Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2021

Olivier Boissier, Zied Bouraoui, Stephan Brunessaux, Sylvie Doutre, Jean-Paul Jamont, Abir Karami, Maxime Lefrançois, Céline Rouveirol, François Schartzentruber, Yves Demazeau, et al.

▶ **To cite this version:**

Olivier Boissier, Zied Bouraoui, Stephan Brunessaux, Sylvie Doutre, Jean-Paul Jamont, et al.. Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2021. Association Française pour l'Intelligence Artificielle, 2021. ⟨hal-03353852⟩

HAL Id: hal-03353852

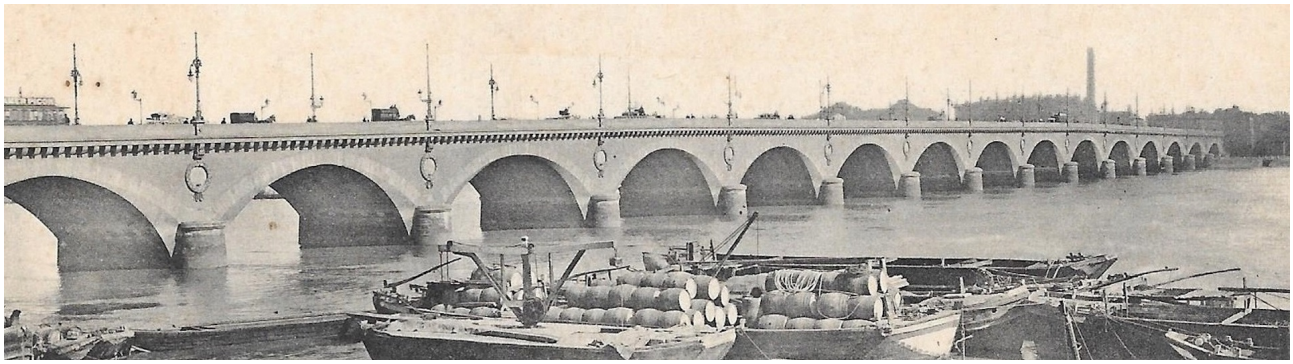
https://hal.science/hal-03353852v1

Submitted on 24 Sep 2021

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.

HAL Authorization



Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2021

Sections Spéciales
Olivier Boissier
Zied Bouraoui
Stephan Brunessaux
Sylvie Doutre
Jean-Paul Jamont
Abir Karami
Maxime Lefrançois
Céline Rouveirol
François Schartzentruber

Coordination AFIA
Yves Demazeau
Thomas Guyet
Dominique Longin
Frédéric Maris

AfIA
Association française pour l'Intelligence Artificielle

Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2021

Actes CNIA 2021

Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle

Éditeurs : Président(e)s des CP de CNIA 2021

Table des matières

Mot des Présidents.
Bordeaux, au cœur de l'Intelligence Artificielle de demain 5

Comités.
Comités 2021 de programmation, de programme, et d'organisation 7

Partenaires.
Partenaires PFIA 2021 15

E. Amdouni, C. Jonquet (IC).
Une méthodologie et un outil d'évaluation du niveau de 'FAIRness' pour les ressources sémantiques : le cas d'AgroPortal 17

A. Audic, L. Thevin (RJCIA).
COrHA : Architecture multi-agent pour la collaboration Utilisateurs-Objets connectés dans une tâche en domotique 27

S. Beaussant, S. Lengagne, B. Thuilot, O. Stasse (RJCIA).
Delay Aware Universal Notice Network : Real world multi-robot transfer learning 35

P. Bernabé, A. Gotlieb, B. Legeard, F. Olaf Sem-Jacobsen, H. Spieker (APIA).
Apprentissage auto-supervisé pour la détection d'actions illégales lors de la surveillance du trafic maritime 43

M. Bettinelli, M. Occello, D. Genthial (JFSMA).
ABSG : un modèle d'agent socialement inspiré pour la formation de coalitions 53

A. Bonnefond, O. Simonin, I. Guerin-Lassous (JFSMA).
Modèles de Flocking adaptés aux environnements avec obstacles et communications dégradées 61

G. Bourguin, A. Lewandowski, M. Bouneffa, A. Ahmad (IC).
Vers des classifieurs ontologiquement explicables 69

J. Cárdenas Chapellín, C. Denis, H. Mousannif, C. Camerlynck, N. Florsch (CNIA).
Réseaux de neurones convolutifs pour la caractérisation d'anomalies magnétiques 79

R. Chaput, J. Duval, O. Boissier, M. Guilermin, S. Hassas (JFSMA).
Approche multi-agent combinant raisonnement et apprentissage pour un comportement éthique 87

T. Dalmonte, C. Grellois, N. Olivetti (JIAF).
Systèmes de preuve pour les logiques de "Bringing-it-About" 95

J.-P. Delahaye, P. Mathieu (JFSMA).
Attracteurs étranges au dilemme itéré du prisonnier 103

H. Fargier, P. Jourdan, R. Sabbadin (CNIA).
Trouver un équilibre de Nash mixte algébrique dans les jeux sous forme normale et succincts 111

H. Fargier, P. Jourdan, R. Sabbadin (RJCIA).
Jeux bayésiens hypergraphiques 119

J. Ferry, U. Aïvodji, S. Gambs, M.-J. Huguet, M. Siala (RJCIA).
Améliorer la généralisation de l'équité en apprentissage grâce à l'Optimisation Distributionnellement Robuste 127

J. Mattioli, F. Terrier, L. Cantat, R. Gelin, J. Chiaroni, Y. Bonhomme, H. Amadou-Boubacar, E. Escorihuela, S. Picard, C. Alix (APIA).
IA de confiance : condition nécessaire pour le déploiement de l'IA dans les systèmes critiques 131

F. Michel, F. Gandon, V. Ah-Kane, A. Bobasheva, E. Cabrio, O. Corby, R. Gazzotti, A. Giboin, S. Marro, T. Mayer, M. Simon, S. Villata, M. Wincker (IC).
Covid-on-the-Web : graphe de connaissances et services pour faire progresser la recherche sur la COVID-19 139

G. Picard, C. Caron, J.-L. Farges, J. Guerra, C. Pralet, S. Roussel (APIA).
Défis ouverts aux systèmes multi-agents dans le cadre des constellations de satellites d'observation de la Terre 149

G. Picard (JFSMA).
Planification multi-utilisateurs de tâches d'observation dans des constellations de satellites avec portions d'orbites exclusives 159

S. Scheck, A. Niveau, B. Zanuttini (JFPDA).
Explicit Representations of Persistency for Propositional Action Theories 167

C. Tessier (CNIA).
Éthique et IA : analyse et discussion 175

Bordeaux, au cœur de l'Intelligence Artificielle de demain

Benoit Le Blanc, Fleur Mougin, Nicolas Roussel, Laurent Simon
Professeur Bordeaux INP, Maître de Conférence U. Bordeaux, DR INRIA, Professeur Bordeaux INP
Co-Présidents du Comité d'Organisation de la Plate-Forme IA 2021

Yves Demazeau, Thomas Guyet, Frédéric Maris
DR CNRS, Maître de Conférence Agrocampus Ouest, Maître de Conférence U. Toulouse 3
Co-Présidents du Comité de Programmation de la Plate-Forme IA 2021

L'AFIA, Bordeaux INP, U. Bordeaux et INRIA Bordeaux Sud-Ouest s'associent pour organiser du 28 juin au 02 juillet 2021 la quatorzième Plate-Forme Intelligence Artificielle (PFIA 2021). 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) et Angers (2020).

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 2021, la Plate-Forme IA héberge, les conférences et journées …

APIA	7e Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'IA
CNIA	24e Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle, dont :
France @ International	Présentation d'articles français acceptés à AAAI, IJCAI, PRICAI 2021
IC	32e Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances
JFPDA	16e Journées Francophone Planification, Décision et Apprentissage
JFSMA	29e Journées Francophones sur les Système Multi-Agents
JIAF	15e Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale
RJCIA	19e Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle
Défense et IA	1e Journée Internet des Objets et IA, en partenariat avec l'ONERA
Jeux et IA	3e Journée Jeux Interactifs et IA, en partenariat avec le GdR IA du CNRS
Santé et IA	5e Journée Informatique Médicale et IA, en partenariat avec l'AIM

… ainsi que six tutoriels sur les thèmes : apprentissage automatique causal, fouille de données déclarative, information algorithmique, planification multi-agent, programmation multi-agent, *reservoir computing*.

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

Justine Cassell	INRIA Paris	France
Erwan Lecarpentier	ISAE-SUPAERO Toulouse	France
Paulo Leitao	Instituto Politécnico de Bragança	Portugal
Ann Nowe	Vrije Universiteit Brussel	België
Stuart Russell	University of California at Berkeley	USA
Steven Schockaert	Cardiff University	UK
Elena Simperl	King's College London	UK
Manuela Veloso	JP Morgan AI Research New York	USA

Les inscriptions à tout ou partie des évènements hébergés à PFIA 2021 sont gratuites mais obligatoires, à réaliser sur : https://pfia2021.fr/inscriptions/.

Nous remercions les présidents de comités de programme des conférences et journées hébergées, les membres de leurs comités de programme, 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 2021 (https://pfia2021.fr/) dont le contenu sera maintenu jusqu'à l'été 2025.

©AFIA2021

Comité de programmation

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

Président

— Yves DEMAZEAU, LIG, CNRS

Membres

— Thomas GUYET, LOCADAM, IRISA
— Frédéric MARIS, IRIT, Université Toulouse 3 Paul Sabatier

Comités de programme

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

Présidents

— Stéphan Brunessaux (Airbus)
— Céline Rouveirol (Université Sorbonne Paris Nord)

Membres

— Florence d'Alché-Buc (Telecom Paris)
— Florence Amardeilh (Elzeard)
— Ghislain Atemezing (Mondeca)
— Alain Berger (Ardans)
— Sandra Bringay (LIRMM)
— Stéphane Canu (INSA Rouen)
— Caroline Chopinaud (Hub France IA)
— Yves Demazeau (LIG)
— Christian de Sainte Marie (IBM)
— Valentina Dragos (Onera)
— Yannick Esteve (LIA)
— Fraçoise Fogelman Soulie (Hub France IA)
— Christophe Guettier (Safran)
— Céline Hudelot (Ecole Centrale Paris)
— Arnault Ioualalen (Numalis)
— Arnault Lallouet (Huawei)
— Christine Largouët (IRISA)
— Vincent Lemaire (Orange Labs)
— 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)
— Philippe Morignot (ASPERTISE)
— Jean Rohmer (ESILV)
— Marie Christine Rousset (Université Grenoble Alpes)
— Frédérique Segond (INRIA)
— Brigitte Trousse (INRIA)

©AFIA2021

Conférence Nationale en Intelligence Artificielle (CNIA)

Président

— Olivier Boissier, MINES Saint-Étienne, LIMOS

Membres

— Isabelle Bloch, Sorbonne Université, CNRS, LIP6
— Grégory Bonnet, Université de Caen Normandie
— Elise Bonzon, Université de Paris
— Pierre-Antoine Champin, LIRIS, Université Claude Bernard Lyon1
— François Charpillet, Inria Nancy - Grand Est, LORIA
— Sylvie Coste-Marquis, CRIL - CNRS
— Benjamin Dalmas, Mines Saint-Etienne, LIMOS
— Mohamed Daoudi, IMT Lille Douai
— Yves Demazeau, LIG - CNRS
— Arnaud Doniec, IMT Lille Douai
— Helene Fargier, IRIT-CNRS
— Jean-Gabriel Ganascia, Pierre and Marie Curie University - LIP6
— Salima Hassas, Université Claude Bernard-Lyon1
— Nathalie Hernandez, IRIT
— Nicolas Lachiche, University of Strasbourg
— Florence Le Ber, icube
— Marie-Jeanne Lesot, Sorbonne Université - LIP6
— Christophe Marsala, Universite Pierre et Marie Curie - Paris 6
— Engelbert Mephu Nguifo, University Clermont Auvergne - LIMOS - CNRS
— Fabrice Muhlenbach, Laboratoire Hubert-Curien - Université de Saint-Étienne
— Odile Papini, Aix-Marseille Université
— Sylvain Pogodalla, LORIA/INRIA Lorraine
— Catherine Roussey, INRAE
— Olivier Simonin, INSA de Lyon CITI-Inria Lab.
— Catherine Tessier, Onera-DCSD
— Laurent Vercouter, LITIS lab, INSA de Rouen
— Bruno Zanuttini GREYC, Normandie Univ. UNICAEN, CNRS, ENSICAEN

Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC)

Président

— Maxime Lefrançois - MINES Saint-Étienne

Membres

— Marie-Hélène Abel - Université de technologie de Compiègne
— Xavier Aimé - Cogsonomy
— Yamine Ait-Ameur - Toulouse INP/IRIT
— Nathalie Aussenac-Gilles - CNRS/IRIT
— Bruno Bachimont - University de technologie de Compiègne
— Jean-Paul Barthès - Université de technologie de Compiègne
— Nacera Bennacer - CentraleSupélec
— Mahdi Bennara - MINES Saint-Étienne
— Sandra Bringay - LIRMM
— Patrice Buche - INRAe
— Davide Buscaldi - École Polytechnique
— Sylvie Calabretto - INSA de Lyon
— Gaoussou Camara - University Alioune Diop Bambey in Senegal
— Pierre-Antoine Champin - ERCIM
— Jean Charlet - Assistance Publique hôpitaux de Paris
— Victor Charpenay - MINES Saint-Étienne
— Olivier Corby - Université Côte d'Azur
— Sylvie Despres - Paris 13
— Gilles Falquet - University of Geneva, Switzerland

— Catherine Faron - Université Côte d'Azur
— Cécile Favre - Université Lyon 2
— Béatrice Fuchs - Université Lyon 3
— Frederic Furst - Université de Picardie
— Alban Gaignard - CNRS
— Jean-Gabriel Ganascia - LIP6
— Alain Giboin - Inria
— Ollivier Haemmerlé - Université Toulouse 2 Jean Jaurès/IRIT
— Mounira Harzallah - Université de Nantes
— Nathalie Hernandez - Université Toulouse 2 Jean Jaurès/IRIT
— Liliana Ibanescu - Agro Paris Tech
— Sébastien Iksal - Le Mans Université
— Antoine Isaac - Europeana
— Clement Jonquet - UNi
— Mouna Kamel - Institut de Recherche en Informatique de Toulouse
— 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
— Amedeo Napoli - LORIA Nancy
— Jérôme Nobécourt - Université Paris 13
— Nathalie Pernelle - LIPN, Université Sorbonne Paris Nord
— Yannick Prié - Université de Nantes
— Cedric Pruski - Université Paris Sud
— Sylvie Ranwez - IMT Mines Ales
— Catherine Roussey - INRAe
— Fatiha Saïs - LRI
— Pascal Salembier - UTT
— Karim Sehaba - LIRIS, CNRS
— Nathalie Souf - Université Toulouse 3 Paul Sabatier/IRIT
— Konstantin Todorov - LIRMM, Université de Montpellier, CNRS
— Raphael Troncy - Eurecom
— Haïfa Zargayouna - Université Sorbonne Paris Nord

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

Président
— François Schwarzentruber (ENS Rennes, IRISA)

Membres
— Olivier Buffet (LORIA, INRIA)
— Alain Dutech (LORIA, INRIA)
— Humbert Fiorino (LIG, Grenoble)
— Andreas Herzig (CNRS, IRIT, Université de Toulouse)
— Jérôme Lang (CNRS LAMSADE, Université Paris-Dauphine)
— Frédéric Maris (Université Toulouse 3 Paul Sabatier, IRIT)
— Laetitia Matignon (LIRIS CNRS)
— Alexandre Niveau (GREYC, Université de Normandie)
— Damien Pellier (LIG, Grenoble)
— Sophie Pinchinat (IRISA, Rennes)
— Cédric Pralet (ONERA, Toulouse)
— Philippe Preux (Université de Lille)

— Emmanuel Rachelson (ISAE-SUPAERO)
— Régis Sabbadin (INRA)
— Abdallah Saffidine (The University of New South Wales)
— Olivier Sigaud (ISIR, UPMC)
— Florent Teichteil-Königsbuch (Airbus Central Resaerch & Technology)
— Vincent Thomas (LORIA, Nancy)
— Paul Weng (UM-SJTU Joint Institute)
— Bruno Zanuttini (GREYC, Normandie Univ. ; UNICAEN, CNRS, ENSICAEN)

Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)

Président
— Jean-Paul Jamont (LCIS, Université Grenoble Alpes, France)

