qui existent en France et qui participent à la démocratisation de son utilisation.

Date et Lieu

- Date : 07 Janvier 2021
- Lieu : Université Paris Nanterre, Amphithéâtre Weber, 200 av. de la République, 92000 Nanterre (*)

Programme

- 08h30 Accueil
- 09h00 Ouverture de Benoit Le Blanc (*Président de l'AFIA*). Introduction par S. Bringay et C. Faron (*Membres du CA de l'AFIA*).
- 09h15 « Stratégie nationale sur la formation en IA » par Laurent Vercouter (*Responsable Formation PNRIA INRIA*) et Anne Boyer (*Chargée de mission IA DGESIP MESRI*)
- 09h45 « Vers l'ajout de compétences IA dans la définition de la littératie numérique à l'UNESCO » par Colin de la Higuera (*U. Nantes et UNESCO*)
- 10h15 Pause
- 10h30 « Le De Vinci Innovation Center : un laboratoire d'enseignement supérieur expérimental et transdisciplinaire » par Clément Duhart (*ESILV La Défense et MIT Media Lab Boston*)
- 11h00 « IA centrée sur l'Humain dans les Industries et la Création » par Sotiris Manitsaris (*Mines ParisTech*)
- 11h30 « IA et informatique visuelle à l'X» par Erwan Scornet (*Ecole Polytechnique Palaiseau*)
- 12h00 « Ouverture du département 2IA Informatique et IA » par Sylvie Ranwez (*IMT Mines Alès*)
- 12h30 Pause repas
- 14h00 « L'IA au cœur des outils de gestion ! Comment passer du buzz à une vision opérationnelle, les défis de formations et acculturation interne » par Youssef Miloudi (*Berger-Levrault Lyon*)
- 14h30 « Stratégie de développement des compétences en IA pour les Ingénieurs » par Bruno Carron (Ai*rbus Defence and Space Elancourt*)
- 15h00 Pause
- 15h30 « 42: le *peer-learning* au service de l'IA » par Olivier Crouzet (*Ecole 42 Paris*)
- 16h00 « Quand les collégiens et les lycéens font du *machine learning* » par Romain Liblau (*Magic Makers Paris*)
- 16h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Sandra Bringay (*U. Montpellier 3*), Catherine Faron (*U. Côte d'Azur Nice*) et Gauthier Picard (*EMSE Saint-Etienne*) pour l'AFIA.

Inscriptions

(*) Pour raisons sanitaires, cet événement est finalement virtualisé, et la session d'ouverture, annulée. L'inscription est gratuite mais obligatoire sur le site : https://afia.asso.fr/efia-2021/.

PDIA 2021

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa septième journée PERSPECTIVES ET DEFIS DE l'IA sur le thème de l'EXPLICABILITE.

L'utilisation des systèmes d'apprentissage et d'aide à la décision est devenue courante. L'étude de la fiabilité et de la précision des systèmes concernés est devenue un sujet d'intérêt majeur, et le besoin de comprendre comment de tels systèmes fonctionnent, apprennent ou prennent des décisions est devenu primordial. L'objectif de cette journée est d'étudier et de discuter toutes ces questions, et de rassembler les chercheurs qui s'y intéressent.

La journée est construite autour d'exposés accessibles, de retours d'expériences et de tables rondes favorisant une grande interaction.

Date et Lieu

- Date : 08 avril 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h00 Ouverture de Benoit Le Blanc (*Président de l'AFIA*) et introduction.
- 09h30 « A Pinch of eXplainable AI from a Knowledge Representation Perspective » par Pierre Marquis (*Université d'Artois Lens*)
- 10h20 « Explications de données et de classifieurs : quelques méthodes et risques notables » par Marie-Jeanne Lesot (*Sorbonne Université Paris*)
- 11h05 Discussion
- 10h30 Pause
- 11h40 « Identifying the "right" level of explanation in a given situation » par Maxwell Winston (*Télécom Paris Palaiseau*)
- 12h30 Pause repas
- 14h00 « Making ML Models fairer through explanations, feature dropout, and aggregation » par Guilherme Alves Da Silva (*Université de Lorraine Vandœuvre lès-Nancy*)
- 14h45 Pause
- 15h00 « DEEL project challenge: Explainability » par David Vigouroux (*IRT Saint Exupéry Toulouse*)
- 15h45 Echange / Discussion / Table ronde

Organisation

Cet événement est organisé par Stephan Brunessaux (*Airbus Elancourt*), Antoine Cornuéjols (*AgroParisTech Paris*), Nicolas Maudet (*Sorbonne Université Paris*), Amedeo Napoli (*CNRS Vandœuvre lès-Nancy*) et Cristel Vrain (*Université d'Orléans*) pour l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur: https://afia.asso.fr/pdia21.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

FIIA 2021

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise son sixième FORUM INDUSTRIEL de l'IA sur le thème IA DE CONFIANCE : Responsabilité, Robustesse, Transparence.

Date et Lieu

- Date : 07 octobre 2021
- Lieu : TOTEM / Institut des Systèmes Complexes Paris IdF, 11 Place Nationale, 75013 Paris

Programme

- 09h15 Ouverture de David Chavalarias (*Directeur de l'ISC IdF*) et Benoit Le Blanc (*Président de l'AFIA*). Introduction par Céline Rouveirol (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 09h30 « Pour une IA digne de confiance ? De quoi parlons-nous vraiment ? » par Bernard Georges (*Société Générale Fontenay-sous-Bois*)
- 10h00 « IA de confiance pour le train autonome et explicabilité » par Thomas Fel (SNCF Saint-Denis) et Laurent Gardes (SNCF Saint-Denis)
- 10h30 Pause-café
- 11h00 « Les défis de l'explication pour les systèmes d'optimisation » par Mathieu Lerouge (CentraleSupélec Paris-Saclay)
- 11h30 « Explaining and manipulating NN architectures with knowledge graphs » par Freddy Lécué (INRIA Sophia Antipolis)
- 12h00 « NuX : a generic tool for high-level explanations » par Véronique Ventos (NukkAI Paris)
- 12h30 Table ronde « Explicabilité » avec Th. Fel ou L. Gardes, F. Lecué, M. Lerouge, V. Ventos.
- 13h00 Buffet
- 14h00 « Construire avec confiance une base de connaissance ou savoir traiter un sujet technique complexe » par Alain Berger (Ardans Paris-Saclay) et Thierry Cartie (Technicatome Nantes)
- 14h30 « Interaction et data visualisation : un vecteur de transparence et de confiance dans les services cognitifs » par Christophe Bortolaso (Berger-Levrault Boulogne-Billancourt)
- 15h00 « ObjectivAIze: mesurer performance et biais dans la décision augmentée pour déterminer les conditions idéales de la collaboration humain-algorithme » par Thomas Baudel (IBM Saclay)
- 15h30 Table ronde « Méthodologie » avec Th. Baudel, A. Berger ou Th. Cartie, Ch. Bortolaso.
- 16h00 Pause-café
- 16h30 « IA de confiance chez Airbus : enjeux, réalisations, perspectives » par Romaric Redon (Airbus Toulouse)
- 17h00 « IA de confiance : condition nécessaire pour le déploiement de l'IA dans les systèmes critiques » par Juliette Mattioli (Thales Palaiseau)
- 17h30 Présentations rapides de sociétés concernées par l'IA « en trois planches » par Kamel Mekhnacha (Probayes Montbonnot), Tristan Aillet et Credo Paniah (Solvay Pessac).
- 18h00 Table ronde « Perspectives » avec T. Aillet ou C. Paniah, J. Mattioli, K. Mekhnacha, R. Redon.