Comité consultatif
— Catherine Garbay (LIG, CNRS, 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
— Emmanuel Adam (LAMIH, Université Polytechnique Hauts-De-France, France)
— Carole Adam (LIG, CNRS, Université Grenoble Alpes, France)
— Flavien Balbo (Limos, Ecole des Mines de Saint-Etienne, France)
— Aurélie Beynier (LIP6, Université Pierre et Marie Curie, France)
— Olivier Boissier (Limos, Ecole des Mines de Saint-Etienne, France)
— Grégory Bonnet (GREYC, Université Caen Normandie, France)
— Valérie Camps (IRIT, Université Paul Sabatier de Toulouse, France)
— 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)
— Stéphane Galland (CIAD, Université de Technologie Belfort-Montbéliard, France)
— 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 Evry Val d'Essone, France)
— Jean-Paul Jamont (LCIS, Université Grenoble Alpes, France)
— Elsy Kaddoum (IRIT, Université Toulouse Jean Jaurès, 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, Univ Montpellier, France)
— Antoine Nongaillard (CRISTAL, Université de Lille, France)
— Michel Occello (LCIS, Univ. Grenoble Alpes, France)
— Wassila Ouerdane (MICS, École CentraleSupélec, France)
— Alexandre Pauchet (LITIS, INSA Rouen Normandie, France)

— Denis Payet (LIM, Université de la Réunion, 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 CentraleSupélec, France)
— Patrick Taillandier (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)

Présidents
— Zied Bouraoui (CRIL, Université d'Artois & CNRS)
— Sylvie Doutre (IRIT, Université Toulouse 1 Capitole)

Membres
— Francesco Belardinelli (IBISC, Université d'Évry)
— Elise Bonzon (LIPADE, Université Paris Descartes)
— Tristan Cazenave (LAMSADE, Université Paris Dauphine)
— Nadia Creignou (LIS, Aix-Marseille Université)
— Tiago de Lima (CRIL, Université de Lens)
— Jérôme Euzenat (LIG, INRIA)
— George Katsirelos (MIAT, INRA)
— Sébastien Konieczny (CRIL, CNRS)
— Jean Lieber (LORIA, INRIA)
— Pierre Marquis (CRIL, Université d'Artois)
— Marie-Laure Mugnier (LIRMM, Université de Montpellier)
— Amedeo Napoli (LORIA, CNRS)
— Odile Papini (LIS, Aix-Marseille Université)
— Meltem Öztürk (LAMSADE, Université Paris Dauphine)
— 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
— Abir Karami - Université Catholique de Lille

Membres
— Grégory Bonnet - Université de Caen Normandie
— Zied Bouraoui - Université d'Artois
— Olivier Champalle - Université Paris Est
— Mathieu Chollet - IMT Atlantique
— Anthony Fleury - IMT Lille Douai
— Emmanuelle Grislin - Universite de Valenciennes
— Julie Jacques - Université Catholique de Lille
— Alexis Lebis - IMT Lille Douai
— Guillaume Lozenguez - IMT Lille Douai
— Jean-Guy Mailly - Université de Paris Descartes

— Laetitia Matignon - Université de Lyon 1
— Anastasia Paparrizou - Université d'Artois
— Alexandre Pauchet - INSA Rouen
— Karim Sehaba - Université Lumière Lyon 2
— Nicolas Verstaevel - Université Toulouse 1 Capitole

Comité d'organisation

Université de Bordeaux, Bordeaux INP & INRIA

Présidents

— Benoît Le Blanc, ENSC, Bordeaux INP
— Fleur Mougin, BPH-Inserm U1219, Université de Bordeaux
— Nicolas Roussel, Inria
— Laurent Simon, LaBRI, Bordeaux INP

Gestion administrative

— Chrystelle Chardron, ENSC, Bordeaux INP
— Marie Sanchez, Inria
— Isabelle Sesé, ENSC, Bordeaux INP

Membres

(PFIA 2021 ayant été virtualisée, il n'a pas été fait appel à d'autres personnes pour l'organisation.)

©AFIA2021

AfIA
Association française pour l'Intelligence Artificielle

Bordeaux INP AQUITAINE

Inria

université de BORDEAUX

Les partenaires de PFIA 2021

Partenaires « Or »

MICHELIN

SOCIETE GENERALE

JELLYSMACK

probayes
L'IA sur-mesure

ENGIE Lab

Institut Mines-Télécom

Partenaires « Argent »

MIAI Grenoble Alpes
Multidisciplinary Institute In Artificial Intelligence

mnemotix
Donnons du sens à vos données

SOLVAY
Progress beyond

Partenaires « Bronze »

nexter A COMPANY OF KNDS

ARDANS
Knowledge Consulting & Software Solutions

Pacte|Novation

SNCF

LaBRI

Département de recherche Santé publique / université de BORDEAUX

Skopai
Deep Tech Insights

©AFIA2021

Une méthodologie et un outil d'évaluation du niveau de " FAIRness " pour les ressources sémantiques : le cas d'AgroPortal

Emna Amdouni[1] et Clément Jonquet[1,2]

[1] LIRMM, Univ. de Montpellier, CNRS, France

[2] MISTEA, Univ. de Montpellier, INRAE, Institut Agro, France

emna.amdouni@lirmm.fr et jonquet@lirmm.fr

Résumé

Les principes "FAIR" définissent un ensemble de caractéristiques que les données et leurs métadonnées devraient présenter pour être Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables. Également, suivant le principe I2, une ontologie, et plus généralement une ressource sémantique, devrait aussi être "FAIR". Des critères spécifiques aux ontologies commencent à apparaître, mais il n'existe toujours pas de mécanismes pour évaluer le degré de mise en œuvre de ces principes. Nous proposons une approche d'évaluation automatique du niveau de "FAIRness" d'une ontologie qui se base sur une représentation riche et structurée des métadonnées. Nous nous reposons sur le modèle de métadonnées MOD et avons développé un prototype pour AgroPortal, un portail de ressources sémantiques et d'ontologies en agronomie.

Mots-clés

Science ouverte, principes FAIR, FAIRness, ontologies, ressources sémantiques, portail d'ontologies, AgroPortal

Abstract

The "FAIR" principles define a set of characteristics data and their metadata should respect in order to be Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable. Per principle I2, an ontology, and more generally a semantic resource, should also be FAIR. Ontology-specific criteria begin to emerge, but there is still no mechanism to assess the degree of implementation of these principles. We propose an automatic evaluation method of the level of "FAIRness" of an ontology which is based on a rich and structured representation of the metadata. We rely on the MOD metadata model and have developed a prototype for AgroPortal, a repository of semantic resources and ontologies in agronomy.

Keywords

Open science, FAIR principles, FAIRness, ontologies, semantic resources, ontology repository, AgroPortal

1 Introduction

En 2014, un groupe de chercheurs et d'éditeurs (appelé FORCE 11) a établi des principes de création et de partage des données scientifiques afin de favoriser leur exploitation et leur réutilisation d'une manière automatique entre autres via le Web. Ces principes sont introduits sous le nom de FAIR (acronyme de Findable, Accessible, Interoperable et Reusable). Chacun des quatre principes FAIR décrit un ensemble de caractéristiques génériques que les données (et leurs métadonnées) devraient avoir mais ils ne précisent pas, ni ne préconisent, les mécanismes de mise en œuvre [1], [2].

Ci-après, nous présentons brièvement la signification de chaque aspect F-A-I-R : Premièrement, nous parlons de données *faciles à trouver* lorsqu'elles sont suffisamment décrites avec des métadonnées et hébergées ou indexées dans une librairie ou un portail accessible ouvertement. La mise en œuvre de ce principe implique que les données, métadonnées et autres ressources doivent avoir un identifiant unique et persistant qui les rend trouvables et référençables par les humains et les machines. Deuxièmement, les données sont considérées comme *accessibles* lorsque les utilisateurs peuvent les consulter à l'aide d'un protocole ouvert et universellement implémentable. Mais cela ne signifie pas que les données doivent être librement ouvertes sans restrictions. Parfois, les données peuvent être "FAIR" et non ouvertes. En d'autres termes, les données FAIR doivent être associées à des métadonnées qui spécifient les conditions dans lesquelles les données sont accessibles. Troisièmement, les données sont *interopérables* lorsque n'importe quel utilisateur peut facilement et d'une manière standardisée, les traiter sans avoir recours à une chaîne de traitement spécifique. Les sous-principes I peuvent être considérés comme les plus difficiles à réaliser et les plus importants pour être FAIR. Plus spécifiquement, ils indiquent que les données et les métadonnées doivent être représentées dans un langage formel, accessible, partagé et générique pour la représentation des connaissances. De plus, ces données doivent elles-mêmes utiliser des vocabulaires ou ontologies FAIR et inclure des références qualifiées à d'autres données et métadonnées. Il est clair que le Web sémantique et les technologies de données liées ont été identifiés parmi les meilleurs candidats à utiliser pour la représentation des connaissances, la lisibilité par machine et l'interopérabilité sur le Web, mais les principes FAIR ne peuvent pas être réduits au Web sémantique [3]. Enfin, les données sont *réutilisables* lorsqu'elles sont fournies avec des informations claires sur la licence et l'utilisation des données pour les humains et les machines. Elles doivent également être associées à des métadonnées et à une documentation riche qui détaillent leur provenance (spécifications des données, financement, cas d'utilisation, versions, processus expérimentaux, etc.).

Les principes FAIR sont décrits à un niveau générique et leur

©AFIA2021

mise en œuvre a volontairement été mise de côté au début. Cependant, avec le succès de la démarche, cette question d'implémentation des principes FAIR est devenue très importante, et elle doit se décliner au cas par cas pour chaque type d'objet digital. En Europe, par exemple, la mise en œuvre des principes FAIR est réalisée, en partie, par le programme European Open Science Cloud (https://eosc-portal.eu) de la Commission européenne, en particulier par le groupe d'experts sur les données FAIR. L'initiative GO FAIR (www.go-fair.org) a également pour objectif de favoriser l'adoption des principes FAIR, notamment via la description et l'élaboration de profils de mise en œuvre ("FAIR Implementation Profile") et le déploiement de serveur d'accès aux données ("FAIR Data Points"). Parmi d'autres initiatives internationales qui encouragent l'adoption des principes FAIR, nous pouvons citer : le programme américain NIH Data Commons (https://commonfund.nih.gov/commons), la Research Data Alliance (www.rd-alliance.org), plusieurs projets H2020 dont FAIRsFAIR (www.fairsfair.eu), et des initiatives communautaires telles que le Food System GO FAIR Implementation Network (www.foosin.fr).

Bien que la vision FAIR soit largement reconnue par plusieurs initiatives internationales et que les ontologies soient considérées comme un élément clé pour rendre les données FAIR, à ce jour il n'existe toujours pas de mécanisme, ni d'outil d'évaluation du niveau de "FAIRness" pour les ressources sémantiques. En effet, aucun des travaux existants dans la littérature n'a réussi à définir une approche de FAIRness claire et complète qui couvre à la fois les aspects méthodologiques et techniques associés aux ressources sémantiques. Pour toutes ces raisons, nous présentons ici le développement d'une méthodologie et d'un outil, très fortement inspiré de l'état de l'art actuel, pour l'évaluation du degré de mise en œuvre – nous parlerons aussi de niveau de "*FAIRness*" ou "*FAIRness assessment*" – des principes FAIR pour les ressources sémantiques. Notre approche se base sur une représentation riche et structurée des métadonnées d'une ontologie.[1] Nous nous basons sur le modèle de métadonnées MOD (voir Section 3) qui en amont a identifié les vocabulaires de métadonnées (et les propriétés définies dans ces vocabulaires) pour les ontologies. Nous avons développé un prototype de FAIRness assessment pour AgroPortal (http://agroportal.lirmm.fr) un portail pour les ressources sémantiques et les ontologies en agronomie [7].

L'article est structuré comme suit : la Section 2 présente l'état de l'art actuel sur l'évaluation du niveau de FAIRness. Ensuite, la Section 3 décrit les étapes de conception de notre méthodologie d'évaluation du niveau de FAIRness des ressources sémantiques basée sur les métadonnées, détaille notre approche en présentant une projection de chaque principe FAIR pour les ressources sémantiques, et propose des indicateurs de mesure présentés sous forme de questions. Puis, la Section 4 présente notre prototype implémenté dans AgroPortal, explique son fonctionnement, et fournit des résultats préliminaires pour quelques ressources sémantiques dans le domaine de l'agriculture. Enfin, la Section 5 résume notre contribution et cite des perspectives.

2 Etat de l'art

Avant l'apparition des principes FAIR, en 2011, Berners-Lee a présenté les principes fondamentaux du Linked Open Data [8] pour rendre les données disponibles, partageables et interconnectées sur le Web. Les principes FAIR ont été proposés pour des raisons similaires en mettant davantage l'accent sur la réutilisabilité des données. Les principes LOD 5-star ont été spécialisés en 2014 pour les vocabulaires [9] et présentés sous la forme de cinq règles à suivre pour créer et publier des "bons" vocabulaires sur le Web. Dans ce schéma, les étoiles indiquent la qualité des données menant à une meilleure structure (e.g., l'utilisation des recommandations du W3C) et une meilleure interopérabilité pour la réutilisation (c'est-à-dire la représentation des métadonnées, la réutilisation des vocabulaires et l'alignement). Bien que le système de notation 5-star proposé pour les vocabulaires soit simple, à ce jour aucun outil de mise en œuvre n'a été développé autour de ces principes; ces principes ne sont pas non plus bien référencés dans la littérature. Une première étude d'alignement des principes LOD et FAIR a été réalisée dans [10], une deuxième étude plus approfondie a été proposée par Poveda et al.[11]; nous avons intégré ces alignements dans notre méthodologie.

En 2017, l'initiative *Minimum Information for Reporting an Ontology* (MIRO) a publié des directives destinées aux développeurs, pour la description d'une ontologie dans des rapports scientifiques [12]. Les directives MIRO visent à améliorer la qualité et la cohérence des descriptions du contenu de l'information; y compris la méthodologie de développement, la provenance et le contexte des informations de réutilisation. Ces directives définissent des éléments d'information (tels que nom, licence, URL) et spécifient leur niveau d'importance : 'must', 'should', 'optional'. Ce travail était significatif mais, jusqu'à présent, il n'existe aucune étude sur la façon dont les directives MIRO s'alignent avec ou complètent les principes FAIR. Le modèle de métadonnées MOD 1.4[2] a cependant fourni un alignement entre chaque directive MIRO et les propriétés de métadonnées correspondantes dans MOD. Nous avons donc utilisé cet alignement dans notre méthodologie, pour influencer le score de FAIRness avec les directives MIRO. Par exemple, la 'guideline' A.3 de MIRO recommande de préciser la licence de l'ontologie, et MOD suggère d'utiliser `dct:license` pour cela. Ici, nous ajoutons que cela implémente le principe R1.1.

Depuis 2018, plusieurs approches et outils génériques pour l'auto-évaluation du niveau de FAIRness d'une ressource sont apparues; nous pouvons citer : SHARC[13] , FDMM [14], FAIR Metrics [15], [16] (devenu FAIR evaluator), FAIRdat [17] et FAIR-Aware [18]. Une analyse synthétique de comparaison de 12 outils d'évaluation faite par la Research Data Alliance est disponible sur ce lien.[3] Par manque d'espace, nous ne présentons que l'approche FDMM et SHARC; les

[1] Dans cet article, nous utilisons parfois le terme "ontologie" pour faire référence à des ressources sémantiques [4], des systèmes d'organisation des connaissances [5], ou des artefacts sémantiques [6]. Typiquement, des terminologies, thésaurus et vocabulaires.

[2] Metadata for Ontology Description and Publication Ontology: https://github.com/sifrproject/MOD-Ontology

[3] https://github.com/rd-alliance/FAIR-data-maturity-model-WG

approches génériques intégrées dans notre méthodologie.

En 2017, le groupe d'intérêt SHARC (SHARing Rewards and Credit) de la Research Data Alliance (RDA) a proposé une grille d'évaluation du niveau de FAIRness dédiée aux données. L'objectif de ce travail est de guider les chercheurs et les autres parties prenantes à adopter les principes FAIR. La grille FAIR définit un ensemble de 45 critères génériques avec trois niveaux d'importance ('essential', 'recommended', 'desirable'); les critères sont formulés en questions qui sont parfois dépendantes les unes des autres comme dans un arbre de décision.

En 2018, le groupe de travail RDA FAIR Data Maturity Model (FDMM) a publié une liste de recommandations génériques visant à normaliser la méthodologie d'évaluation du niveau de FAIRness afin de permettre la comparabilité des résultats. Plus concrètement, le travail est présenté sous forme d'une grille qui définit 47 critères génériques avec des priorités ('essential', 'important', 'useful'); ces critères sont dérivés de chaque principe FAIR.

En résumé, la grille SHARC et FDMM considèrent que certains principes FAIR sont plus importants que d'autres. Nous avons suivi cette vision dans notre méthodologie et avons décidé d'inclure les résultats de SHARC et FDMM pour nous aider à déterminer l'ordre d'importance des principes FAIR pour les ressources digitales.

Ces deux dernières années, des approches plus spécifiques autour de l'évaluation des ressources sémantiques selon les principes FAIR, ont été publiées, nous les détaillons ci-dessous.

En mars 2020, le projet H2020 FAIRsFAIR a introduit 17 recommandations pour le partage des ressources sémantiques avec les principes FAIR [6]. Pour chaque recommandation, les auteurs fournissent une description détaillée et soulignent les technologies du Web sémantique qui peuvent être utilisées pour la mise en œuvre de cette recommandation pour n'importe quelle ressource sémantique. Ce travail, très pertinent pour nous, et en cours de révision par la communauté scientifique, reste préliminaire, et devra être complété par des indicateurs concrets de FAIRness qui pourront être utilisés pour évaluer automatiquement le degré de mise en œuvre des recommandations proposées pour les ressources sémantiques.

Également, Garijo et Poveda [11] proposent une liste de bonnes pratiques pour des ontologies FAIR. Dans un autre article [19], les auteurs complètent leur travail par une analyse qualitative du degré d'alignement des principales approches existantes sur le partage des ressources sémantiques (5-stars LOD [8] , 5-stars V [9], et FAIRsFAIR) avec les principes FAIR. Cette analyse démontre qu'aucune approche existante n'est complètement alignée aux principes FAIR et soulève aussi des enjeux scientifiques importants. L'approche de Poveda et al. est significative mais elle est limitée à l'étude de certaines approches sémantiques et ne propose pas des métriques de mesure du niveau de FAIRness. Nous pensons que ce travail d'analyse réalisée est important mais il devrait être amélioré pour inclure d'autres approches plus génériques notamment FDMM et SHARC. C'est également une contribution de notre travail présenté ici.

Finalement, l'outil DBPedia Archivo lancé par Frey et al. [20] est le premier outil public pour les ontologies FAIR. Archivo propose l'archivage et l'évaluation du niveau de FAIRness de toute ontologie hébergée dans sa propre librairie publique. L'inconvénient de cet outil est qu'il ne détaille pas ses résultats d'évaluation et ne propose pas de recommandations pour guider ses utilisateurs dans l'amélioration du score de FAIRness obtenu pour leurs ontologies. D'un point de vue méthodologique, Archivo n'a pas encore dévoilé l'approche qu'il applique dans le processus d'évaluation de ses ressources. Par conséquent, leur approche reste inconnue pour la communauté Web sémantique.

Notre analyse de l'état de l'art montre clairement qu'aucune *approche spécifique* pour les ontologies n'est strictement alignée aux 15 sous-principes FAIR (voir Tableau 1); également qu'aucune *approche générique* des principes FAIR n'est strictement applicable aux ontologies. Ainsi, nous proposons ici une méthodologie qui fait converger les deux visions. Nous constatons aussi que les approches génériques tiennent fortement compte de tous les sous-principes FAIR sauf F2, F3 et A2. Cependant, les approches spécifiques accordent plus d'importance à F1, A1, I1, I2, R1 et R.1.2. Les résultats obtenus soulignent aussi la nécessité d'établir un ensemble minimum de représentation des métadonnées de l'ontologie (en cours de discussion dans le cadre du projet FAIRsFAIR), une meilleure fédération et interopération des portails et services pour les ontologies, des stratégies de maintenance long terme pour les ontologies et leurs métadonnées au sein de ces portails/services, et des meilleures pratiques pour documenter et communiquer sur les ontologies.

Pour construire notre approche, nous avons considéré SHARC, FDMM, LOD 5-star, MIRO, FAIRsFAIR et Poveda et al. Nous avons étudié chaque approche (i) en analysant comment elle s'aligne avec chaque sous-principe FAIR (voir Tableau 1) et (ii) en pondérant (à l'aide de crédits) les sous-principes en fonction de l'importance que lui a donné une approche. Plus précisément, nous avons fixé une valeur "de départ" par défaut à 10 crédits égale pour chaque sous-principe. Dans notre calcul, nous sommes partis de cette valeur de départ et avons ajouté des crédits aux sous-principes en fonction de l'importance que leur donnent les approches étudiées. Le calcul des crédits obtenus pour chaque sous principe n'est pas détaillé ici mais peut être consulté dans [21]. La Figure 1 montre les valeurs de crédits obtenus pour chaque sous-principe. Le vert clair est la valeur de départ; le vert moyen représente les ajouts de crédits obtenus avec les approches génériques, et le vert foncé représente les ajouts de crédits obtenus avec les approches spécifiques aux ontologies. Ainsi, on peut constater que les trois principes qui ressortent le plus sont F1, A1 et I1 et ceux qui ressortent le moins sont F3, A1.2 et A2.

	SHARC	**FDMM**	**MIRO**	**5*V**	**FsF**	**Poveda et al.**
F1	X	X	X	-	X	X
F2	X	X	X	-	X	X
F3	X	X	-	-	X	-
F4	X	X	-	-	X	X
A1	X	X	X	X	X	X
A1.1	X	X	-	-	X	-

©AFIA2021

A1.2	X	X	-	-	X	-
A2	X	X	-	-	X	-
I1	X	X	X	X	X	X
I2	X	X	X	-	X	-
I3	X	X	X	X	X	X
R1	X	X	X	X	-	X
R1.1	X	X	X	-	X	X
R1.2	X	X	X	-	X	X
R1.3	X	X	-	-	X	X

Tableau 1. Alignement des approches existantes aux 15 sous-principes FAIR. Le symbole (X) indique que l'approche étudie le principe concerné, en revanche le symbole (-) indique le contraire.

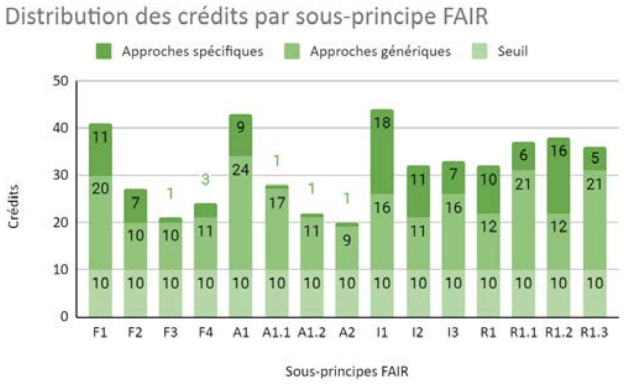


Figure 1. Distribution des crédits obtenus pour chaque sous-principe FAIR; le calcul est issu de l'intégration des approches spécifiques, génériques, et du seuil.

3 Méthodologie

Dans ce travail, nous considérons que l'évaluation du niveau de FAIRness des ontologies et des ressources sémantiques devrait autant que possible être basée sur l'évaluation de descriptions formelles de leurs métadonnées, idéalement indexées, partagées et normalisées par des portails d'ontologies tels que le NCBO BioPortal [22] ou Ontology Lookup Service de EBI [23] en biomédecine, ou AgroPortal en agronomie. Dans des travaux antérieurs, nous avons construit un nouveau modèle de métadonnées harmonisé pour AgroPortal et démontré qu'il améliore l'identification et la réutilisation des ressources sémantiques en agronomie [7], [24]. Ici, nous démontrons que les portails d'ontologies sont également importants pour l'évaluation du niveau de FAIRness.

Dans cette section, nous interprétons trois sous-principes (F1, A1, I1 et R1.1) pour les ressources sémantiques et listons les propriétés de métadonnées standardisées utilisées pour décrire les informations nécessaires liées à l'évaluation de ces sous-principes. Nous traitons dans cet article trois sous principes sur 15, le reste de la méthodologie est documentée sur GitHub, dans le dépôt du code open source qui implémente notre approche: https://github.com/agroportal/fairness. Nous avons utilisé le modèle MOD comme référence, il regroupe 346 propriétés tirées de 23 vocabulaires de métadonnées (tels que Dublin Core, DCAT, VoID, ADMS, VOAF, Schema.org, etc.) [24]. MOD n'est donc pas un standard, mais un listing de standards. Ici, nous utilisons le modèle de métadonnées MOD pour identifier sans ambiguïté quelle propriété peut être utilisée; cependant, notre méthodologie est indépendante de ce modèle et exige seulement que l'information soit bien représentée et harmonisée dans les métadonnées d'une ontologie.

Nous avons distribué les crédits obtenus précédemment sur des séries de questions proposées pour l'évaluation de chaque sous-principes FAIR. La distribution des crédits d'un sous-principe sur les questions associées est basée sur une distribution équilibrée et pertinente qui pourrait être modifiée ou ajustée si des questions étaient supprimées ou ajoutées à l'avenir. Toutes nos questions d'évaluation, sauf celles du sous-principe R1.3, sont génériques (c'est-à-dire non spécifiques à l'agronomie ou à AgroPortal) et pourront être appliquées sur n'importe quelle ontologie par d'autres communautés scientifiques. Nous recommandons donc aux futurs utilisateurs de notre travail de spécifier eux même les questions de R1.3 en s'adressant aux experts de leur domaine d'intérêt.

Concrètement, le résultat de notre travail est une grille d'évaluation composée de 68 questions couvrant la totalité des sous-principes FAIR; nous avons identifié 55 propriétés de métadonnées nécessaires (correspondantes à 309 crédits) pour répondre à toutes ces questions sauf celles de F2; 73 propriétés additionnelles sont proposées dans MOD pour enrichir une ontologie avec des métadonnées et augmenter son niveau de FAIRness. En d'autres termes, nous proposons dans F2 d'évaluer toutes les propriétés de métadonnées qui ne sont pas considérées dans le reste des sous-principes. Pour chaque sous-principe, nous avons attribué à chaque question un certain nombre de crédits dans la limite des valeurs identifiées dans la Figure 1. Il faut noter que les questions sont majoritairement binaires (oui ou non) ainsi, pour une question donnée une ressource sémantique se verra en général attribuer soit tous les crédits, soit aucun; mais rarement une valeur entre les deux.

Dans la suite, nous listons les questions d'évaluation de F1, A1, I1 et R1.1 (c'est-à-dire, une illustration d'un sous-principe pour un groupe de principe donné) et précisons le nombre de crédits que notre algorithme attribuera si le test de conformité sémantique est validé pour chaque sous-principe. Le score final de FAIRness est ensuite une simple somme de l'ensemble des crédits obtenus aux questions d'évaluation. Ce score peut être normalisé sur 100 pour faciliter sa compréhension et la comparaison des ontologies entre elles.

Sous-principe F1. Les ontologies et les métadonnées d'ontologie reçoivent un identifiant global unique et persistant. F1 concerne les *identifiants*; bien que cela n'est pas explicitement mentionné dans l'intitulé du sous-principe, plusieurs travaux demandent que les identifiants soient résolvables, c'est-à-dire un identifiant qui permettent d'avoir accès à la ressource ou à la description de la ressource (déréférencement). FAIRsFAIR recommande l'utilisation d'un identifiant [25] *globalement unique, persistant et résolvable* (GUPRI) pour les ontologies et les métadonnées d'ontologies.

Dans la plupart des cas, les ontologies décrites avec les langages du Web sémantique possèdent un *identifiant de ressource unique* (URI) et les métadonnées sont soit représentées au

niveau du fichier de l'ontologie (le plus fréquent) soit dans un fichier externe. Les URIs sont généralement uniques sur le Web, mais ils ne sont pas toujours pérennes et résolvables. Dans certains cas, les ontologies peuvent avoir un identifiant supplémentaire attribué par une organisation externe telle qu'un DOI. Parfois, les URIs prennent la forme de PURL qui sont supposés persistants mais qui ne sont pas certifiés comme le sont les DOI. Idéalement, les URIs d'ontologies devraient pouvoir être résolvables pour garantir un degré de conformité plus élevé pour F1. Lorsqu'elles sont sauvegardées dans un fichier séparé, les mêmes règles concernant l'identification doivent s'appliquer au fichier de métadonnées de l'ontologie. En complément, les communautés qui développent des ontologies essaient parfois de maintenir une utilisation cohérente des acronymes pour identifier les ontologies. Par exemple, dans le cadre de l'OBO Foundry, un nom court est obligatoire demandé et sera utilisé pour identifier l'ontologie et pour l'attribution du PURL (par exemple, l'acronym de l'*Agronomy Ontology* est AGRO et son PURL est http://purl.obolibrary.org/obo/agro.owl)

F1 peut être évalué en vérifiant la valeur affectée à la propriété `owl:ontologyIRI`, utilisée pour coder l'URI de l'ontologie et la propriété `dct:identifier`, utilisée pour coder un autre identifiant "externe". De plus, la propriété `owl:versionIRI`, qui sauvegarde un URI spécifique à la version, peut également être utilisée pour évaluer si l'ontologie distingue clairement des identifiants de versions. La Liste 1 résume les questions d'évaluation pour ce sous-principe.

Liste 1. Questions d'évaluation de F1 (41 crédits)
Q1. Une ontologie a-t-elle un identifiant "local", c'est-à-dire un identifiant globalement unique et potentiellement persistant mais attribué par le développeur (ou l'organisation de qui développe l'ontologie) ? **9 cts**
Q2. Une ontologie fournit-elle un identifiant "externe" supplémentaire, c'est-à-dire un identifiant globalement unique et persistant attribué par un organisme accrédité ? **6 cts**
Q3. Si oui, cet identifiant externe est-il un DOI ? **5 cts**
Q4. Les métadonnées de l'ontologie sont-elles incluses dans le fichier d'ontologie et partagent-elles par conséquent les mêmes identifiants ? **6 cts**
Q5. Sinon, l'ensemble des métadonnées est-il clairement identifié par son propre GUPRI ? **6 cts**
Q6. Une ontologie fournit-elle un URI spécifique à la version ? **4 cts**
Q7. Si oui, cet URI est-il résolvable/ déréférençable ? **5 cts**

Sous-principe A1. Les ontologies et les métadonnées d'ontologie sont accessibles par leur identifiant à l'aide d'un protocole de communication normalisé. A1 exprime l'importance des identifiants pour rendre une ressource accessible sur le Web. En Web sémantique, une ontologie hébergée sur un serveur Web devient accessible via le protocole standard HTTP. Ainsi, les objets d'une ontologie, (c'est-à-dire, classes, relations et métadonnées) peuvent être facilement récupérées via des services Web et dans le meilleur des cas elles peuvent aussi être disponibles sous différents formats (par exemples, JSON, HTML, texte, etc.) en utilisant la négociation de contenu.

A1 peut-être évalué en vérifiant la résolvabilité (et la prise en charge de la négociation du contenu) via HTTP des URIs d'ontologie et des métadonnées d'ontologie. Voir les métadonnées F1 liées aux identifiants pour l'évaluation de l'accessibilité sous HTTP. Dans le schéma MOD, d'autres propriétés existent pour évaluer si une ontologie et les métadonnées d'ontologie sont accessibles à travers d'autres protocoles de communication comme les requêtes SPARQL : la propriété `sd:endpoint` peut être utilisée pour stocker le point d'accès SPARQL qui peut être utilisé pour récupérer le contenu et les métadonnées de l'ontologie. De plus, les propriétés `void:openSearchDescription` et `void:uriLookupEndpoint` peuvent également être utilisées pour évaluer l'existence d'un moteur de recherche en text libre ou par URI sur l'ontologie; cependant nous définissons ces propriétés comme des métadonnées optionnelles dans F2.

Liste 2. Questions d'évaluation de A1 (43 crédits)
Q1. Est-ce que l'URI (ou d'autres identifiants) de l'ontologie se déréférence vers l'ontologie ? **6 cts**
Q2. Est-ce que l'URI de l'ontologie ou l'URI de métadonnées externes se déréférence vers les valeurs de métadonnées? **7 cts**
Q3. L'ontologie et ses métadonnées prennent-elles en charge la négociation de contenu? **24 cts**
Q4. Une ontologie et ses métadonnées sont-elles accessibles via un autre protocole standard tel que SPARQL? **6 cts**

Sous-principe I1. Les ontologies et les métadonnées d'ontologie utilisent un langage formel, accessible, partagé et largement applicable pour la représentation des connaissances. I1 met l'accent sur l'importance du langage de représentation des connaissances. Une ontologie est généralement une ressource conçue pour être compréhensible par la machine et qui repose donc sur un *langage formel*. Cependant, certaines ontologies ou ressources sémantiques peuvent être décrites sous forme textuelle ou graphique qui ne sont pas directement exploitables par une machine.

Théoriquement, une ontologie ou une ressource sémantique est sauvegardée dans un fichier en utilisant une *syntaxe* dédiée (RDF/XML, Turtle, JSON-LD) et un *langage de représentation* (OWL, SKOS, RDFS, OBO). Une ressource sémantique peut avoir différents niveaux de formalité (par exemples, ontologie, terminologie, thésaurus, vocabulaire). Les métadonnées d'ontologies sont généralement représentées en utilisant la même syntaxe et le même langage de représentation que l'ontologie elle-même. Lorsque les métadonnées sont sauvegardées dans un fichier externe, le langage de représentation des connaissances doit être évalué indépendamment.