Organisation

Cet événement est organisé par Yves Demazeau, Pierre Feillet, Valérie Reiner et Céline Rouveirol, pour le Collège Industriel de l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-fiia/. Le déjeuner est garanti à toutes les personnes qui se seront inscrites avant le 04/10/21, et seulement à celles-ci.

Institut des Systèmes Complexes Paris Ile-de-France

cnrs

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

EFIA 2022

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa troisième journée ENSEIGNEMENT et FORMATION en IA sur le thème : IA POUR L'ENSEIGNEMENT.

La journée a pour objectif d'échanger entre acteurs institutionnels, acteurs du monde industriel, chercheurs travaillant dans ce domaine, enseignants et praticiens intéressés par l'usage de l'IA en classes. L'idée étant de faire rencontrer les besoins des uns et la vision des autres sur l'utilisation de l'IA en éducation, son apport et ses perspectives à court et moyen termes.

Date et Lieu

- Date : 06 janvier 2022
- Lieu : Sorbonne Université, CICSU, tour 44, 4 place Jussieu 75005 Paris

Programme

- 08h30 Accueil
- 08h45 Ouverture de Benoit Le Blanc (*Président de l'AFIA*). Introduction par Gauthier Picard, Marie Lefevre (*Membres du CA de l'AFIA*) et Amel Yessad (*Membre de l'AFIA*).
- 09h30 « Les enjeux « IA pour l'enseignant » autour des projets opérationnels actuels (et futurs) » par Axel Jean (*DNE Paris*)
- 10h00 « IA : former les enseignants du secondaire » par Colin de la Higuera (*U. Nantes et UNESCO*)
- 10h30 « GTNum Scolia » par Margarida Romero (*U. Côte d'Azur*)
- 11h00 Pause
- 11h30 « Institutions, curriculums et pratiques : Quels usages, présents et à venir, de l'Intelligence Artificielle dans les apprentissages ? » par Agathe Paigneau (*L'IA pour l'Ecole Paris*)
- 12h00 « Un campus d'excellence de l'IA PV associé à une chaire IA » par Françoise Sturbaut (*Lycée Paul Valéry Paris*)
- 12h30 Buffet
- 14h00 « L'IA pour l'éducation au sein de Lalilo » par Thomas Sergent (*Lalilo Paris*)
- 14h30 « L'IA pour l'éducation au sein d'Evidence B» par Thierry de Vulpillières (*Evidence B Paris*)
- 15h00 « L'IA pour l'éducation au sein de Nomad Education » par Julien Rotrou (*Nomad Education Paris*)
- 15h30 Pause
- 16h00 Table ronde « Défis et apports de l'IA pour l'éducation » avec Armelle Brun (*U. Lorraine Nancy*), Nathalie Guin (*U. Lyon 1*), Vanda Luengo (*Sorbonne Université Paris*) et Didier Roy (*INRIA Bordeaux*)
- 17h00 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Marie Lefevre (*U. Lyon 1*), Gauthier Picard (*ONERA Toulouse*) et Amel Yessad (*Sorbonne Université Paris*) pour le Conseil d'Administration de l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-efia/. Le déjeuner est garanti à toutes les personnes qui se seront inscrites avant le 03/01/22, et seulement à celles-ci.

LIP6

SORBONNE UNIVERSITÉ

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

PDIA 2022

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa huitième journée annuelle PERSPECTIVES et DEFIS en INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème : IA ET CREATIVITE.

La journée est composée d'interventions regroupées selon deux sessions, TEXTE, IHM ET IA, le matin, ARTS ET IA l'après-midi.

Date et Lieu

- Date : 07 avril 2022
- Lieu : CNAM, Amphi Friedmann, Accès 33, 2 rue Conté, 75003 Paris

Programme

- 09h00 Accueil
- 09h15 Ouverture de Benoit Le Blanc (*Président de l'AFIA*). Introduction par Fatiha Saïs et E. Mephu Nguifo (*Membres du CA de l'AFIA*).
- 09h30 « Repenser l'interaction avec les technologies d'apprentissage » par Baptiste Caramiaux (*CNRS Paris*)
- 10h30 « Intelligence artificielle pour assister l'idéation et la conception amont » par Alex Gabriel (*Université de Lorraine Nancy*)
- 11h30 Pause
- 11h45 « Machines à écrire: créer des programmes qui créent pour apprendre à se servir de l'IA » par Anne-Gwenn Bosser (*ENIB Brest)*
- 12h45 Buffet
- 14h00 « Angelia: une intelligence artificielle pour la musique électronique » par Jean-Claude Heudin (*Artificial Creature Paris*)
- 15h00 « Musique et IA pour instruments artificiels » par Jérôme Nika (*IRCAM Paris)*
- 16h00 Pause
- 16h15 « Créativité computationnelle liée à la musique » par François Pachet (*Spotify Paris*)
- 17h15 Discussion
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Fatiha Saïs, Fayçal Hamdi, Davy Monticolo et E. Mephu Nguifo et pour Conseil d'Administration de l'AFIA et par les responsables des Collèges de l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (30 € en présentiel pour les non-membres de l'AFIA, gratuites sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-pdia/ . Le déjeuner est garanti aux personnes qui se seront inscrites avant le 04/04/22, et seulement à celles-ci.

RO & IA 2020

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF) organisent leur cinquième journée RECHERCHE OPERATIONNELLE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE le Jeudi 10 Septembre 2020 en virtualisé.

L'objectif de ces journées est de rassembler les communautés de l'IA et de la RO et d'échanger autour de problématiques, de techniques et de concepts communs. Ainsi, la journée se focalisera cette année sur l'enrichissement mutuel dans le domaine de la LOGISTIQUE et de l'ORDONNANCEMENT.

Date et Lieu

- Date : 10 septembre 2020
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h00 Ouverture de François Clautiaux (*Président de la ROADEF*) et Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Zacharie Alès (*ROADEF*) et Emmanuel Adam (*AFIA*).
- 09h30 « Optimisation des décisions de planification avec coopération entre agents asymétriques et données incertaines » par Siao-Leu Phouratsalay (*INRIA Bordeaux*)
- 10h00 « Planification contingente à l'aide de contre-exemples sur des plans déterministes » par Sébastien Piedade (*ONERA Toulouse*)
- 10h30 Pause
- 11h00 « Approche décentralisée d'insertion avec amélioration continue de la qualité de la solution pour un système de transport à la demande» par Alaa Daoud (*EMSE Saint Etienne*)
- 11h30 Pause
- 13h30 « The longest processing time rule for identical parallel machines revisited » par Federico Della Croce (*Ecole Polytechnique de Turin*)
- 14h00 « Problème d'affectation dynamique des emplacements de stockage chez Knapp » par Paul Courtin (*Knapp Angers*)
- 14h30 Discussion
- 15h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par le comité des JFRO pour la ROADEF et par Emmanuel Adam (*UPHF Famars*) pour l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites, non-obligatoires mais appréciées, et sont à effectuer sur la page : https://www.lamsade.dauphine.fr/~jfro/ProchaineJFRO/ .