Le sous-principe I1 peut être évalué en regardant le niveau de formalité et d'accessibilité du langage de représentation utilisé pour encoder l'ontologie ainsi que dans quelle mesure ce langage est partagé/adopté par une communauté, s'il est générique (c'est-à-dire "largement applicable" et non spécifique au domaine) et s'il est recommandé par des organismes de normalisation (dans notre cas le W3C principalement). Dans notre méthodologie, nous avons considéré que les ressources sémantiques et leurs métadonnées

©AFIA2021

peuvent être décrites en utilisant le langage OWL, OBO, RDFS et SKOS (indépendamment de leur syntaxe associée) ainsi que dans les formats CSV, XML, PDF ou TEXT. Pour l'évaluation de I1, nous pouvons regarder le langage de représentation, et le niveau de formalité utilisé et enregistré en tant que métadonnée (déclaré par les auteurs ou le portail d'hébergement). Nous pouvons aussi regarder la disponibilité de la ressource dans d'autres formats/syntaxes. Dans le schéma MOD, le langage de représentation d'une ontologie est représenté via la propriété `omv:hasOntologyLanguage`, son niveau de formalité est décrit avec la propriété `omv:hasFormalityLevel`, sa syntaxe est décrite avec la propriété `omv:hasOntologySyntax`. Si une ressource sémantique est disponible dans un autre format ou une autre syntaxe, ces informations peuvent être décrites avec les propriétés `dct:hasFormat` et `dct:isFormatOf`. La Liste 3 résume les questions d'évaluation pour ce sous-principe.

Liste 3. Questions d'évaluation de I1 (44 crédits)
Q1. Quel est le langage de représentation utilisé pour l'ontologie et les métadonnées de l'ontologie ? **20 cts***
Q2. Le langage de représentation utilisé est-il une recommandation du W3C ? **10 cts**
Q3. La syntaxe de l'ontologie est-elle déclarée ? **5 cts**
Q4. Le niveau de formalité de l'ontologie est-il déclaré ? **5 cts**
Q5. La disponibilité d'autres formats est-elle déclarée ? **4 cts**
(*) Nous proposons l'échelle suivante pour la notation de chaque langage de représentation : (owl, 20 pts) - (skos, 18 pts) - (rdfs, 16 pts) - (obo, 14 pts) - (xml, 12 pts) - (csv, 11 pts)) - (pdf, 5 pts) - (txt, 5 pts). Nous donnons une petite avance a OWL qui d'après nous est le langage le plus "formal and broadly applicable".

Sous-principe R1.1. Les ontologies et les métadonnées d'ontologie sont publiées avec une licence d'utilisation claire et accessible. Bien que l'ouverture ne soit pas un critère obligatoire pour rendre les données FAIR, il est évident que le fait de rendre les ontologies et les métadonnées d'ontologies ouvertement et librement disponibles va améliorer leur réutilisation. Quel que soit le type de licence choisie, R1.1 exige une représentation compréhensible par la machine pour la licence. En fait, l'absence d'une description explicite de la licence pourrait empêcher des personnes de réutiliser l'ontologie, même si elle était à l'origine ouverte et destinée à être partagée. Actuellement, le site RDF License[4] offre des URIs et des descriptions RDF pour la plupart des licences ; également le vocabulaire Creative Commons[5] fournit plusieurs propriétés pour garantir une description compréhensible par la machine des droits d'accès et des licences.

Le sous-principe R1.1 peut être évalué en vérifiant si les informations de licence et de droits d'accès sont fournies et résolvables (notamment la licence). Le modèle de métadonnées MOD suggère les propriétés `dct:license` pour décrire les informations de licence, et `dct:accessRights` pour détailler les droits d'accès (qui a accès à quoi). Le modèle MOD propose aussi des propriétés pour décrire les informations sur les permissions et les conditions d'utilisation associées à l'ontologie (`cc:morePermissions`, `cc:useGuidelines`) ainsi que le détenteur du droit d'auteur (`dct:rightsHolder`). Dans notre méthodologie, nous supposons que l'ontologie et ses métadonnées sont régies par la même licence – par défaut lorsque les métadonnées sont effectivement décrites dans le même fichier que l'ontologie – mais bien sûr, si ce n'est pas le cas, deux licences doivent être spécifiées et les crédits doivent être divisés en fonction. La Liste 4 résume les questions d'évaluation pour ce sous-principe.

Liste 4. Questions d'évaluation de R1.1 (37 crédits)
Q1. La licence de l'ontologie est-elle clairement spécifiée (c'est-à-dire avec un identifiant unique et persistant) ? **8 cts**
Q2. Si oui, la description de la licence est-elle accessible et résolvable par une machine ? **7 cts**
Q3. Les droits d'accès à l'ontologie sont-ils clairement spécifiés / déclarés ? **7 cts**
Q4. Les autorisations, les conditions d'utilisation et le détenteur des droits d'auteur sont-ils clairement documentés ? **15 cts**

4 Résultats

Nous avons implémenté un prototype d'évaluation du niveau de FAIRness sous la forme d'un service Web indépendant qui utilise – via l'API REST – les métadonnées des ressources sémantiques dans AgroPortal et évalue automatiquement 59 questions sur les 69 définies dans notre approche. Seulement 10 questions ne peuvent pas encore être évaluées dans AgroPortal : 1 question liée à F1, 3 questions liées à F3, 3 questions I2, et 3 questions I3. L'extension du modèle MOD avec des nouvelles propriétés devrait aider à couvrir trois de ces questions e.g., évaluer le lien entre l'ontologie et les métadonnées (F1-Q5), décrire l'état de curation (I2-Q6) ou la qualification des alignements (I3). AgroPortal étant un portail d'hébergement des ressources sémantiques donc ici, il est important de noter que notre service Web traite les métadonnées de l'objet stocké chez AgroPortal et non pas celles du fichier d'origine.

Le service Web prend comme paramètre un acronyme[6] d'une ressource sémantique, c'est-à-dire un identifiant local dans AgroPortal, et renvoie en sortie un fichier JSON qui contient le score FAIR obtenu pour chaque question et chaque sous-principe (tableau 'scores'), ainsi que les scores par principe (champ numérique 'total score'). Chaque score de question est justifié par une petite phrase de justification (tableau 'explanations'), afin que l'utilisateur puisse être informé de la raison pour laquelle ce score a été obtenu. Ci-après, un exemple d'appel au service Web pour l'évaluation de l'ontologie AGRO (Agronomy Ontology) : http://services.agroportal.lirmm.fr/fairness_assessment/?portal=agroportal&ontology=AGRO.

Le temps de traitement du service Web est non linéaire, l'évaluation des questions ne dépend pas de la taille de l'ontologie (classes/relations) ; elle repose uniquement sur une liste déterminée de métadonnées décrivant l'ontologie. Un exemple de résultat pour le critère F1 est illustré dans la Figure 3.

[4] http://rdflicense.appspot.com/
[5] https://creativecommons.org/licenses/
[6] La liste des acronymes des ontologies hébergées dans AgroPortal est disponible via le lien : http://agroportal.lirmm.fr/ontologies/

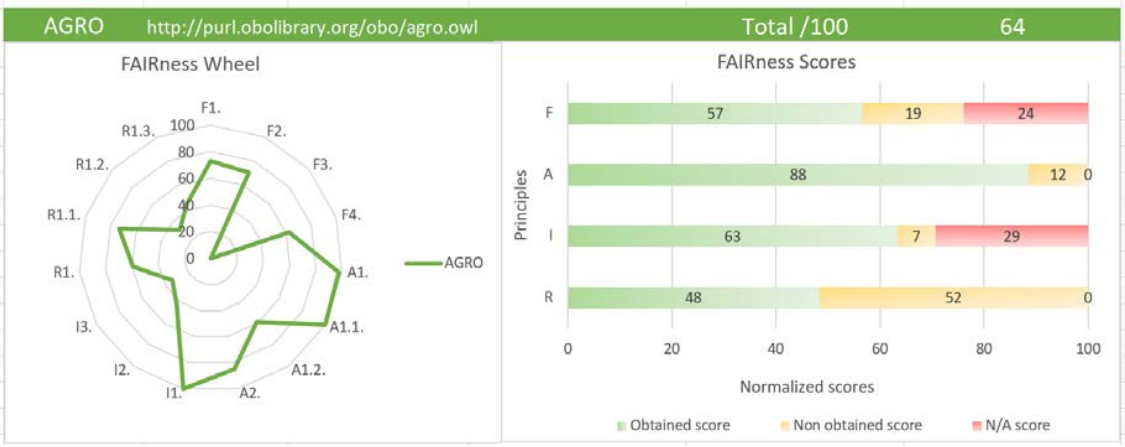


Figure 2. Synthèse graphique obtenue pour l'évaluation du niveau de FAIRness de l'Agronomy Ontology (AGRO).

A court terme, nous prévoyons d'enrichir notre sortie JSON avec des scores normalisés sur 100 (tel que rapportés sur la Figure 2) et de permettre la visualisation des résultats de FAIRness sur la page 'Summary' d'AgroPortal : (e.g., http://agroportal.lirmm.fr/ontologies/AGRO). Sur du plus long terme, il s'agira de représenter nos résultats dans un format structuré standard pour la représentation de FAIRness assessment; de tels formats sont actuellement en cours de discussion.

Également, le service Web prend comme paramètre le portail à utiliser pour l'évaluation du niveau de FAIRness (paramètre `portal`) car notre objectif est d'offrir un service générique pour tout portail d'ontologies mettant en œuvre le modèle de métadonnées d'ontologie MOD et/ou offrant un modèle de métadonnées riche et harmonisé pour les ontologies. Le code du prototype actuel est basé sur la version 3 d'OntoPortal (https://ontoportal.org) dans lequel nous avons changé le modèle de métadonnées [24].[7] Ce code est utilisé pour AgroPortal et le SIFR BioPortal (un portail d'ontologies et de terminologies biomédicale francaises) [26]; ainsi, pour l'instant, seul AgroPortal et le SIFR BioPortal supporte le service Web de FAIRness assessment implémenté. Dans le cadre de l'Alliance OntoPortal, nous envisageons d'étendre notre modèle de métadonnées aux autres portails d'ontologies basés sur cette technologie (i.e., NCBO BioPortal, LifeWatch EcoPortal, MedPortal et MatPortal).

Pour analyser les scores de FAIRness par ontologie ou groupe d'ontologies, nous avons produit dans une feuille Excel des graphiques synthétiques pour visualiser les résultats. La Figure 2 détaille à titre d'exemple le score obtenu pour l'ontologie AGRO. La "roue de FAIRnes" de la Figure 2 indique la répartition du score obtenu par l'ontologie ou par un groupe d'ontologies sur l'ensemble des 15 sous-principes. Le score global normalisé pour AGRO est de 64/100). L'histogramme de la Figure 2 affiche pour chaque principe : le score total obtenu (série en vert), les credits non obtenu dans AgroPortal (série jaune), et les credits qui ne peuvent pas encore être affecté/calculé au sein de AgroPortal (série en rouge). A titre d'exemple, l'ontologie AGRO a un score normalisé de 57 sur les 76 points évaluables sur AgroPortal pour le principe F.

```
{
  "AGRO": {
    "Findable": {
      "F1": {
        "resultSet": {
          "explanations": [
            "Valid ontology URI",
            "Resolvable ontlogy URI",
            "Valid GUID",
            "GUID is not a DOI",
            "Metadata are not included in the ontology file",
            "Metadata are identified by a resolvable URI",
            "Valid URI version",
            "Resolvable ontology URI version"
          ],
          "scores": [
            3,
            6,
            6,
            0,
            0,
            6,
            4,
            5
          ],
          "totalScore": 30
        }
      }
    }
  }
}
```

(a) (b) (c)

Figure 3. Résultat d'évaluation de F1 pour l'ontologie AGRO. La sortie JSON montre (a) les explications données aux scores, (b) les détails des scores et (c) le score total du sous-principe concerné.

Les moyennes que nous avons pu obtenir sur l'ensemble des ontologies d'AgroPortal nous indique qu'un score au-dessus de 65 est relativement un "bon" score de FAIRness. En effet, la moyenne des scores pour les 134 ontologies d'AgroPortal que nous avons testées en mars 2021 est de 50. La médiane est de 49. Etant donné qu'aucun des travaux existants ne définissent de valeur de référence pour définir les niveaux de FAIRness, nous nous reposons ici sur nos statistiques expérimentales comme la valeur moyenne de FAIRness. Nous expliquons dans

[7] https://github.com/ontoportal-lirmm

©AFIA2021

[21] qu'une métrique est indispensable pour justement indiquer à partir de quand une ontologie n'est pas FAIR, est FAIR ou même FAIRer.

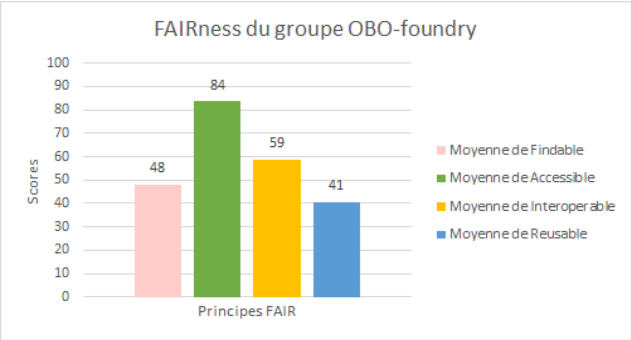


Figure 4. Synthèse de l'évaluation du degré de mise en œuvre des principes FAIR au sein du groupe 'OBO-foundry'.

La Figure 4 montre le résultat d'évaluation du degré de mise en œuvre des principes FAIR pour 24 ontologies appartenant au groupe "OBO-foundry" dans AgroPortal. Le score de FAIRness pour tout le groupe est de 58 (c'est la moyenne des scores décrits en Figure 4) : l'ontologie qui obtient le meilleure score de FAIRness est la *Phenotype And Trait Ontology* (PATO) avec un score de 65 et un des score le moins haut est obtenu pour l' *Agriculture and Forestry Ontology* (AFO). La valeur de FAIRness du groupe OBO est plutôt satisfaisante; cette valeur, au dessus de la moyenne est essentiellement obtenue grâce: (i) aux principes de conception que l'OBO Foundry demande aux ontologies qu'elle héberge (incluant des aspects sur l'utilisation des PURLs, la maintenance des fichiers de métadonnées, la clarté sur les conditions d'utilisation, et le support de négociation du contenu sous différents formats); et (ii) à l'hébergement de ces ontologies dans un 'repository' comme AgroPortal qui aide à implémenter certains principes FAIR pour n'importe laquelle des ontologies hébergées (e.g., accessibilité du contenu avec le protocole HTTP, la description riche des métadonnées, les fonctionnalités de recherche, l'alignement avec d'autres ressources, et l'archivage des versions, etc.). Néanmoins, ces ontologies peuvent devenir encore plus FAIR en améliorant la mise en œuvre des sous-principes tels que F2 et R1.2 à travers les propriétés de métadonnées MOD relatives à ces sous-principes.

Une analyse détaillée du niveau de FAIRness de toutes les ontologies de AgroPortal fera l'objet d'une autre communication.

5 Discussion et conclusions

Ce travail aborde la problématique d'évaluation de la mise en œuvre des 15 principes FAIR pour les ressources sémantiques et apporte des solutions concrètes qui faciliteraient l'adoption de ces principes par la communauté sémantique. Nous avons présenté une méthodologie et un outil d'évaluation du niveau de FAIRness. La méthodologie proposée est : (i) alignée aux approches de l'état-de-l'art, (ii) basée sur un modèle de métadonnées, (iii) générique et peut donc être appliquée pour tout type de ressource sémantique quel que soit le domaine d'application. L'implémentation que nous avons produite peut être subjective sur certains aspects (e.g., nombre de crédits par questions, liste des questions), c'est pourquoi nous avons voulu la méthodologie sous-jacente aussi générique que possible de façon à ce que chacun puisse la déployer avec ses spécificités. A termes, d'autres indicateurs (vote, usage, sondage) interviendront pour "évaluer" les outils de FAIRness assessment.Les résultats préliminaires de notre prototype montrent l'intérêt d'une évaluation par crédits pour l'ensemble des sous-principes et l'étude donne également une idée sur les analyses par ontologie ou groupe d'ontologies que nous pourrions générer à partir des scores obtenus.

Plusieurs enjeux scientifiques liés à l'évaluation du niveau de FAIRness des ressources sémantiques nécessitent d'être traités par la communauté nous citons à titre d'exemples : le besoin d'établir un consensus pour garantir la persistance des URIs (par exemple, un service d'enregistrement d'identifiants), de proposer un ensemble de métadonnées à évaluer pour chaque sous-principe, de fournir des mécanismes de standardisation et d'échange des métadonnées afin de faciliter leur récupération par les moteurs de recherche.

Prochainement, (i) nous effectuerons une analyse détaillée des scores de FAIRness pour l'ensemble des ontologies d'AgroPortal, (ii) nous réaliserons une enquête pour déterminer comment notre approche a aidé nos utilisateurs dans la sélection et l'amélioration des ressources sémantiques, (iii) nous continuerons nos efforts pour la standardisation et l'interopérabilité des métadonnées des ressources sémantiques au sein des initiatives internationales de la communauté FAIR (RDA, GO FAIR et projet FAIRsFAIR).