Robotique & IA 2020

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa quatrième journée « ROBOTIQUE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE » autour du thème INTERACTIONS : HUMAINS, ROBOTS, ENVIRONNEMENT.

La journée est complétée par une présentation du Programme Européen IA et Robotique et par plusieurs tables rondes sur les APPLICATIONS ROBOTIQUE & IA.

Date et Lieu

- Date : 15 décembre 2020
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h00 Accueil
- 09h15 Ouverture de Grégorio Ameyugo (*Chef de Département Intelligence Ambiante et Systèmes Interactifs*) et Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Christophe Leroux (*CEA-LIST et CA AFIA*) et Olivier Simonin (*CA AFIA*).
- 09h45 « Integrating Learning and Geometry for Robotics » par Christian Wolf (*INSA Lyon*)
- 10h15 « Active interaction between robots and humans for automatic curriculum learning and assistive robotics » par Mai Nguyen (*ENSTA Paris*)
- 10h45 « Towards ergonomically enhanced robotic co-workers» par Pauline Maurice (*CNRS Nancy*)
- 11h15 Pause
- 11h30 « Object layout aware instance segmentation for robotic bin picking » par Li Ming Chen (*Centrale Lyon*)
- 12h00 « Robotique d'assistance et aide à la mobilité : compenser, rééduquer, interagir » par Marie Babel (*INRIA Rennes*)
- 12h30 Pause
- 14h00 « Multi-robot interactive teams for large infrastructure inspection: The H2020 BugWright2 project » par Cédric Pradalier (*Georgia Tech Atlanta*)
- 14h30 « IA et Robotique au CEA » par Franck Geffard, Matthieu Grossard, Olivier Lebec et Selma Kchir (*CEA Saclay*)
- 15h00 « Programme de recherche européen IA et robotique » par Christophe Leroux (*CEA Saclay*)
- 15h45 Pause
- 16h00 Table Ronde « Inspection et Maintenance d'Infrastructures Transport / Assainissement » par Jacques Berthellemy (*CEREMA Bron*) et Jean-Denis Muller (*SADE Paris*)
- 16h30 Table Ronde « Sécurité, Intervention post accidentelle » intervenants à confirmer
- 17h00 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Christophe Leroux et Olivier Simonin pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), Christophe Leroux, membre du LIST, agissant également pour le CEA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur: https://www.linscription.com/pro/activite.php?P1=57038 .

TAL & IA 2021

L'AFIA grâce à son Collège TLH et ATALA organisent une cinquième journée TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES LANGUES et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème SANTE ET LANGAGE. La journée est l'occasion de confronter des approches et domaines d'application et de caractériser les éléments de contexte qui les rendent favorables, en particulier sur la thématique récente de la COVID-19.

Date et Lieu

- Date : 4 février 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h30 Présentation de l'AFIA par B. Le Blanc (*Président*) et de ATALA par Ch. Servan (*Président*).
- 09h40 « BabelDr : système de traduction médicale avec pictogrammes pour patients allophones aux urgences dans un secteur de dépistage COVID-19 » par M. Norré (*UC Louvain*) et al.
- 10h00 « Vers une communication médicale adaptée aux personnes sourdes en période de confinement » par B. David (*U. Genève*) et al.
- 10h20 « Reconnaissance vocale du discours spontané pour le domaine médical » par L. Ormaechea Grijalba (*U. Grenoble Alpes*) et al.
- 11h00 « Vers un système de dialogue oral pour la saisie de prescriptions médicales » par A. Can Kocabiyikoglu (*U. Grenoble Alpes*) et al.
- 11h20 « PyMedExt, un couteau suisse pour le traitement des textes médicaux » par W. Digan (*U. Paris*) et al.
- 11h40 « TAL pour une réponse rapide aux maladies émergentes: COVID-19 » par A. Neuraz (*U. Paris*) et al.
- 12h00 « TAL et intégration de données pour les réunions de concertations pluridisciplinaires en oncologie » par N. Bannour (*U. Paris Saclay*) et al.
- 13h30 Présentation invitée de P. Zweigenbaum (*CNRS Orsay*)
- 14h40 « Investigation des marqueurs langagiers non-lexicaux et spécifiques des personnes souffrant de schizophrénie dans des conversations spontanées » par Ch. Li (*U Lorraine Nancy*) et al.
- 15h00 « Measurements of turn-taking and linguistic behaviors in clinical settings » par R. Riad (*U. Paris Sorbonne*) et al.
- 15h20 « Exploration de la temporalité dans la désignation des pathologies du langage en orthophonie : aspects cliniques et termino-ontologiques » par F. Brin-Henry (*U. Lorraine Nancy*).
- 15h45 « Fouille de la littérature médicale à l'aide de graphes » par E. Bigeard (*CNRS Nancy*) et al.
- 16h05 « La communication en santé publique au temps du Covid-19 dans les contextes français, québécois et tunisien » par S. Calvi (*U. Vérone*) et al.
- 16h30 Table Ronde animée par S. Bringay (*U. Montpellier 3*) et E. Brunet-Gouet (*U. Versailles*).

Organisation

Cet événement est organisé par C. Fredouille, A. Névéol et J. Moreno pour le Collège Technologies du Langage Humain (TLH) de l'AFIA et par Ch. Servan pour ATALA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur: https://tlh-sante2021.sciencesconf.org/registration

IHM & IA 2021

L'AFIA grâce à son Collège I&H et l'AFIHM organisent une cinquième journée commune INTERACTION HOMME-MACHINE & INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème COMPRENDRE, DECIDER, COLLABORER : comment IA et IHM se complètent.

Cette journée s'organise autour de présentations, posters vidéo et échanges sur des sujets à l'intersection des deux domaines de recherche ou mettant en évidence les liens possibles entre les deux disciplines.