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR *Des Données aux Connaissances en Agronomie et Biodiversité* (D2KAB – www.d2kab.org – ANR-18-CE23-0017) et du projet ANR *Participation française au GO FAIR Food Systems Implementation Network* (FooSIN – www.foosin.fr – ANR 19-DATA-0019). Nous remercions également le groupe de travail VSSIG (*Vocabulary and Semantic Services Interest Group*) de la Research Data Alliance ainsi que le projet H2020 FAIRsFAIR pour les discussions sur les ontologies et les vocabulaires FAIR.

Références

[1] M. D. Wilkinson *et al.*, « The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship », *Sci. Data*, vol. 3, nº 1, Art. nº 1, mars 2016, doi: 10.1038/sdata.2016.18.

[2] B. Mons, *Data Stewardship for Open Science: Implementing FAIR Principles*. CRC Press, 2018.

[3] B. Mons, C. Neylon, J. Velterop, M. Dumontier, L. O. B. da Silva Santos, et M. D. Wilkinson, « Cloudy, increasingly FAIR; revisiting the FAIR Data guiding principles for the European Open Science Cloud », *Inf. Serv. Use*, vol. 37, nº 1, p. 49-56, janv. 2017, doi: 10.3233/ISU-170824.

[4] C. Caracciolo *et al.*, « 39 Hints to Facilitate the Use of Semantics for Data on Agriculture and Nutrition », *Data Sci. J.*, vol. 19, nº 1, Art. nº 1, déc. 2020, doi: 10.5334/dsj-2020-047.

[5] M. L. Zeng et P. Mayr, « Knowledge Organization

Systems (KOS) in the Semantic Web: a multi-dimensional review », *Int. J. Digit. Libr.*, vol. 20, nº 3, p. 209-230, sept. 2019, doi: 10.1007/s00799-018-0241-2.

[6] Y. Le Franc, J. Parland-von Essen, L. Bonino, H. Lehväslaiho, G. Coen, et C. Staiger, « D2.2 FAIR Semantics: First recommendations », mars 2020, doi: 10.5281/zenodo.3707985.

[7] C. Jonquet *et al.*, « AgroPortal: A vocabulary and ontology repository for agronomy », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 144, p. 126-143, janv. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2017.10.012.

[8] C. Bizer, T. Heath, et T. Berners-Lee, « Linked Data: The Story so Far », *Semantic Services, Interoperability and Web Applications: Emerging Concepts*, 2011. www.igi-global.com/chapter/linked-data-story-far/55046 (consulté le mars 14, 2021).

[9] K. Janowicz, P. Hitzler, B. Adams, D. Kolas, et C. Vardeman II, « Five stars of Linked Data vocabulary use », *Semantic Web*, vol. 5, nº 3, p. 173-176, 2014, doi: 10.3233/SW-140135.

[10] A. Hasnain et D. Rebholz-Schuhmann, « Assessing FAIR Data Principles Against the 5-Star Open Data Principles », in *The Semantic Web: ESWC 2018 Satellite Events*, Cham, 2018, p. 469-477. doi: 10.1007/978-3-319-98192-5_60.

[11] D. Garijo et M. Poveda-Villalón, « Best Practices for Implementing FAIR Vocabularies and Ontologies on the Web », *ArXiv*, 2020, doi: 10.3233/ssw200034.

[12] N. Matentzoglu, J. Malone, C. Mungall, et R. Stevens, « MIRO: guidelines for minimum information for the reporting of an ontology », *J. Biomed. Semant.*, vol. 9, nº 1, p. 6, janv. 2018, doi: 10.1186/s13326-017-0172-7.

[13] R. David *et al.*, « FAIRness Literacy: The Achilles' Heel of Applying FAIR Principles », *Data Sci. J.*, vol. 19, nº 1, Art. nº 1, août 2020, doi: 10.5334/dsj-2020-032.

[14] C. Bahim *et al.*, « The FAIR Data Maturity Model: An Approach to Harmonise FAIR Assessments », *Data Sci. J.*, vol. 19, nº 1, Art. nº 1, oct. 2020, doi: 10.5334/dsj-2020-041.

[15] M. D. Wilkinson, S.-A. Sansone, E. Schultes, P. Doorn, L. O. Bonino da Silva Santos, et M. Dumontier, « A design framework and exemplar metrics for FAIRness », *Sci. Data*, vol. 5, juin 2018, doi: 10.1038/sdata.2018.118.

[16] M. D. Wilkinson *et al.*, « Evaluating FAIR maturity through a scalable, automated, community-governed framework », *Sci. Data*, vol. 6, nº 1, Art. nº 1, sept. 2019, doi: 10.1038/s41597-019-0184-5.

[17] « SurveyMonkey Powered Online Survey ». https://www.surveymonkey.com/r/fairdat (consulté le avr. 19, 2021).

[18] M. Mokrane, L. Cepinskas, V. Åkerman, J. de Vries, et I. von Stein, « FAIR-Aware », 2020, Consulté le: mars 14, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://pure.knaw.nl/portal/en/publications/fair-aware

[19] M. Poveda-Villalón, P. Espinoza-Arias, D. Garijo, et O. Corcho, « Coming to Terms with FAIR Ontologies », in *Knowledge Engineering and Knowledge Management*, Cham, 2020, p. 255-270. doi: 10.1007/978-3-030-61244-3_18.

[20] J. Frey, D. Streitmatter, F. Götz, S. Hellmann, et N. Arndt, « DBpedia Archivo: A Web-Scale Interface for Ontology Archiving Under Consumer-Oriented Aspects », in *Semantic Systems. In the Era of Knowledge Graphs*, vol. 12378, E. Blomqvist, P. Groth, V. de Boer, T. Pellegrini, M. Alam, T. Käfer, P. Kieseberg, S. Kirrane, A. Meroño-Peñuela, et H. J. Pandit, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 19-35. doi: 10.1007/978-3-030-59833-4_2.

[21] E. Amdouni et C. Jonquet, « FAIR or FAIRer? An integrated quantitative FAIRness assessment grid for semantic resources and ontologies », avr. 2021. Consulté le: mai 20, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-03208544

[22] N. F. Noy *et al.*, « BioPortal: ontologies and integrated data resources at the click of a mouse », *Nucleic Acids Res.*, vol. 37, nº Web Server issue, p. W170-W173, juill. 2009, doi: 10.1093/nar/gkp440.

[23] S. Jupp, T. Burdett, C. Leroy, et H. Parkinson, « A new Ontology Lookup Service at EMBL-EBI », 2015.

[24] C. Jonquet, A. Toulet, B. Dutta, et V. Emonet, « Harnessing the Power of Unified Metadata in an Ontology Repository: The Case of AgroPortal », *J. Data Semant.*, vol. 7, nº 4, p. 191-221, déc. 2018, doi: 10.1007/s13740-018-0091-5.

[25] N. Juty, S. M. Wimalaratne, S. Soiland-Reyes, J. Kunze, C. A. Goble, et T. Clark, « Unique, Persistent, Resolvable: Identifiers as the Foundation of FAIR », *Data Intell.*, vol. 2, nº 1-2, p. 30-39, janv. 2020, doi: 10.1162/dint_a_00025.

[26] C. Jonquet, A. Annane, K. Bouarech, V. Emonet, et S. Melzi, « SIFR BioPortal : Un portail ouvert et générique d'ontologies et de terminologies biomédicales françaises au service de l'annotation sémantique », Genève, Switzerland, juin 2016. Consulté le: mars 22, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01398250

©AFIA2021

COrHA: Architecture multi-agent pour la collaboration Utilisateurs-Objets connectés dans une tâche en domotique

A. Audic[1], L. Thevin[2]

[1] Fondation Université Bretagne Sud, Chaire M@D "Maintien à Domicile"
[2] Université Catholique de l'Ouest, équipe MAI

al.audic.a@gmail.com, lauren.thevin@uco.fr

Résumé

Les systèmes domotiques sont décentralisés et permettent idéalement des interactions riches et flexibles (dispositifs techniques et utilisateurs). Dans ce cadre, nous nous intéressons à la manière de coordonner à un ensemble varié de (i) ***dispositifs*** *(inputs, outputs) (ii)* ***utilisateurs*** *(préférences d'interaction), et (iii)* ***tâches*** *soutenues par le système interactif. En étudiant la littérature scientifique, les systèmes multi-agents ont été proposés pour coordonner l'interaction objets-utilisateurs. Peu de systèmes explicitent la coordination de la tâche réalisée entre l'utilisateur et le système informatique. L'architecture multi-agent COrAH, reprend les modèles OrA et JaCaMo pour la collaboration (multi-utilisateur, accessibilité, objets autonomes).*

Mots-clés

SMA, IHM, domotique, collaboration, accessibilité.

Abstract

Smart home systems are distributed and (idealy) enable rich and flexible interaction (devices and users). The challenge is to coordinate diverse (1) devices (inputs and outputs), (2) users'usage and (3) tasks supported by the system. We found multiple work about devices coordination, and interaction with the users. However, we found few publications about managing the task regarding to the users and the devices. The multi-agent architecture COrAH, from OrA and JaCaMo frameworks, enables collaboration (multi-user, accessiblility and autonoms objects).

Keywords

MAS, HCI, domotics, collaboration, accessibility.

1 Introduction

Dans le cadre domestique, le nombre d'objets connectés (IoT) et de dispositifs de domotique continuent d'augmenter [1] (dans le monde : 3.6 milliards en 2015, 13.8 milliards en 2021 [1]). Outre l'accès pour les profils technophiles (e.g. *early adopters*), ces dispositifs devraient être accessibles au plus grand nombre. Cela garantit d'une égalité d'accès à la technologie, l'illectronisme concernant 17% de la population en France en 2019 selon l'Insee [22]. De plus, les technologies d'assistance et de maintien à domicile constituent des champs d'application pour l'IoT et la domotique (e.g. [3, 5, 19]), considérant qu'une personne sur sept était en situation de handicap en 2011 [29]. On observe qu'une grande complexité peut naître de la **diversité des objets connectés** (inputs, outputs, équipements) et de **la diversité des utilisateurs** (préférences, accessibilité, personnes présentes). L'intelligence artificielle (IA) et, en particulier, les Systèmes Multi-Agent (SMA) semblent adaptés pour répondre à ces problématiques [9]. Nous proposons d'exploiter une architecture orientée multi-agent JaCaMo[4], indiquée pour la coordination complexe et robuste de composants modulaires [9]. Nous incluons les utilisateurs comme des Agents du SMA [33], car il réalisent des tâches domotiques au même titre que les objets connectés et autonomes. Un SMA pour le cadre domotique s'explique par : (i) la présence de réseaux d'objets connectés et d'utilisateurs, disparaissant et apparaissant, (ii) la vision parcellaire et la distribution des tâches (agents humains et artificiels). Nous évoquons en discussion la complémentarité d'autres IA.

Dans l'état de l'art, les SMA sont proposés comme solution pour organiser des systèmes d'objets connectés décentralisés (section 2.1), et prendre en compte les utilisateurs (section 2.2). En conséquence, nos contributions sont (fig.1) :

- l'analyse d'un SMA pour la domotique **sous l'angle d'une collaboration humains-machines autour de tâches**, en plus de gérer le cycle de communication humains-machines (perception, action).
- **une proposition préliminaire d'une architecture multi-agent** adaptée du modèle OrA. Quelque soit la tâche, la perception des utilisateurs par les dispositifs techniques s'organise en espace de *production*, la perception des retours informés par les utilisateurs s'organise en espace de *communication*. La répartition des tâches entre humains et dispositifs techniques s'organise en espace de *coordination*,
- **trois scénarios illustratifs de collaboration autour des tâches domotiques**.

1. Source : statista le 26 février 2021 https://www.statista.com/statistics/1101442/iot-number-of-connected-devices-worldwide/

©AFIA2021

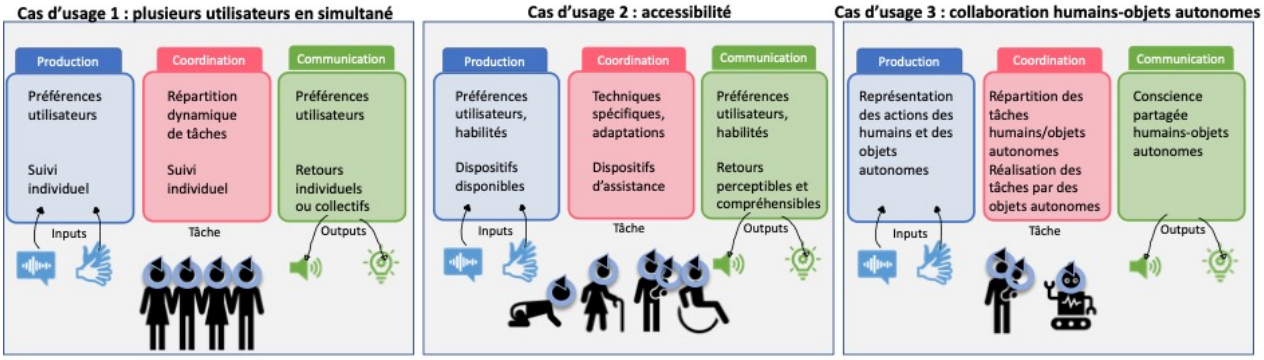


FIGURE 1 – SMA JaCaMo (dimensions VOWELS non représentées) selon trois espaces issus des collecticiels (production, coordination et communication) pour organiser la collaboration en domotique. Cas d'usages illustratifs : 1) utilisateurs présents collaborant ou non sur une tâche de cuisine, 2) prise en compte de stratégies d'accessibilité spécifiques pour les inputs, les outputs et la tâche et 3) collaboration humains-objets autonomes pour la réalisation conjointes de tâches.

2 Etat de l'art

Les dispositifs domotiques lèvent plusieurs difficultés en internet des objets (IoT), en interaction humain-machine (IHM) et en intelligence ambiante (AmI), pour l'adaptation (i) à la diversité des dispositifs [2], (ii) au caractère hétérogène des utilisateurs en limitant les technologies d'assistance mono-personnelles (risque d'isolement dans l'utilisation) [5], et (iii) aux défis pour créer un *«milieu ayant la faculté de percevoir, de raisonner, d'agir et d'interagir afin de fournir des services améliorant la qualité de vie* [8]. Nous abordons dans cette section comment les SMA y répondent.

2.1 Utilisation des SMA pour organiser des systèmes décentralisés en IoT

Les SMA sont exploités pour organiser des systèmes décentralisés, notamment pour l'IoT et la domotique. Charif et Sabouret [7] composent un système de services domotiques en se reposant sur des protocoles d'interaction multi-agents avec le modèle de programmation VDL (View Design Language). Cela permet de raisonner, sous forme de requêtes formalisées, sur des services Agents-Agents [7]. Les agents répondent individuellement à un ensemble de requêtes pour réaliser tout ou partie d'une tâche. Les agents peuvent collaborer entre eux ou prendre des initiatives dans la création de fonctionnalités [7]. Un des avantages de ce système de requêtes est l'intelligibilité de celles-ci pour un utilisateur humain. De manière générale, les SMA amènent une puissance de calcul et de représentation, au service d'une vision d'ensemble de l'utilisation d'objets interactifs [18]. Cela gère l'activité d'une série d'objets virtuels et numériques qui peuvent apparaître ou disparaître à la volée [18]. Ce principe a été appliqué à la détection, au suivi et à la mise en place d'interactivité pour des objets tangibles dans le projet TTT. Les objets connectés tangibles sont tracés de manière unique (présence et localisation) en temps réel grâce à un tag RFID, et peuvent stocker des informations. La couche applicative est composée d'un SMA intégrant une vue globale des objets présents, gérant la détection d'objets et l'affichage de retours virtuels. Ce SMA organise hiérarchiquement et dynamiquement les objets interactifs entre eux et dans leur environnement [18]. L'interaction centrée objet permet paradoxalement de créer une interaction collaborative et multi-utilisateur. En domotique, la réorganisation des composants est également un challenge étudié par Hamoui *et al.*[15]. Dans leurs travaux, les auteurs proposent de contrôler un environnement domotique par un SMA. Les agents contrôlent les équipements de l'environnement et les services afin d'exécuter des scénarios définis par les utilisateurs, dans le but de satisfaire leurs besoins [15]. Ce SMA modifie son architecture pour déployer des composants et des scénarios utilisateurs [15]. Dans ce cadre [14], quatre propriétés sont identifiées pour un système domotique organisant des composants intelligents et des scénarios [17, 27] :

- **configurable** : pour définir des scénarios.
- **décentralisé** : pour être fiable en évitant les pannes et optimisant la performance du système.
- **autonome** : limiter le travail de configuration par l'utilisateur au moment du paramétrage initial.
- **dynamique** : selon changements d'environnement.