Date et Lieu

- Date : 11 mars 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 10h00 Présentation de l'AFIA par Yves Demazeau (*Membre du CA*) et de l'AFIHM par Eric Lecolinet (*Président*).
- 10h15 « Coadaptation humain-machine : qui fait le premier pas ? » par Stéphane Canu (*INSA Rouen*) et Baptiste Caramiaux (*CNRS Paris*).
- 11h15 Posters et discussions
- 11h30 « Apports de l'IA et de l'IHM pour soutenir l'apprentissage en contexte éducatif : émergence de nouveaux possibles » Echange entre Marie Lefevre (*Université Lyon 1*) et Stéphanie Fleck (*Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy*).
- 12h30 Pause repas et salon des posters
- 14h00 « Analyser, comprendre le monde : complémentarité entre apprentissage et visualisation » Echange entre Jean-Daniel Fekete (*INRIA Saclay*) et Michèle Sebag (*CNRS Saclay*).
- 15h00 « Le projet AIDA et IBM Research à Saclay : IA et facteurs humains dans les opérations des entreprises » par Christian de Sainte-Marie (*IBM France Orsay*).
- 15h15 Posters et discussions
- 15h30 « Complémentarité de l'IA et l'IHM : L'exemple de CausalityLink » par Pierre Haren (*Causality Link, Sandy USA-UT*) interviewé par Nicolas Roussel (*INRIA Bordeaux*).
- 16h30 Conclusions par Benoît Le Blanc (*Bordeaux INP*) et Thomas Baudel (*IBM France Orsay*)

Organisation

Cet événement est organisé par Benoît Le Blanc pour le Collège Interaction avec l'Humain (I&H) de l'AFIA et par Thomas Baudel pour l'AFIHM.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur: https://www.eventbrite.fr/e/billets-5eme-journee-ihm-ia-129468033373.

EGC & IA 2021

Un regain d'intérêt pour les connaissances formelles en tant qu'atout pour les entreprises et les systèmes d'information a émergé grâce à la popularisation des graphes de connaissances un concept qui porte l'attention sur l'information en tant que connaissances plutôt qu'en tant que données. L'utilisation croissante de connaissances formelles s'accompagne de besoins pressant en termes de technologies, techniques et théories liées à leur cycle de vie. En un mot, il faut s'intéresser à leur évolution.

L'AFIA et EGC organisent une cinquième journée commune EXTRACTION ET GESTION DES CONNAISSANCES et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème: EVOLUTION ET DYNAMIQUE DES CONNAISSANCES FORMELLES. Cette nouvelle journée sera le rendez-vous privilégié pour initier des échanges entre chercheurs académiques et industriels autour de cette thématique.

Date et Lieu

- Date : 18 mai 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 13h30 Accueil
- 13h40 Présentation de EGC par Arnaud Martin (*Président*) et de l'AFIA par Benoît Le Blanc (*Président*).
- 14h00 « Evolution des connaissances » par Jérôme Euzenat (*Inria Grenoble Rhône-Alpes*)
- 15h00 « Amélioration et diversité des connaissances dans le cadre de l'adaptation des ontologies apprises basée sur l'interaction » par Yasser Bourahla (*Inria Grenoble Rhône-Alpes*)
- 15h30 Pause
- 15h45 « Révision des ontologies dans les logiques de description expressives » par Chan Le Duc (*Université Sorbonne Paris Nord*)
- 16h15 « Cadre de développement de l'ontologie modulaire et versionnée ETSI SAREF » par Maxime Lefrançois (*École des Mines de Saint-Étienne*)
- 16h45 Discussion
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Antoine Zimmermann pour le Collège Apprentissage Automatique (C2A) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Manuel Atencia et Jérôme David pour l'Association Extraction et Gestion des Connaissances (EGC).

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur: https://jtegcafia2021.sciencesconf.org/registration.

JI & IA 2021

L'AFIA et le GdR IA du CNRS organisent une troisième journée commune JEUX INFORMATISES et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

Le but de cette journée est de rapprocher les communautés académiques et industrielles sur la thématique de l'IA dans les jeux, et ce au moyen de deux présentations invitées, d'une session de courtes présentations de travaux de recherche en cours dans le domaine, et d'une table ronde réunissant tous les participants. Ainsi, la journée s'adresse aussi bien aux jeunes chercheurs qu'aux chercheurs plus avancés et aux industriels.

La journée Jeux et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme Intelligence Artificielle 2021 (PFIA 2021). Les interventions signalées dans le programme de 09h00 à 10h00 et de 14h00 à 15h00 le sont à ce titre.

Date et Lieu

- Date : 28 juin 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h00 Session d'ouverture de PFIA 2021
- 10h30 Présentations courtes de chercheurs en *Game AI*.
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Conférence invitée CNIA @ PFIA 2021 : « Socially-Aware Artificial Intelligence » par Justine Cassell (*INRIA Paris)*.
- 15h00 Pause
- 15h30 « Abstract Forward Models and Strategy Games » par Diego Perez-Liebana (*Queen Mary University of London*)
- 16h30 « Apprentissage par renforcement efficace sans utilisation de connaissance pour les jeux » par Quentin Cohen-Solal (*Université Paris Sciences & Lettres*)
- 17h30 Table ronde « De l'IA académique à l'IA dans les jeux vidéo : quelles approches passent ? Quelles approches ne passent pas ? Comment l'industrie des jeux envisage le futur de l'IA dans les jeux ? Quelles réponses des chercheurs en IA ? » modérée par Christophe Rey (*U. Clermont Auvergne*), avec la participation de Anne-Gwenn Bosser (*ENIB Brest*), Charlotte et Kevin Buchet (*Wako Factory Nantes*), Tristan Cazenave (*U. Paris Sciences & Lettres*), Guillaume Gaudron (*Ubisoft La Forge Bordeaux*), Eric Jacopin (*CREC Saint-Cyr Coëtquidan*), Guillaume Magnies, Julien Millet et Guillaume Ripoll (*Game Only Lyon*).

Organisation

Cet événement est organisé par Tristan Cazenave (*U. Paris Sciences & Lettres*) pour le Collège Représentation et Raisonnement (R&R) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et par Christophe Rey (*U. Clermont Auvergne*) pour le GT IA des Jeux du GdR Aspects Formels et Algorithmiques de l'IA (GdR IA) du CNRS.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur : https://pfia2021.fr/inscriptions/.

Santé & IA 2021

L'AFIA et AIM organisent une cinquième journée commune INFORMATIQUE MEDICALE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

La journée Santé et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme Intelligence Artificielle 2021 (PFIA 2021). Les interventions signalées dans le programme de 09h00 à 10h00 et de 14h00 à 15h00 le sont à ce titre.

Date et Lieu

- Date : 29 juin 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h00 Conférence invitée JFSMA @ PFIA 2021 : « *Multi-agent Systems to Distribute Intelligence in Industrial Cyber-Physical Systems* » par Paulo Leitao (*IPB Bragança*).
- 10h00 Pause
- 10h30 « Modélisation du raisonnement du médecin urgentiste » par Loïc Etienne.
- 11h00 « Traitement automatique des résumés de passages aux urgences par apprentissage profond » par Loïck Bourdois.
- 11h15 « Anticipating Emergency Patient Journeys with Artificial Intelligence » par Antoine Friant.
- 11h45 « Performance en classification de données textuelles des passages aux urgences des modèles BERT pour le français » par Gabrielle Chenais.
- 12h00 « Correspondance entre les terminologies médicales standards et locales » par Aimé Patrice Koumamba.
- 12h15 « Vers une Petite Ontologie Fondationnelle » par Sébastien Cossin.
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Prix de Thèse IA 2021 de l'AFIA « Apprentissage par renforcement en environnement non stationnaire » par Erwan Lecarpentier (*ISAE-SUPAERO Toulouse*)
- 15h00 Pause
- 15h30 « An open generator of synthetic administrative healthcare databases » par Thomas Guyet.
- 16h00 « Le système d'information multi-sources du Registre Général des Cancers de Poitou-Charentes » par Gautier Defossez.
- 16h15 « Prédiction des facteurs de risque de chute chez les seniors à partir d'informations partielles » par Véronique Delcroix.
- 16h45 « Semi-Automatic Extraction of Abbreviations and their Senses from Electronic Health Records Session Therapies » par Sébastien Cossin.
- 17h00 « Impact clinique des interventions pharmaceutiques » par Justine Clarenne.
- 17h15 « Kalya Research : un assistant de recherche bibliographique dédié aux thérapies non médicamenteuses » par Jessica Pinaire.

Organisation

Cet événement est organisé par Lina Soualmia (*U. Rouen Normandie*) pour le Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances (SIC) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et par Fleur Mougin (*U. Bordeaux*) pour l'Association Française d'Informatique Médicale (AIM).

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur : https://pfia2021.fr/inscriptions/.

Défense & IA 2021

L'AFIA et l'ONERA organisent une première journée commune DEFENSE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

La journée Défense et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme Intelligence Artificielle 2021 (PFIA 2021).

Date et Lieu

- Date : 30 juin 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h00 « L'IA dans les systèmes de combat et sur le champ de bataille » par Michaël Krajecki et Véronique Serfaty (*MA/AID Paris*)
- 09h30 « Accélérateurs de recherche IA & Défense » par Frédérique Segond (*INRIA Grenoble*) et Jean-Philippe Diguet (*CNRS Lorient*)
- 10h00 Pause
- 10h30 « Introduction aux chaires de l'AID » dont ADSIL: Advanced Submarine Intelligent Listening / Hervé Glotin (*U. Toulon*), NoRDF: Modeling and Extracting Complex Information from Natural Language Text / Fabian Suchanek (*Telecom Paris*), SAIDA: Security of AI for Defense Applications / Teddy Furon (*INRIA Rennes*) et SourcesSay: Intelligent Analysis and Interconnexion of Heterogeneous Contents in Digital Arenas / Ioana Manolescu (*INRIA Saclay*)
- 11h30 « NATO Military Uses of Artificial Intelligence, Automation and Robotics » par François du Cluzel (*NATO Norfolk*)
- 12h00 « USAF-MIT AI Accelerator » par Daniela Russ (*MIT Cambridge*)
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 « IA et Systèmes cyber-physiques et IA pour la robotique » par Thierry Berthier (*U. Limoges*) et Christophe Guettier (*Safran Paris*)
- 15h00 Pause
- 15h30 « IA et Surveillance » par Gilles Foulon (*ONERA Toulouse*), Christian Anglade, (*Airbus Elancourt*) et David Sadek (*Thales Paris*)
- 16h30 Table-Ronde « IA de confiance et IA embarquée » avec la participation de Patrick Bezombes (*MA/DGA Paris*), Ariane Bitoun (*MASA Group Paris*), Anne-Claire Boury-Brisset (*MA Ottawa*), Adrien Chan Hon Tong (*ONERA Palaiseau*), Julien Chiaroni (*1erM Paris*), Agnès Delaborde (*LNE Paris*), Amal El Fallah Seghrouchni (*Sorbonne Université Paris*), Arnault Ioualalen (*Numalis Montpellier*), Claire Pagetti (*ONERA Toulouse*), Romaric Redon (*Airbus Toulouse*) et Francoise Soulié (*Hub France IA Paris*)

Organisation

Cet événement est organisé par Stéphan Brunessaux (*Airbus Elancourt*) pour le Collège Industriel (CI) l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Philippe Bidaud (ONERA Palaiseau) pour l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA).

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur : https://pfia2021.fr/inscriptions/.

Classification & IA 2021

L'AFIA et la Société Francophone de Classification organisent une troisième journée commune CLASSIFICATION et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème des : AVANCEES DANS LE DOMAINE NON-SUPERVISE.

Date et Lieu

- Date : 21 septembre 2021
- Lieu : Journée organisée en distanciel

Programme

- 09h30 Ouverture de Mohamed Nadif (*Président de la SFC*) et Benoît Le Blanc (*Président de l'AFIA*). Introduction par Mohamed Nadif (*Membre de la SFC*) et E. Mephu Nguifo (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 10h00 « Classification par modèles de Markov cachés et prévision de la consommation énergétique de bâtiments » par Allou-Badara Same (*Université Gustave Eiffel Marne-la-Vallée*)
- 10h45 « Forêts d'arbres aléatoires pour le clustering de données complexes » par Miguel Couceiro (*Université de Lorraine Nancy*)
- 11h30 « Quelques réflexions sur le clustering de documents textuels » par Eric Gaussier (*Université Grenoble Alpes*)
- 12h15 Pause Déjeuner
- 14h00 « Co-clustering de séries temporelles multivariées pour la validation du véhicule autonome » par Loïc Giraldi (*CEA Saint-Paul-lez-Durance*)
- 14h45 « Modèles de blocs latents semi-supervisés par champs de Markov cachés » par Paul Riverain (*Thales Palaiseau*), Simon Fossier (*Thales Palaiseau*) et Mohamed Nadif (*Université de Paris*)

Organisation

Cet événement est organisé par Mustapha Lebbah pour Le Collège Apprentissage Artificiel (C2A) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), et par Véronique Cariou et Mohamed Nadif pour la Société Francophone de Classification (SFC).

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur: https://claia.sciencesconf.org/registration

RI & IA 2021

Cette quatrième journée RECHERCHE D'INFORMATION et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE prolonge les discussions entre les deux communautés, cette fois sur le thème de l'ACCES INTERACTIF A L'INFORMATION.

L'objectif de la journée est de confronter les expériences de la recherche interactive dans différents domaines d'applications, tant du côté avancé de la recherche que du côté des applications industrielles

Date et Lieu

- Date 09 décembre 2021
- Lieu Sorbonne Université, Amphi 25, 4 place Jussieu 75005 Paris

Programme

- 08h30 Accueil
- 09h00 Présentations de l'AFIA, par Benoit Le Blanc *(Président de l'AFIA) et* de l'ARIA par Benjamin Piwowarski *(Président de ARIA).* Présentation de la journée par Gaël Dias *(Université Caen Normandie)* et Jean-Pierre Chevalet *(Université Grenoble Alpes).*
- 09h30 « Méthodes d'évaluation des systèmes de dialogue » par Sophie Rosset *(CNRS Saclay).*
- 10h30 Pause-café
- 11h00 Session Agents conversationnels, Recherche interactive de documents, Systèmes de questions-réponses, Recommandation et simplification, Accès à l'information pour les non-voyants/malentendants.
- 13h00 Buffet et session posters
- 14h30 « Des tâches de recherche simples aux tâches de recherche complexes : tirer parti de l'interaction en recherche d'information » par Lynda Tamine-Lechani *(Université Toulouse 3).*
- 15h30 Pause-café
- 16h00 Table ronde « Accès interactif à l'information » avec Ludovic Denoyer *(Facebook Paris),* Cédric Lopez *(Emvista Montpellier),* Catherine Pelachaud *(CNRS Paris),* Sophie Rosset *(CNRS Saclay),* Lynda Tamine-Lechani *(Université Toulouse 3) et* Charles Teissèdre *(Synapse Développement Toulouse).*
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est co-organisé par Gaël Dias et Mathieu Roche pour le Collège Technologies du Langage Humain (TLH) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), Jean-Pierre Chevallet et Benjamin Piwowarski pour l'Association Francophone de Recherche d'Information et Applications (ARIA), avec le soutien du GdR TAL.