Ce système se structure autour de deux types d'agents : les agents *«responsables de l'interaction avec les utilisateurs»* GUIA (Graphical User Interface Agent) et les agents *«de contrôle des équipements»* DCA (Device Control Agent) qui font le lien entre l'environnement et les scénarios [14] . En plus de faire fonctionner différents composants entre eux, les SMA permettent une optimisation de l'utilisation des objets connectés. Martins *et al.* [23] présentent un modèle de maison intelligente contribuant à l'amélioration de la consommation et la distribution énergétique dans un foyer tout en maintenant le confort de l'habitat. Les agents autonomes individuels contrôlent les appareils au sein du foyer et un agent global coordonne des agents individuels selon un compteur d'énergie. Le modèle proposé utilise la plateforme JaCaMo pour la programmation multi-agent :

- **organisation Moise** avec spécifications structurelles (e.g. rôles), fonctionnelles (e.g. plans), et normatives (e.g. obligations contextuelles)

— **agents autonomes BDI** (Belief-Desir-Intention) implémentés en **Jason**
— **environnement** basé sur des artefacts en **CArtAgO**
— **interactions** entre ces éléments

L'organisation générale est gérée au niveau Moise, y compris la hiérarchisation des objectifs de confort et d'économie. Les appareils sont gérés individuellement par des agents Jason en lien avec leurs objectifs énergétiques. Deux types d'artefacts CArtAgO permettent de définir l'environnement en termes (i) de consommation énergétique globale, (ii) selon les cycles horaires. Les SMA permettent d'optimiser un système domotique selon les critères des utilisateurs (préférences) en fonction de l'architecture particulière du système domotique (opportunisme) [10]. L'application d'agents cognitifs de Dujardin *et al.* optimisent et contrebalancent ces valeurs d'opportunisme et de préférence pour chaque action possible d'un système domotique selon des critères. La préférence «écologie» favorisera l'extinction d'appareils [10]. Ce SMA peut également suggérer des actions à l'utilisateur [10] en en explicitant la raison. Une alternative d'optimisation porte sur le diagnostic [25] et l'organisation du réseau lui-même [31]. Les SMA peuvent être résiliants jusqu'à la panne ou déconnexion de k objets physiques [31]. Cela implique : (1) de détecter les composants physiques ne fonctionnant pas, (2) d'identifier les opérations numériques qui étaient prises en charge par ces composants, (3) de répliquer ces opérations numériques, et (4) de les relocaliser au niveau d'un noeud du réseau (i.e. un composant encore fonctionnel dans le réseau IoT), en optimisant les communications nécessaires (*load*)[31]. En résumé, on peut faire «migrer», en cas de panne, les opérations numériques de manière optimisée sur le réseau physique. Les objets connectés ont une dimension «réelle» (ce sont de vrais objets) et une dimension numérique qu'il faut articuler entre elles (niveau objet puis niveau réseau). Schmitt *et al.*[32] explorent ces logiques d'interaction de deux manières dans la plateforme Triskell3S : en répondant aux problématiques d'interaction entre un agent (appelé IoT-a) et un objet connecté, et en étudiant l'exploitation de données hétérogènes et distribuées entre les objets grâce à un SMA. Les interactions du SMA sont affichées sur un mur écran : interactions au niveau des données (agents d'interface), du matériel (IoT-a), des usages (agents humains), et entre ces niveaux[32] . Les retours écrans et les agents IoT-a augmentent l'interaction utilisateur et l'optimisation, aux deux niveaux : objets et réseau.

En étudiant les SMA dédiés à l'organisation de systèmes décentralisés, nous avons pu noter leur utilisation pour :

— le suivi de la présence ou non d'objets interactifs
— la réorganisation dynamique (hétérogénité, suppression et ajout) des composants selon des scénarios
— l'optimisation de la performance d'un réseau d'objets connectés (ex : consommation)
— l'optimisation de l'organisation distribuée d'objets connectés entre eux, e.g. couplé au diagnostic
— l'articulation des dimensions «réelle» et «numérique» des objets connectés

2.2 Utilisation des SMA pour prendre en compte les utilisateurs en domotique

En domotique, un enjeu important est l'intégration de l'activité des habitants [12]. Cela passe par l'identification et le suivi automatique des activités, et par l'adaptation aux habitudes et préférences des habitants, à la dynamique de l'environnement, aux sources de perception ainsi qu'à leurs changements [12, 2]. Le système *Smart Kitchen* [3] organise des composants domotiques grâce à un ensemble de règles et de scénarios d'utilisation. Il est alors possible de faire la même action via une télécommande, une tablette ou interface vocale. Cela peut être étendu ou modifié en ajoutant de nouveaux composants et leurs règles associées, et de nouveaux scénarios [3]. *Smart Kitchen* stocke dans une base de données les traces de l'utilisation du système par l'utilisateur (interaction contextuelle). En comparant l'évolution de ces données dans le temps (e.g l'heure d'utilisation d'un frigo ou la fréquence d'utilisation de la machine à laver), il est possible d'extraire un contexte utilisateur (insomnie, activités domestiques)[3]. Ces données sont transmises à des intervenants (soignants par exemple). L'organisation des composants domotiques évolue selon ce principe.

La sensibilité au contexte est un élément important dans la mise en place de services interactifs (au sens IHM) «adaptatifs» aux habitudes, aux activités, et à l'environnement dans les environnements intelligents [2], par exemple en s'autoconfigurant. Benazzouz [2] spécifie les termes d'*adaptation* comme la personnalisation et la recommandation tandis que l'*adaptation automatique* se distingue par l'analyse du contexte et de l'environnement de l'utilisateur [2]. Le système proposé, découvre et suit des situations en analysant des «données de contexte»[2]. L'analyse algorithmique identifie les situations qui se répètent afin de définir des contextes (habitudes). Par ailleurs, la localisation des habitants est primordiale pour la mise en place d'une interaction contextuelle multi-utilisateurs [13]. Giroux *et al.* offrent ces fonctionnalités avec une architecture multi-agent utilisant des normes Moise. Les agents de localisation se basent sur un système bayésien (Domino librairie Dynamo [30]) pour la reconnaissance d'une suite d'événements et de la présence d'individus spécifiques. Un système de négociation attribue chaque évènement à un agent [13]. Des agents d'environnement sont associés à chaque objet et gèrent les interfaces utilisateurs. Un agent personnel est associé à chaque individu, et intègre son profil, ses activités et ses préférences. Ce profil est transmis aux agents d'environnement proches. Des notions de priorité et d'urgence gèrent les injonctions paradoxales (e.g. avec plusieurs utilisateurs actifs) [13]. Sur le même principe, le système ICEMAS permet la collaboration de multiples utilisateurs, pour «l'amélioration de la vie quotidienne des personnes atteintes de déficiences cognitives» ayant besoin d'une assistance ponctuelle [5]. L'objectif est de «personnaliser» l'habitat en fonction des besoins, de l'assister selon son profil et la présence d'autres utilisateurs, en maintenant une discrétion et une automatisation optimale [5]. Les conflits entre individus sont réglés en comparant préférences et priorités,

©AFIA2021

e.g. en favorisant la personne avec le plus haut niveau d'assistance à un instant donné [5]. La particularité de ce système réside dans la prise en compte des contraintes de gestion globales et individuelles. Par exemple, un son fort la nuit (règle globale) déclenchera des actions hors du simple cadre de l'assistance (règle individuelle)[5]. Kuijpers [19] propose un SMA appliquant des règles de sécurité personnalisées selon le profil médical de l'usager. Le système est structuré par des agents fonctionnant sur le modèle BDI. Des *DeviceAgents* coordonnent les appareils de cuisine et récupèrent des informations par le biais des agents de données (capteurs), selon trois granularités : un DeviceAgent par équipement, un pour chaque fonctionnalité de chaque équipement, et un pour coordonner l'ensemble des équipements. Si un DeviceAgent détecte un changement d'activité, il communique avec les *RiskAgents* (agents chargés des risques), enregistre un changement d'état et une trace d'activité dans un fichier log. Le *UserAgent* identifie les utilisateurs dans l'environnement, charge les profils, déverrouille les appareils de cuisine en fonction de l'autorisation et transmet ces profils aux RiskAgents. Un agent *WatchdogAgent* verrouille les équipements en cas de danger et agit directement sur le matériel en cas de contexte critique. Le système présenté ici (StoveMAS) utilise la plateforme JADE et suit les agents via une interface visuelle sur Android. Toujours sur JADE et proposé par Kuijpers, PADIS adapte les services aux utilisateurs selon leur handicap [20] via le dossier médical rédigé par le médecin (niveau d'assistance et services disponibles), les préférences de l'utilisateur (confort et habitude de vie), le contexte (e.g. heure de la journée). Un système de boucle MAPE-K (monitor, analyze, plan, execute - knowledge) permet de vérifier les services correctement exécutés. La gestion est dite autonome selon quatre concepts : (i) auto-configuration d'appareils lors de leur intégration au système domotique, via des agents BDI, (ii) auto-optimisation de paramètres, (iii) auto-réparation en isolant les services lors d'une défaillance durant la réparation, et (iv) auto-protection, c'est à dire l'autonomie dans la protection contre les dangers externes[20]. Les agents, structurés en groupes représentant les pièces de l'habitat, ont des buts différents. Les agents migrent entre les groupes pour garantir la continuité d'un service. Ce SMA se connecte sur un serveur, une base de données et une application mobile en guise d'interface[20]. La base de données crée une image du contexte des appareils répartis dans l'environnement. Les données des capteurs des dispositifs mobiles connectés sont mises à jour dans la base de données. L'interface propose les services des agents en fonction de la personne et de l'emplacement. Des conflits surviennent notamment lorsque plusieurs utilisateurs se trouvent dans la même pièce[20]. Les SMA étudiés soutiennent l'IHM à travers différents contextes :

— réaliser une même action par plusieurs moyens
— suivre les habitudes de vie (et changements) au travers des traces d'activité des utilisateurs
— identifier des utilisateurs concernés (localisation)
— prendre en compte plusieurs utilisateurs
— déployer des services d'accessibilité, d'assistance.

3 Approche

3.1 Problématique

Nous tentons de répondre à la question suivante : *Quelles sont les exigences auxquelles doit répondre un système dédié à l'organisation d'objets connectés dans un contexte domotique ?* Dans un premier temps, nous identifions les verrous adressés dans la littérature, et indispensable à la bonne gestion d'une application domotique :

1. **coordination et réorganisation à la volée des modalités d'interaction en fonction des objets connectés.** Un système domotique cohérent doit se ré-organiser, avec deux impacts majeurs : **(i)** les moyens de percevoir les utilisateurs, et **(ii)** les moyens de fournir des retours informés aux utilisateurs (selon les dispositifs disponibles)
2. **coordination et réorganisation à la volée des modalités d'interaction en fonction des utilisateurs présents.** Un système domotique cohérent doit se ré-organiser en termes de préférences et d'accessibilité, avec deux impacts majeurs : **(i)** les moyens d'interagir avec les dispositifs, et **(ii)** les moyens de fournir des retours informés en fonction des utilisateurs (selon les utilisateurs présents)

Si l'on se penche sur la définition des termes *coordination* et *collaboration*, nous pouvons mettre en lumière la place centrale de la planification et de la répartition des actions entre les personnes/agents participants [34]. En *coordination*, les tâches sont réparties en avance entre les membres impliqués, alors que la *collaboration* se caractérise par une répartition dynamique des tâches selon les actions en cours [34]. Nous ajoutons donc cette troisième exigence :

3. **la coordination et la réorganisation à la volée des tâches et de la répartition des tâches à réaliser.** L'utilisation d'un système domotique par un utilisateur se fait dans un but donné, autrement dit pour réaliser une tâche. Un système domotique doit pouvoir ré-organiser la tâche en fonction des utilisateurs et des dispositifs présents : prise en charge une partie des activités (automatisation), réorganisation intra et inter-personnelle de la tâche.

Nous avons identifié plusieurs cas d'usages mettant en oeuvre la prise en compte de la tâche dans un cadre domotique : (i) s'adapter à plusieurs utilisateurs en simultané, (ii) s'adapter à différents utilisateurs dans le cadre de l'accessibilité, et (iii) prendre en compte les objets autonomes dans la réalisation de tâches en domotique. Nous présentons, section suivante, l'adaptation du modèle OrA[33] pour la coordination humains-machines en domotique.

4 Proposition préliminaire

4.1 Programmation orienté multi-agent pour la coordination et la collaboration

Nous l'avons vu précédemment, la programmation orientée multi-agent VOWELS [9] indiquée pour la coordination de composants modulaires définit un SMA selon les

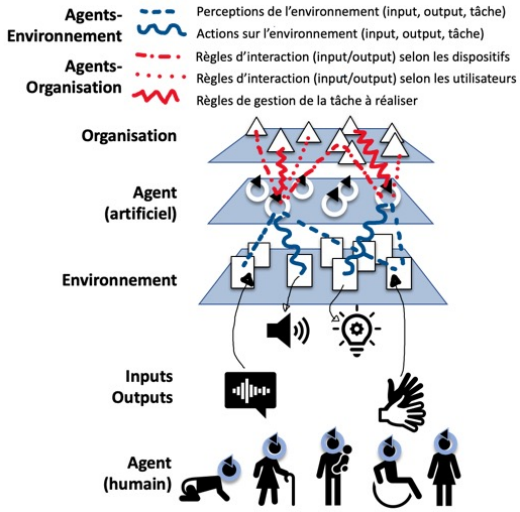


FIGURE 2 – Environnement CArtAgO : les agents humains interagissent (input) ; les Agents Jason perçoivent puis mettent en oeuvre des retours informés perceptibles par les utilisateurs (output). Agents Jason : perçoivent, analysent et génèrent ces informations. Organisation Moise : gestion des différents objets (input, output), des tâches en cours et des utilisateurs. L'architecture s'organisera en trois espaces.

niveaux <A,E,I,O (,U)>, pour Agent, Environnement, Interaction et Organisation ; dans certains cas, le U est ajouté pour les Utilisateurs. JaCaMo implémente ces différents niveaux, qui permettent d'utiliser différents mécanismes directs et indirects de collaboration et de coordination [4]. Les Agents Jason peuvent interagir entre eux, via l'Environnement représenté à travers des artefacts CArtAgO, ou via des organisations normatives Moise, le tout s'organisant autour d'Interactions (figure 2). JaCaMo a été appliqué à l'IHM et à la collaboration dans le modèle OrA [33]. Dans OrA, l'Environnement permet de suivre l'activité en cours en créant des traces d'activité. Les Agents analysent et organisent les modalités d'interaction et de retours informés, et permettent par ailleurs le suivi des actions coordonnées des utilisateurs. Les Organisations permettent aux agents d'adopter des rôles afin de suivre des règles d'interaction, de mettre en place des retours informés et de représenter l'activité collaborative [33]. Dans ce modèle, les Humains sont considérés comme des Agents, même s'ils n'appartiennent pas au système technique, *a contrario* des agents Jason. En particulier, dans le cadre domotique, les agents, qu'ils soient des utilisateurs ou des objets connectés, réalisent une partie des tâches. Le fait de représenter les agents (artificiels et humains) distincts de l'organisation Moise permet la répartition dynamique (spécifications normatives) des tâches représentées dans l'organisation (spécifications fonctionnelles). Les tâches sont déclarées sous forme de sous-buts dans la spécification fonctionnelle Moise, indépendamment des agents. Les agents (humains et artificiels) s'attribuent ces sous-buts à la volée et au fur et à mesure de l'évolution de l'activité et de leurs rôles (figure 4, agents 1,2 et 3). Si un agent disparaît, ces sous-buts sont "libérés" dans l'organisation, et peuvent être ré-attribués. Tout nouvel agent (artificiel ou humain) peut prendre en charge un des sous-buts. Cette vision permet d'intégrer les objets connectés et autonomes comme des acteurs dans les tâches, au même titre que les utilisateurs, et répond partiellement à l'exigence 3 section 3.1. Cependant, l'organisation VOWELS ne permet pas à elle seule de gérer la complexité des échanges Humains-Machines (inputs, outputs et tâche).

4.2 COrAH : Adaptation du modèle OrA

Pour répondre aux exigences de la section 3.1, le SMA s'organise en trois espaces ayant tous la structure VOWELS présentée précédemment : production, coordination et communication. Ces espaces sont issus des modèles de collecticiels Clover [21] et SMA OrA déjà évoqué [33].

Les espaces s'articulent selon le cycle utilisateur (figure 3). L'espace de Production permet à l'utilisateur d'interagir avec le système (exigence 1.i et 2.i section 3.1). L'espace de Communication permet au système d'interagir avec l'utilisateur via des retours informés (exigence 1.ii et 2.ii section 3.1). Entre les deux, l'espace de Coordination est dédié à la tâche attribuée aux agents utilisateurs ou aux agents du système technique (troisième exigence section 3.1). Les appellations peuvent être questionnées (e.g. *production*, et non pas *perception*). Ces appellations respectent la syntaxe du modèle OrA, et Clover. De plus, l'espace de production concerne l'espace de *perception* des agents humains par les agents artificiels ; l'espace de communication est l'espace de *perception* des agents artificiels par les agents humains.