Inscriptions

Les inscriptions se font sur https://jaii2021.sciencesconf.org/registration. L'inscription est gratuite mais obligatoire. Elle inclut la participation au buffet et aux pause-café.

RV & IA 2022

L'AFIA et le GdR IG-RV du CNRS organisent une troisième journée commune REALITE VIRTUELLE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème: ENVIRONNEMENTS VIRTUELS : ADAPTATION DU SYSTEME A L'HUMAIN OU DE L'HUMAIN AU SYSTEME ?

L'objectif de cette journée est de réunir actrices et acteurs du domaine, afin d'aborder des questions scientifiques, technologiques, ou des questions portant sur les facteurs humains et les usages, au travers de présentations invitées, de démonstrations et de contributions directes.

Date et Lieu

- Date : 9 Mars 2022
- Lieu : Centre d'Innovation de l'UTC, 57 avenue de Landshut, 60200 Compiègne, aussi en distanciel

Programme

- 09h30 Accueil
- 10h00 Ouverture de Dominique Bechmann (*Directrice du GdR IG-RV*), Benoît Le Blanc (*Président de l'AFIA*) et Philippe Bonnifait (*Directeur de Heudiasyc*). Introduction par Domitile Lourdeaux (*UTC Compiègne*) et Indira Thouvenin (*UTC Compiègne*).
- 10h30 « Les agents virtuels dans les environnements immersifs d'apprentissage » par David Panzoli (*Université Toulouse 1 Albi*)
- 11h15 « La réalité virtuelle en tant qu'outil de formation adapté aux pratiques de l'enseignant » par Ludovic Hamon (*Le Mans Université Laval*)
- 11h45 « Facteurs humains et réalité virtuelle : détecter les effets secondaires avec capteurs physiologiques et *machine learning* » par Alexis Souchet (*CNRS Compiègne*)
- 12h10 « Génération d'un profil dynamique du stress pour l'entraînement à la gestion de situations de crise » par Luca Pelissero-Witoslawski (*UTC Compiègne*)
- 12h30 Buffet et présentation des posters
- 14h00 Visite du *Cave Automated Virtual Environment* (CAVE) et des démonstrations.
- 15h00 « Environnements virtuels et modèles de décision pour l'interaction » par Marc Macé (*CNRS Rennes*)
- 15h30 « Toucher social pour l'interaction humain-agent incarné en environnement virtuel » par Fabien Boucaud (*UTC Compiègne*)
- 15h55 « Retours adaptatif en réalité augmentée basés sur l'état du conducteur de véhicule hautement automatisé lors de la reprise de contrôle » par Baptiste Wojtkowski (*UTC Compiègne*)
- 16h15 Table Ronde
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Domitile Lourdeaux pour le Collège Interaction avec l'Humain (I&H) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Indira Thouvenin pour le GdR Informatique Graphique et Réalité Virtuelle (IG-RV) du CNRS.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée sont gratuites mais obligatoires, à effectuer sur https://journee-rvia.hds.utc.fr/.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

The RED Network

Simulation & IA 2022

L'AFIA et le réseau DEVS/RED organisent une 1ère journée commune SIMULATION et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème: SIMULATION POUR L'IA & IA POUR LA SIMULATION.

La journée se tient dans le cadre des 4es Journées Francophones de la Modélisation et de la Simulation (JFMS 2022).

Date et Lieu

- Date : 28 mars 2022
- Lieu : Institut d'Etudes Scientifiques 20130 Cargèse

Programme

- 09h30 Accueil
- 09h45 Ouverture de Paul-Antoine Bisgambiglia (*Coordinateur DEVS/RED*) et Benoît Le Blanc (*Président de l'AFIA*). Introduction par Paul-Antoine Bisgambiglia (*U. Corse Corte*) et Fabien Michel (*U. Montpellier*).
- 10h00 « Simulation des systèmes multi-robots : outils et enjeux » par Olivier Simonin (*INSA Lyon*)
- 11h00 « Apprentissage automatique pour l'amélioration de la qualité des modèles » par Grégory Beurier (*CIRAD Montpellier*)
- 12h30 « Vers des équipes humains-IAs : Ecosystèmes d'intelligence pour cas d'utilisation à fort enjeu » par Clodéric Mars (*AI Redefined Montréatl, CDN-QC*)
- 12h30 Pause Déjeuner
- 14h30 « Simulations and risk, from simulations in simulation to agent-based model and reinforcement learning » par Arthur Charpentier (*U. Québec à Montréal, CDN-QC*)
- 15h30 « SCAMP : a stigmergic approach to modeling intelligent behavior » par H. Van Dyke Parunak (*Parallax Advanced Research, Beavercreek, USA-OH*)
- 16h30 Pause
- 17h00 « Facing complexity with self-organization » par Carlos Gershenson (*U. Nacional Autonoma, Mexico, MX*)
- 18h00 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Fabien Michel pour le Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes (SMAA) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Paul-Antoine Bisgambiglia pour le réseau DEVS/RED.

Inscriptions

Les inscriptions en présentiel sont à prendre depuis le site des 4es Journées Francophones de la Modélisation et de la Simulation (JFMS 2022). Les inscriptions en distanciel sont gratuites mais obligatoires, et sont à effectuer sur cette page.

Università di Corsica Pasquale Paoli | Laboratoire Sciences pour l'Environnement UMR 6134 SPE | cnrs

cnrs

IoT & IA 2022

L'AFIA et l'IMT organisent une 2ème journée INTERNET DES OBJETS et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème de l'INTEGRATION DES MODELES ET TECHNOLOGIES.

Cette journée Internet des Objets et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2022 (PFIA 2022).