L'architecture SMA présentée, nommée COrAH (Colloraboration d'Organisations Artificielles et Humaines) comporte plusieurs différences avec le modèle OrA originel. En espace de collaboration OrA, les agents sont des agents "mimes" intégrant et exécutant dans un scénario virtuel la tâche demandée par les humains. Par exemple, l'agent *Maire(sse) virtuel* réalisait une *évacuation virtuelle* lorsque l'utilisateur *Maire(esse)* demandait une *évacuation* dans le jeu de rôle interactif. Ici, les agents et les humains se distribuent et réalisent les tâches en espace de Collaboration. En résumé, dans COrAH, les agents artificiels et humains coopèrent via le système. Le lien entre les différents espaces est assuré par la création d'artefacts : la fin de l'activité en production initie une activité en coordination avec un nouvel artefact de coordination créé par un agent de production en espace de coordination (voir [33], p102). Le mécanisme est identique de la coordination vers la communication.

4.3 Scenarios d'illustration en Domotique

Nous illustrons l'utilisation de l'architecture COrAH dans trois scénarios, avec l'apport de la troisième exigence *représentation de la tâche* (coordination), en plus des inputs (production) et des outputs (communication).

Plusieurs utilisateurs en simultané. Le premier scénario (figures 1 gauche et 4 haut) présente le fonctionnement de COrAH dans un contexte multi-utilisateurs. Deux agents humains H1 et H2 collaboreront sur la même recette et un

©AFIA2021

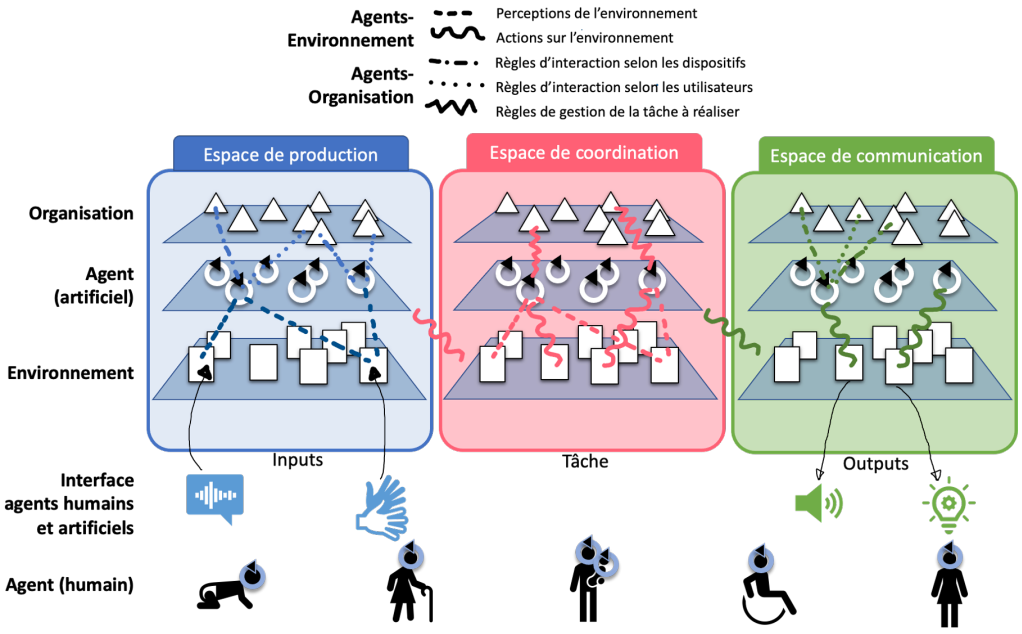


FIGURE 3 – Architecture COrHA : SMA VOWELS présentée est organisée en 3 espaces : production (input), coordination (tâche), et communication (output). **Espace de production :** les inputs utilisateurs, des artefacts dans l'*Environnement*, sont analysés en fonction des dispositifs disponibles et des utilisateurs. Pour cela, les Agents utilisent les Organisations normatives dédiées. Une action de coordination (artefact) est créée. **Espace de coordination :** ces artefacts dans l'*Environnement* (actions utilisateurs), sont analysés en termes de tâches à réaliser. Pour cela, les Agents utilisent les Organisations de coordination pour répartir et suivre les tâches. Une action de communication (output) est créée. **Espace de communication :** les retours informés à donner, représentés sous forme d'artefacts dans l'Environnement, sont générés selon les dispositifs et utilisateurs destinataires. Pour cela, les Agents utilisent les règles dans les Organisations de communication pour générer les outputs appropriés. Les outputs sont mis en oeuvre dans l'environnement.

troisième H3 fait une autre activité de nettoyage. **Etape 1 :** H1 suit une recette, les buts du plan Moise *Recette* (Coordination) lui sont attribués. H3 est un intégré à un plan de nettoyage *Ménage*. **Etape 2 :** H2 s'inclut dans la tâche de cuisine. Les buts du plan *Recette* en Coordination sont redistribués entre H1 et H2. Prioritairement, les tâches en cours restent attribuées à H1, et les buts parallèles sont répartis entre H1 et H2 pour limiter les interdépendances. H3 ne note pas de changement.

Accessibilité. Ce second scénario (figures 1 centre et 4 haut et bas) présente des adaptations en Coordination pour l'accessibilité via deux mécanismes : l'adaptation de plans Moise, et l'intégration des outils d'assistance. Suite au scénario 1, il se trouve que H2 a des déficiences visuelles et met en oeuvre des stratégies particulières dites d'AVJ (autonomie de la vie journalière). Par exemple H2 organise spatialement un plan de travail avant de commencer une recette. **Etape 1** : le but "Blancs en neige" de H2 active le plan "Blancs en neige A" (figure 4), intègrant les techniques d'AVJ. Le plan "Blanc en neige B" aurait été utilisé par H1 sur cette même tâche. **Etape 2** : Une technologie d'assistance peut réaliser une partie des tâches. Un agent artificiel A4 surveille la cuisson (cf scénario suivant). Ici, le système active en coordination des stratégies d'AVJ, puis collabore avec l'utilisateur en réalisant une partie des tâches de la recette (surveillance optique de la cuisson). Afin d'adapter le système au contexte utilisateur, l'accessibilité pour les déficiences visuelles est optimisée via les modalités d'interaction cohérentes en Production (interaction vocale par exemple) et en Communication (réglage de l'écran, son spatialisé, description adaptée).

Coordination entre agents humains et objets autonomes Ce troisième scénario (figures 1 centre et 4 haut) présente la prise en charge de buts en Coordination entre H1, H2 et A4, en attribuant la réalisation des tâches aux agents humains et artificiels sans distinction. **Étape 1 :** H1 et H2 réalise une recette selon le plan *Recette* dans l'organisation de Coordination. **Étape 2 :** Certains sous-buts sont réalisables par des agents, par exemple surveiller la cuisson. Ce but est attribué à l'agent artificiel A4 au lieu de H1 et H2. Ici, en plus d'une répartition des tâches, le système met en place une conscience partagée en informant les agents humains (Communication).

Synthèse. L'apparition et la disparition de dispositifs ou d'utilisateurs sont gérés à la volée dans les trois espaces. La réorganisation des plans en temps réel étant dissociés pour chaque espace (de production, de communication, de coordination), permettant une réorganisation des inputs, des outputs et des tâches indépendamment. La boucle dialogique (la communication entre agents humains et artificiels) s'ar-

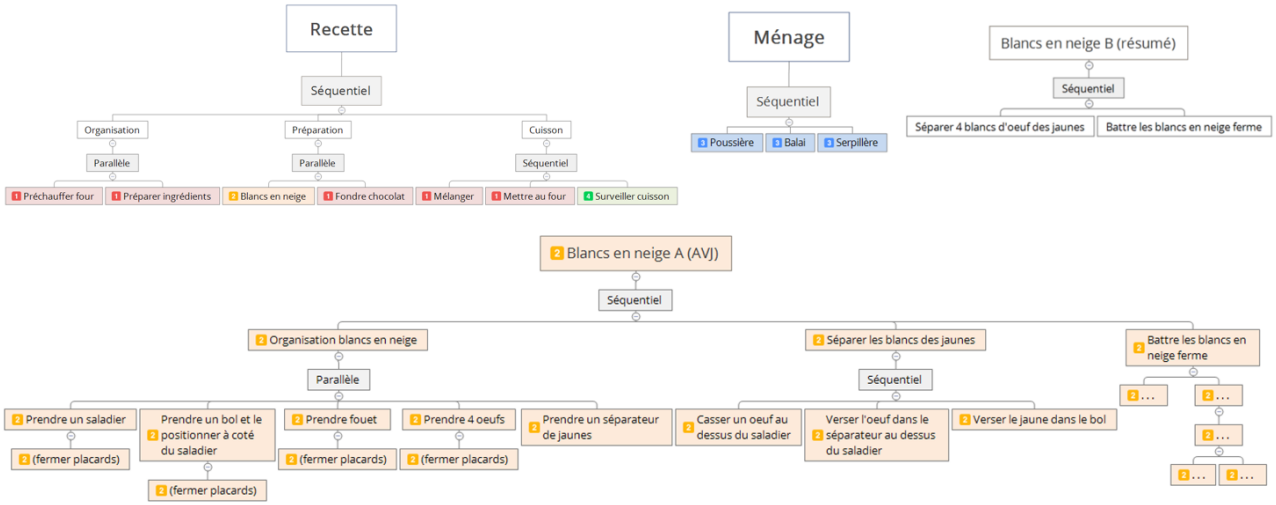


FIGURE 4 – Spécifications fonctionnelles des scénarios illustratifs. Les numéros représentent les agents (1, 2, 3 et 4) à qui seront attribués les sous-buts via les normes. La spécification *Recette* sera repartie entre deux utilisateurs (1, 2) et un agent artificiel (4). Le but *Blancs en neige* sera déclinée en version adaptée *Blancs en neige A (AVJ)*, au lieu de la version résumé *Blancs en neige B (Résumé)*. L'utilisateur 3 fait une autre tâche *Ménage*.

ticule en trois temps. La perception des agents humains par les agents artificiels est ainsi intégrée dans l'espace de production. La prise en compte de l'activité des agents se fait en espace de coordination. Enfin, les retours informés des agents artificiels vers les agents humains sont gérés en espace de communication. L'agent humain perçoit l'information des agents artificiels (retour informé), comprend ce retour et communique aux agents artificiels (retour à l'espace de production). Par exemple, les interactions vocales avec l'utilisateur passent par la captation sonore de l'agent humain. Cette captation sonore est analysée en espace de production en speech-to-text. L'analyse contextuelle de l'information sonore intégrée en espace de production se fait en espace de coordination. Le retour audio (ou autre modalité) vers l'humain est fait en espace de communication. Il est possible d'instancier le paradigme de l'intervention [16] de l'utilisateur via un tableau de bord qui agit directement sur les normes. Plus spécifiquement, un système domotique est intéressant s'il permet un haut niveau d'automatisation, tout en permettant à l'utilisateur d'intervenir. Ici, les agents BDI du SMA peuvent réaliser leurs objectifs, et intégrer les objectifs des agents humains lors de leurs interactions. L'activation et la désactivation de ces normes via un tableau de bord permet la modification du fonctionnement ou de l'analyse de la situation par le système (pour un exemple, voir [33], p 173 figure 4.16 ou p 169 figure 4.12).

5 Discussion et Perspectives

Les systèmes domotiques mobilisent de nombreux concepts à articuler : des objets connectés avec inputs, outputs, et services ; ainsi que des agents humains et artificiels. Nous tentons d'y répondre avec le modèle COrAH, articulant les inputs en espace de Production, indépendamment des outputs en Communication et la tâche pour laquelle est conçu le système en Coordination. Le modèle COrAH actuel permet de représenter explicitement des spécifications normatives, mais n'en apprend pas de nouvelles. Les agents n'ont pas non plus de mécanismes d'apprentissage. D'autres approches en IA pourront être intégrées. Le système *IRON* permet de générer automatiquement des normes sans conflit [26]. Mazac [24] propose en domotique une architecture multi-agent qui applique les principes d'apprentissage sensorimoteur (observation et intégration des signaux de l'environnement). Chaouche [6] présente des mécanismes de sélection de plans existants et d'exploration de nouveaux plans par des agents BDI selon le contexte spatio-temporel en domotique. Une autre perspective est de ré-organiser les plans existants, en appliquant les principes d'IA traditionnelles. Par exemple, la méthode formelle Universal Method-Composition Planner [11] permettrait de redéfinir une planification (selon le matériel, les utilisateurs, le contexte) des tâches primitives en production, en coordination et communication, parmi l'ensemble des plans et de leurs décompositions disponibles. Les méthodes de planification automatique sont typiquement applicables aux tâches avec des contraintes d'ordre d'exécution et d'interdépendance, avec notamment les méthodes de type SHOP [28]. Enfin, nous n'abordons pas dans ce travail les questions du diagnostic, de la migration de services et de la modification de règles en fonction de pannes ne sont pas explicitement traitées ; ni l'identification du profil utilisateur.

Le modèle COrHA fonctionne théoriquement. La réalisation d'un simulateur est en cours pour valider expérimentalement le système proposé, à travers des cas d'usage.

Remerciements

Nous remercions la Plateforme M@D, la Fondation UBS et l'UCO-BS pour le soutien humain et financier.

©AFIA2021

Références

[1] T. Alam. A reliable communication framework and its use in iot. *CSEIT*, 10 :450–456, 2018.

[2] Y. Benazzouz. *Découverte de contexte pour une adaptation automatique de services en AmI*. PhD thesis, Saint-Etienne, EMSE, 2011.

[3] R. Blasco, A. Marco, R. Casas, D. Cirujano, and R. Picking. A smart kitchen for ambient assisted living. *Sensors*, 14(1) :1629–1653, 2014.

[4] O. Boissier, R. H Bordini, J. Hübner, A. Ricci, and A. Santi. Multi-agent oriented programming with jacamo. *Sc. of Computer Prog.*, 78(6) :747–761, 2013.

[5] M. Castebrunet. *Etude et conception d'un système de personnalisation et d'aide fonctionnelle multi-agents permettant d'assister simultanément de manière transparente les activités de vie quotidienne de multiples personnes dans un Habitat Intelligent pour la Santé*. PhD thesis, Univ. de Sherbrooke, 2011.

[6] A.C. Chaouche. *Une approche multi-agent pour la conception de systèmes d'AmI : Un modèle formel intégrant planification et apprentissage*. PhD thesis, Univ. P-M. Curie et Constantine 2, 2015.

[7] Y. Charif and N. Sabouret. Protocole d'interaction pour la composition de services dans l'intelligence ambiante. *JFSMA*, pages 253–266, 2006.

[8] J. Coutaz and J. Crowley. Plan "intelligence ambiante" : Défis et opportunités. document de réflexion conjoint du comité d'experts informatique ambiante st2i et du gt intelligence ambiante gcs3, 2008.

[9] J. Da Silva and Y. Demazeau. Vowels co-ordination model. In *AAMAS*, pages 1129–1136, 2002.

[10] T. Dujardin, J. Rouillard, J-C. Routier, J-C. Tarby, et al. Gestion intelligente d'un contexte domotique par un sma. *JFSMA*, pages 137–146, 2011.

[11] K. Erol, J. A Hendler, and D. S Nau. Umcp : A sound and complete procedure for hierarchical task-network planning. In *Aips*, volume 94, pages 249–254, 1994.

[12] M. Gallissot, J. Caelen, F. Jambon, and B. Meillon. Une plate-forme usage pour l'intégration de l'informatique ambiante dans l'habitat : Domus. *Techniques et sciences informatiques*, 2013.

[13] S. Giroux, M. Castebrunet, O. Boissier, and V. Rialle. A multiagent approach to personalization and assistance to multiple persons in a smart home. In *Workshops at AAAI*, 2014.

[14] F. Hamoui, M. Huchard, C. Urtado, and S. Vauttier. Specification of a component-based domotic system to support user-defined scenarios. In *SEKE*, 2009.

[15] F. Hamoui, M. Huchard, C. Urtado, and S. Vauttier. Un système d'agents à base de composants pour les environnements domotiques. In *LMO*, page 35, 2010.

[16] T. Herrmann, A. Schmidt, and M. Degeling. From interaction to intervention : An approach for keeping humans in control in the context of socio-technical systems. In *STPIS@ CAiSE*, pages 101–110, 2018.

[17] T Kirste. Smart environments and self-organizing appliance ensembles. *True Visions, Springer*, 2005.

[18] S. Kubicki, S. Lepreux, C. Kolski, C. Perrot, and J. Caelen. Tangisense : présentation d'une table interactive avec technologie rfid permettant la manipulation d'objets tangibles et traçables. In *IHM*, 2009.

[19] N. Kuijpers. *Système autonome de sécurité lors de la préparation d'un repas pour les personnes cognitivement déficientes dans un habitat intelligent pour la santé*. PhD thesis, Univ. Bretagne Sud, 2017.

[20] N. Kuijpers, S. Giroux, F. de Lamotte, and J-L. Philippe. Proposal of an adaptive service providing system for a multi-user smart home. In *AAAI*, 2016.

[21] Y. Laurillau and L. Nigay. Clover architecture for groupware. In *ACM CSCW*, pages 236–245, 2002.

[22] S. Legleye and A. Rolland. 1 personne sur 6 n'utilise pas internet, plus d'un usager sur 3 manque de compétences numériques de base. *Insee*, N° 1780, 2019.