Date et Lieu

- Date : 27 juin 2022
- Lieu : Espace Fauriel, Le Corbusier 5, 23 rue Pierre et Dominique Ponchardier, 42100 Saint-Etienne

Programme

- 09h00 « Visualisation de l'information adaptée au monitoring d'un processus industriel » par Elodie Toufaili (*Berger-Levrault Lyon*), Y. Miloudi et Ch. Bortolaso.
- 09h30 « Visualisation Node-RED des données sémantiques des capteurs de bâtiments » par Ghislain Atemezing (*Mondeca Paris*), Y. Gripay, S. Servigne, et F. Laforest.
- 10h00 Pause-café
- 10h30 « WildCount » par Didier Donsez (*U. Grenoble*).
- 10h50 « Approches légères pour une solution de maison intelligente pour personnes âgées » par Sara Kebir (*U. Artois*), C. Carra, et K. Tabia.
- 11h10 « Gestion prédictive embarquée et frugale pour le bâtiment intelligent » par Louis Closson (*U. Grenoble*).
- 11h30 « Jumeau Numérique de l'Espace Fauriel » par Maxime Lefrançois (*EMSE Saint-Etienne*).
- 12h00 Déjeuner
- 13h30 « Détecter des situations médicales d'importance en utilisant le Stream Reasoning sur des données issues de l'IoT » par Mathieu Bourgais (*INSA Rouen*), F. Giustozzi et L. Vercouter.
- 13h50 « Développement de nouvelles stratégies de monitoring grâce à une approche Massive IoT » par Gwen Maudet (*IMT Nantes*), M. Batton-Hubert, P. Maille et L. Toutain.
- 14h30 Pause
- 15h45 « Un langage dédié au domaine du Web Sémantique des objets contraints » par Fatma-Zohra Hannou (*EMSE Saint-Etienne*).
- 15h05 « LiRoT » par Alexandre Bento (*INSA Lyon*), L. Médini, K. Singh et F. Laforest.
- 15h25 « Une plateforme d'apprentissage fédéré pour IoT » par Hamza Safri (*Berger-Levrault Toulouse*), M. Kandi, Y. Miloudi, Ch. Bortolaso, D. Trystram, et F. Desprez.
- 15h45 « Détection d'intrusions fédérée et semi-supervisée pour l'IoT » par Ons Aouedi (*U. Nantes*), K. Piamrat, G. Muller et K. Singh
- 16h15 Pause-café
- 16h45 « The Data Uncertainty Principle » par Leonardo Linguaglossa (*Telecom Paris*)

Organisation

Cet événement est organisé par Patrick Albers pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Olivier Boissier pour l'IMT.

Inscriptions

Les inscriptions sont à effectuer sur le site : https://ci.mines-stetienne.fr/pfia2022/infos-locales/inscriptions/

Santé & IA 2022

L'AFIA et AIM organisent une sixième journée commune INFORMATIQUE MEDICALE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

La journée a pour objectif de faire un point sur les travaux menés actuellement en ingénierie des connaissances dans le domaine de la santé. Un intérêt particulier est porté aux approches permettant de prendre en compte l'incertitude et la complexité des données de santé en alliant des algorithmes d'apprentissage et des méthodes fondées sur les connaissances.

Cette journée Santé et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2022 (PFIA 2022).

Date et Lieu

- Date : 28 juin 2022
- Lieu : Espace Fauriel, Le Corbusier 5, 23 rue Pierre et Dominique Ponchardier, 42100 Saint-Etienne

Programme

- 09h00 Conférence invitée de Gaël Dias (*U. Caen-Normandie*)
- 10h00 Pause-café
- 10h30 « Conceptions de phénotypes computationnels pour la recherche en santé publique » par Pegdwendé Sawadogo (*AP-HP Paris*), Thomas Guyet, et Etienne Audureau.
- 10h50 « Combiner plongements de graphes et clustering pour l'alignement de connaissances pharmacogénomiques » par Pierre Monnin (*Mines Nancy*), Cheddy Raïssi, Amedeo Napoli et Adrien Coulet.
- 11h15 « Intégration continue et architecture à base de containers pour exposer un modèle d'apprentissage profond comme un service » par Théophile Tiffet (*CHU Saint-Etienne*), Guillaume Guerdoux, et Cédric Bousquet
- 11h35 « Facial movement assessment based on anomaly detection » par Eder Alejandro Rodriguez Martinez (*U. Picardie*), Olga Polezhaeva, Félix Marcellin, Emilien Colin, Lisa Boyaval, François-Régis Sarhan et Stéphanie Dakpe.
- 12h00 Déjeuner
- 13h30 Conférence invitée de Gilles Dequen (*U. Picardie*)
- 14h30 Pause
- 16h15 Pause-café
- 16h45 [Départ en bus depuis le cours Fauriel] Visite de la plateforme #FutureMedicine du Centre ingénierie et Santé des Mines de Saint-Etienne.

Organisation

Cet événement est organisé par Fleur Mougin pour le Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances (SIC) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Lina Soualmia pour l'AIM.

Inscriptions

Les inscriptions sont à effectuer sur le site : https://ci.mines-stetienne.fr/pfia2022/infos-locales/inscriptions/

EIAH & IA 2022

L'AFIA et l'ATIEF organisent une quatrième journée ENVIRONNEMENTS INFORMATIQUES POUR L'APPRENTISSAGE HUMAIN & INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème des SYSTEMES DE RECOMMANDATION POUR L'EDUCATION.

L'objectif de cette journée est de rassembler les chercheurs issus des communautés de l'Intelligence Artificielle et des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain pour échanger autour de problématiques, concepts et techniques communs. La journée est composée d'une session de présentation de travaux sur le thème de la recommandation pour l'éducation, et d'une session plus générale sur les interactions entre IA et éducation. Ces sessions seront agrémentées d'une conférence invitée sur les liens et les questions de recherche qui existent entre ces deux communautés.

Cette journée EIAH et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2022 (PFIA 2022).

Date et Lieu

- Date : 29 juin 2022
- Lieu : Espace Fauriel, Le Corbusier 1, 23 rue Pierre et Dominique Ponchardier, 42100 Saint-Etienne

Programme

- 10h30 « Un survol de la modélisation de l'expertise et du défi de l'évaluer dans un contexte ouvert » par Michel Desmarais (*Ecole Polytechnique de Montréal*)
- 12h00 Déjeuner
- 13h30 « Fairness et confidentialité en IA pour l'éducation : risques et opportunités » par Jill Jênn Vie (*Inria Palaiseau*)
- 14h30 Pause
- 14h45 « Essai de prédiction de la réussite à un exercice de programmation » par Maxime Bouton (*Université de Lille*), Marielle Léonard, Yvan Peter, et Nour El Mawas.
- 15h15 « Vers une Approche éthique pour la prédiction automatique du risque d'échec scolaire » par Fahima Djelil (*IMT Brest*) et Jean-Marie Gilliot.
- 15h45 « Repenser la recommandation pour élaborer des Territoires Informatiques d'Apprentissage Humain (TIAH) » par Florian Marchal-Bornert (*U. Lorraine*), Samuel Nowakowwski, Mourad Rabah et Ronan Champagnat.
- 16h15 Pause-café
- 16h45 « Comparaison de l'utilisation d'un référentiel standard et d'un référentiel interne pour la recommandation d'objets d'apprentissage » par Molka Tounsi Dhouib (*U. Côte d'Azur*) et Catherine Faron.
- 17h30 Discussion avec les participants

Organisation

Cet événement est organisé par Marie Lefevre pour le Collège Interaction avec l'Humain (I&H) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Jean-Marie Gilliot pour l'ATIEF.

Inscriptions

Les inscriptions sont à effectuer sur le site : https://ci.mines-stetienne.fr/pfia2022/infos-locales/inscriptions/

Résilience & IA 2022

L'AFIA et l'IMT organisent une 1ère journée commune RESILIENCE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

Cette journée a pour objectif de faire un point sur les travaux menés sur la gestion de crise et la sortie de crise, communément appelé résilience, avec l'appui du traitement des données, de l'information et du Big Data. Outre le constat souvent appuyé sur des chiffres d'une crise ou d'un dysfonctionnement, les sorties de crise et de situations difficiles imposent la collecte et un traitement efficace des données pour une meilleure prise de décision traduite par des politiques de développement, de mise en place des outils, des réponses précises. Des techniques d'Intelligence Artificielle peuvent ou pourraient aider à la résilience. Il serait aussi intéressant de voir pour des situations précises quelles sont données massives ou non qui sont à disposition et des désidératas en termes des connaissances à extraire.

Cette journée Résilience et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2022 (PFIA 2022).

Date et Lieu

- Date : 29 juin 2022
- Lieu : EMSE, Amphi A1.04, 29 rue Pierre et Dominique Ponchardier, 42100 Saint-Etienne

Programme

- 09h00 « La résilience selon la théorie de la viabilité» par Guillaume Deffuant (*IRSTEA Aubière*)
- 10h00 Pause-café
- 10h30 « Annotation sémantique pour la géolocalisation d'entités spatiales dans des tweets » par Gaëtan Caillaut (*BRGM Orléans*), Cécile Gracianne, Samuel Auclair, Nathalie Abadie et Guillaume Touya.
- 11h00 « Méthodologies pour la résilience de l'intelligence artificielle » par Mathilde Jay (*U. Grenoble Alpes*), Laurent Lefevre et Denis Trystram.
- 11h30 « Transport Network Design Based on Origin/Destination Clustering During the COVID-19 Pandemic Use Case » par Matthieu Guillot (*IFSTTAR Bron*), Angelo Furno, El-Houssaine Aghezzaf et Nour-Eddin El.
- 12h00 Déjeuner
- 14h45 Panel avec les présentateurs et les inscrits autour des apports pratiques de l'IA dans la résilience.

Organisation

Cet événement est organisé par Ghislain Atemezing pour le Collège Industriel (CI) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Mihaela Juganaru pour l'IMT.

Inscriptions

Les inscriptions sont à effectuer sur le site : https://ci.mines-stetienne.fr/pfia2022/infos-locales/inscriptions/

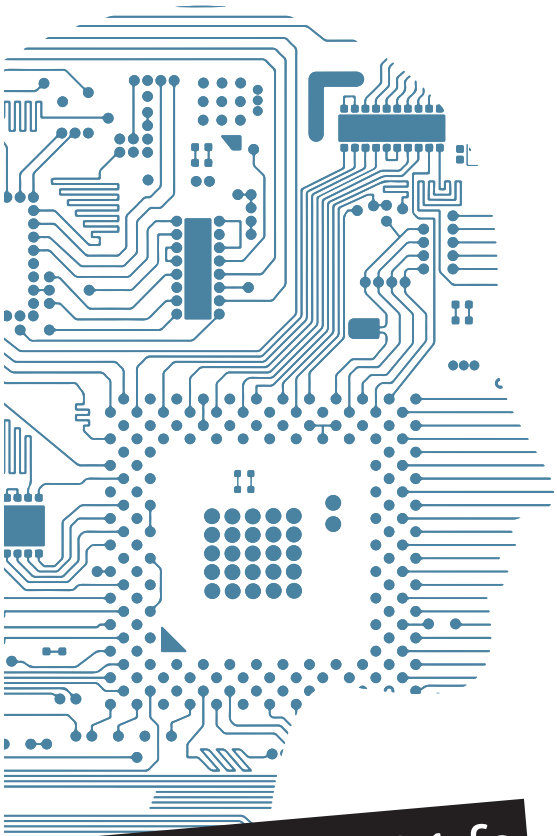
BORDEAUX 2021

Rencontre annuelle de la communauté Intelligence Artificielle

28 juin • 2 juillet

à l'Enseirb - Matmeca

autour de conférences
et ateliers thématiques

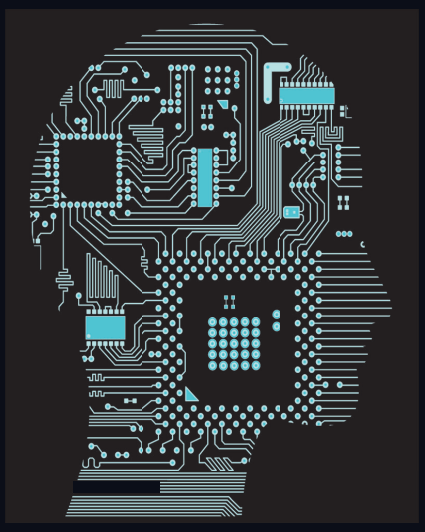


www.pfia2021.fr

- Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA)
- Conférence Nationale sur l'Intelligence Artificielle (CNIA)
- Ingénierie des Connaissances (IC)
- Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale (JIAF)
- Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage (JFPDA)
- Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)
- Rencontre des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA)
- Journées thématiques pluridisciplinaires (Défense & IA, Santé & IA, Jeux & IA)
- Evénements organisés par les collèges de l'AFIA
- Journées IA en Nouvelle-Aquitaine
- Tutoriels

Mars 2021 - université de Bordeaux

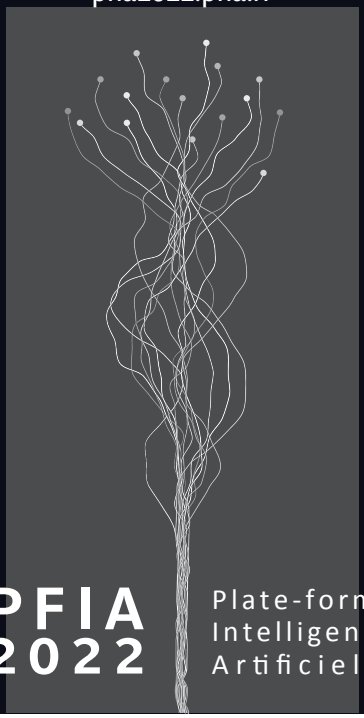
La rencontre annuelle
de la communauté Intelligence Artificielle
autour de conférences et ateliers thématiques



SAINT-ÉTIENNE

27 juin - 1er juillet 2022

pfia2022.pfia.fr



PFIA 2022

Plate-forme
Intelligence
Artificielle

PROGRAMME

- Conférence Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle
- Conférence Nationale en Intelligence Artificielle
- Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances
- Journées Francophone de Programmation par Contraintes
- Journée Francophone sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage
- Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents
- Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale
- Rencontre des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle
- Tutoriels
- Journée thématique ElAH et lA
- Journée thématique loT et lA
- Journée thématique Résilience et lA
- Journée thématique Santé et lA
- lA dans le tissu industriel local

En partenariat avec