[23] R. Martins and F. Meneguzzi. A smart home model using jacamo framework. In *INDIN*, page 94, 2014.

[24] S. Mazac, F. Armetta, and S. Hassas. Approche décentralisée pour un appr. constructiviste en env. continu : application à l'intelli. ambiante. In *JFSMA*, 2015.

[25] N. Meliti. Architecture basée agents pour le diagnostic d'un systeme d'iot. *Mémoire de Master en Info., Univ. d'Oum Bouaghi Larbi Ben M'hidi*, 2017.

[26] J. Morales, M. Lopez, J. A Rodriguez, M. Wooldridge, and W. Vasconcelos. Automated synthesis of normative systems. In *AAMAS*, pages 483–490, 2013.

[27] M. Nakamura, H. Igaki, H. Tamada, and K-I. Matsumoto. Implementing integrated services of networked home appliances using service oriented architecture. In *ISCOC*, pages 269–278, 2004.

[28] D. Nau, T-C Au, O Ilghami, U. Kuter, D. Wu, F. Yaman, H. Munoz, and J. Murdock. Applications of shop and shop2. *Intelligent Systems*, 20(2) :34–41, 2005.

[29] OMS. *World report on disability*. 2011.

[30] Y. Rahal, Ph. Mabilleau, and H. Pigot. Bayesian filtering and anonymous sensors for localization in a smart home. In *AINAW vol.2*, pages 793–797. IEEE, 2007.

[31] P. Rust, G. Picard, and F. Ramparany. Resilient distributed constraint optimization in physical mas. In *ECAI*, 2020.

[32] A. Schmitt, F. Carlier, V. Renault, and P. Leroux. Communication multi-niveaux pour des iot-a. In *RJCIA*, 2017.

[33] L. Thévin. *Un SMA normatif pour le soutien évaluatif à la collaboration humain-machine : application à la gestion de crise*. PhD thesis, Grenoble Alpes, 2016.

[34] X. Yao, M. Turoff, and R. Hiltz. A field trial of a collaborative online scenario creation system for emergency management. In *ISCRAM*, volume 1, 2010.

Delay Aware Universal Notice Network: Real world multi-robot transfer learning

S. Beaussant[1], S. Lengagne[1], B. Thuilot[1],O. Stasse[2]

[1] Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP,
[2] LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS

[1]firstname.surname@uca.fr
[2]olivier.stasse@laas.fr

Résumé

Un problème majeur lors du passage de la simulation à la réalité est le retard sur le robot physique qui peut détériorer les performances de l'agent déployé. En outre, une fois qu'une politique de contrôle basée sur l'apprentissage a été entraînée avec succès, la réaffectation des connaissances acquises par l'agent pour permettre à un agent structurellement distinct d'effectuer la même tâche est dangereuse si elle est effectuée naïvement. Dans ce travail, nous abordons les problèmes ci-dessus avec une seule méthode, le DA-UNN (Delay Aware Universal Notice Network), qui décompose les connaissances en modules spécifiques au robot et à la tâche pour un transfert rapide. Notre méthode traite les retards immanents aux systèmes physiques afin d'améliorer le transfert sim2réel. Nous évaluons l'efficacité de notre approche en utilisant des robots simulés et réels sur une tâche de manipulation dynamique où la gestion des délais est cruciale.

Abstract

One major issue for the simulation to real world transfer is the delay on the physical robot that may deteriorate the performance of the deployed agent. Furthermore, once a successfully trained learning-based control policy is available, re-purposing the knowledge acquired by the agent to enable a structurally distinct agent to perform the same task is hazardous if done naively. In this work, we address the above issues with a single method, the DA-UNN (Delay Aware Universal Notice Network), which decomposes the knowledge into robot-specific and task-specific modules for fast transfer. Our framework deals with delays immanent to physical systems in order to improve sim2real transfer. We evaluate the efficiency of our approach using simulated and actual robots on a dynamic manipulation task where delay management is crucial.

Keywords

Transfer learning, Sim2real, Reinforcement learning, Robotic task, delay

1 Introduction

The Reinforcement Learning (RL) field has been successfully applied to a wide range of problems in the past years, demonstrating both its versatility and efficiency. The robotic domain in particular benefited from the tremendous progresses made in RL as shown in recent work for quadruped robots[1] even succeeding in very intricate manipulation tasks such as solving a rubik's cube with a shadow hand [2]. However, despite great achievements, RL suffers from very low sample efficiency, which means that a large amount of interactions with the environment is needed to obtain a high-performance policy. One way to mitigate this issue is through the use of transfer learning which alleviates the burden of training models from scratch by re-purposing knowledge acquired on another domain.

Nevertheless, in the context of RL, the neural network architectures are too shallow and do not encourage knowledge segmentation as it is often the case in large Computer Vision models [3]. As a consequence, if no particular precaution is taken, the unconstrained backpropagation procedure may result in an entangled knowledge representation. In this setting, it is difficult to determine which part of the network is relative to the task or the robot, making a partial or total transfer of the policy network hazardous if done naively and with very low chances of success.

The UNN (Universal Notice Network) framework introduced in [4] tackles this issue by implementing the idea of knowledge segmentation between the agent and the task. More precisely, the purpose of the UNN framework is to enable multi-task and multi-robot transfer by creating a reusable and robot-agnostic module of skills. Previous work [4] already demonstrated the efficiency of UNN transfer in simulation on a wide variety of tasks and robots morphology, exhibiting zero-shot performance in some cases. By applying the same transfer method on real world robots, we wish to find out if results obtained in simulation generalize well to the real world.

However, simulation to real world transfer (also called sim2real in the literature) is still an open problem. In general, simulations are imperfect and difficult to calibrate. The resulting modeling discrepancies cause a reality gap, which

©AFIA2021

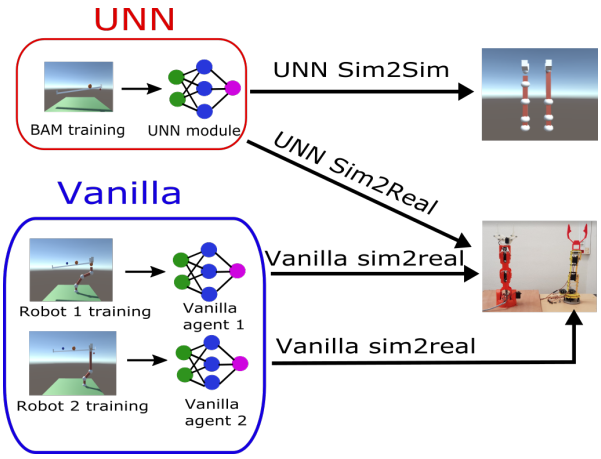


FIGURE 1 – Transfers considered. UNN module is trained with the BAM robot and then transferred to all robots. Vanilla agents are trained directly on the simulated robots and then transferred on the corresponding physical robots.

makes the transfer of RL policies from simulation to the real-world non-trivial. Sim2real is especially appealing as offers an efficient alternative to expansive real world data collections for learning complex robotic skills by training in a general-purpose simulator. However, most of the time, methods focus solely on domain adaptation between the real world and the simulation [5],[6]. They tend to ignore troublesome hardware specific issues such as control latency. Consequently, the policy obtained by training in simulation could be drastically disturbed once transferred in the real world if the task requires short reaction time.
In this paper, we consider the time delay associated with the physical system as another model's input by including it in the observed state. At training time, we randomize the value of the delay and show that the agent is able to adapt to multiple delays on a dynamic and delay-sensitive manipulation task.
Our contributions are as follows :

1. We present and evaluate a delay-aware method to deal with the immanent delay on real hardware, thus furthering the adaptation capabilities of the UNN.
2. We evaluate the benefits of the UNN multi-robot transfer method over a vanilla transfer on real world robots. A pool containing four differently shaped real and virtual robots will solve a dynamic manipulation task they have not been trained on, by using the knowledge created by another agent as depicted in Figure 1.

2 Related Work

Transfer learning in RL has been recognized as an important direction towards building more sophisticated agents. For instance, multi-task learning aims at improving robots versatility via methods such as meta-learning [7],[8]. Another interesting approach is to hierarchically decompose complex problems into tractable, simpler and reusable modules of skills through the use of concept networks [9].

Transfer between morphologically distinct robots on the other hand, is currently less studied in the scientific literature. A method proposed in [10] encapsulates and leverages skills learned by a task expert by using GAN's discriminators as support for the knowledge transfer. Work by Gupta and Devin [11] presents a method to learn an invariant feature space for transferring skills between different robots. Other work by the same authors [12] uses a modular approach by training policy modules that are decomposed over robots and tasks. The UNN method used in this work, while very similar, differs from the prior method by explicitly defining the state shared between the task-specific and robot-specific modules. This choice suppresses the need of relying on a shared latent space between robot and task which may be prone to over-fitting if the number of available modules is too low. Furthermore, in the UNN framework, the task module can be trained separately and only once, thus creating a truly robot-agnostic module while saving the time and trouble of having to train multiple possible pairs of the training set.

Several methods has been proposed to deal with delays in robotic. In [13], the authors proposed a neural network based method to address the control delay issue. A predictor, approximated by a neural network, must infer the current state of a fast moving robot by observing a vector of stacked outdated states. To account for the imperfect actuators of the real hardware, authors of [2] introduced action delays with a probability of 0.5 at the beginning of every simulation training episode of a neural network with a LSTM layer. By doing so , they force the memory enhanced neural network to adapt to action delays. A cornerstone paper in RL with delay [14] learns a model of the undelayed Markov Decision Process (MDP) to simulate the most likely state in which the agent currently is, given the last observed (delayed) state and the k last actions taken since, k being the delay in timestep. This allows the agent to take decisions based on the expected current state rather than an outdated state, effectively undoing the harmful effect of delays. They also introduced the concept of Constant Delayed MDP used in section 4.1.

3 Universal Notice Network

3.1 The UNN pipeline

Instead of learning a single policy that will have to handle both robot control and task resolution, the UNN method [4] relies on an explicit decomposition between task-specific and robot-specific knowledge as depicted in Figure 2. In this modular approach, a model of the task, the *UNN* (Figure 2) is created in such a way that any robot, regardless of its morphology, number of articulations or actuators can efficiently benefit from it. This is similar to creating a notice containing a set of high level instructions, that any kind of robot could follow to solve a given task. It is primary to

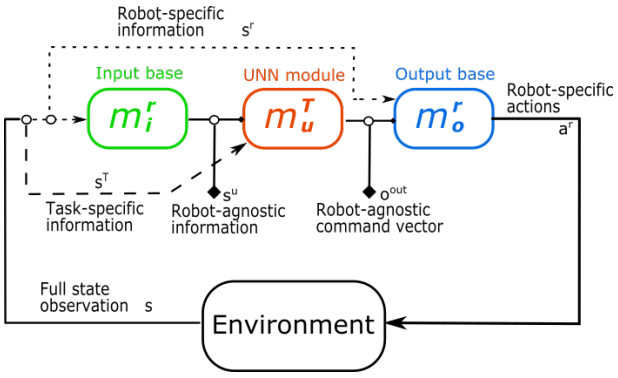


FIGURE 2 – Schematic representation of the UNN[4]

.

ensure that the robot has the mobility and capacities required to comply with the UNN instructions and accomplish the task. Defining R the set of feasible actions the robot can produce and U the set of actions required by the UNN to perform a task, we assume in this paper that the robot can perform the required actions, as sum up in :

$$U \subseteq R \tag{1}$$

Once this assumption is verified, two conditions are essential :

— First, the UNN module must be robot-agnostic to enable multi-robot transfer. This implies that robot-specific observations have to be translated into a feature space shared by the considered robots before being fed to the UNN module.

— Secondly, it is necessary to design a controller that will map the UNN commands from the shared feature space into low-level, robot-specific actions that the robot can execute.

These two requirements are handled by two additional modules inherent to the robot morphology called the *bases*. They are paired with the UNN and serve as an interface between the robot and the task module. More formally, the three modules form a pipeline composed of the input base m_i^r and the output base m_o^r, specific to the robot, which handle respectively the first and the second conditions, and the UNN m_u^T robot-agnostic and specific to the task only. In this setting, the state vector that is provided by the environment at each timestep can be split into two parts s^r, s^T, respectively holding data intrinsic to the considered robot and task-related information, independent from the agent. The input base m_i^r receives s^r to compute :

$$s^U = m_i^r(s^r) \tag{2}$$

which can be considered as robot-agnostic. The input base m_i^r is thus responsible for mapping the robot space to the shared feature space where the UNN operates. The next processing stage is the UNN module (i.e. the task module), conditioned by the task related observation s^T and the processed agent representation vector s^U. It then computes :

$$o^{out} = m_u^T(s^T, s^U) \tag{3}$$

where o^{out} is the command vector in the shared feature space. Finally, o^{out} is then re-mapped to the robot space by the output base with the following transformation :

$$a^r = m_o^r(o^{out}, s^r) \tag{4}$$

which yields a^r the effective action taken by the robot. In other words, the UNN module focuses solely on solving the task at hand, ignoring low level considerations such as the robot's DoF and shape, handled by the bases. This approach makes it possible to create a reusable module of skills that can be transferred to structurally different robots as long as their bases are available. It is then possible to build a library of UNN modules and robot's modules, draw any subset of interest from it and combine a UNN/Bases pair into a novel fully functional policy.

3.2 Modules training

In practice, each of the three sub-modules m_i^r, m_u^T, m_o^r can be either learned or obtained via analytical methods.

3.2.1 Bases modules

In the case where bases are obtained using neural networks, they can be trained on a suitable primitive task to acquire basic motor skills. Another alternative is to collect a dataset of trajectories of the robot and fit a regression model with supervised learning techniques. A last alternative, used in this work, consists to use analytical models for the robots bases.

3.2.2 UNN module

The UNN module (or task module) can be trained with or without the bases modules. In the first case, the UNN is coupled with a robot and its associated bases. The UNN interacts with the environment through the bases and its error on the task is back propagated through the network. In this case, we affect only the UNN module weights. However, the UNN module may then take advantage of the robot hardware structure to achieve the task (for instance, blocking an object between two articulations). As a consequence, the UNN may favor certain body configurations which may be detrimental for transfer. This issue is solved by using the Base Abstracted Modeling (BAM) method [15]. It assimilates the robot to its effector by setting m_i^r and m_o^r to identity mappings, thus making no assumption on the robot's constitution and preventing any bias related to the bases. This is equivalent to considering a purely virtual and free-flying robot. Using BAM enables faster convergence of the policy and a more defined knowledge segmentation, which in turns improves UNN transfer.

4 Delay Aware Universal Notice Network

4.1 Constant Delayed Markov Decision Process

The standard UNN proved its efficiency and versatility on a broad panel of tasks in simulation. However, these results

©AFIA2021

were obtained with perfect robots (e.g no offset and no delay) acting in a standard Markov Decision Process (MDP). Traditionally it is assumed in RL that at every timestep, the environment pauses while the agent receives the current observation, in order to derive an action that will be executed without delay. Of course, things do not behave this way in the real world. All agent observations and actions are delayed by an amount depending on the hardware used for the task. Therefore, an agent trained in simulation without exposition to delays will perform worse or even fail in the real world if no precaution is taken.
This brings up the need to adopt a different decision process modeling to solve tasks in the presence of delay. As we consider the delay to be constant, we found the Constant Delay MDP formulation introduced in [14] to be well suited. A CDMDP defines the delay d as the number of timesteps between an agent occupying a state and receiving its feedback from the environment, where $d \in \mathbb{R}^+$. The delay is assumed to be part of the environment. A known result in CDMPD is that observation delay and action delay are equivalent from the agent's point of view [16]. Hence, we treated the total delay as being entirely caused by observation delay (see Figure 3).

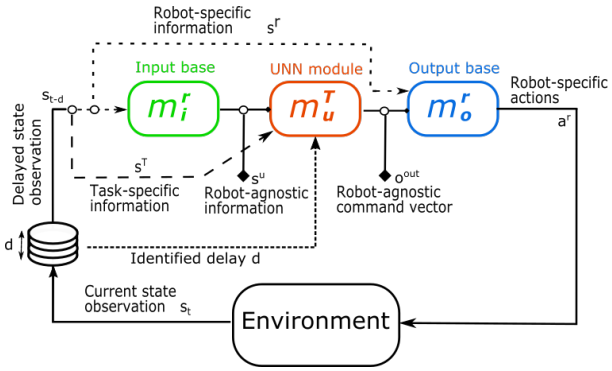


FIGURE 3 – Schematic representation of the delay aware UNN. Observations are queued into a pile of length d and each timestep, the observation at the top is fed to the agent (first in, first out).

4.2 Delay Aware UNN

A CDMDP can be transformed into a regular MDP by enlarging the state space with a history of the d last actions taken since the last observation. This transformation allows theoretically to derive an optimal policy for the CDMDP considered [17]. However, this approach does not allow direct transfer between systems with different delays as the input dimension depends on d. In this work we address the delay issue by augmenting the state space of the UNN module with the estimated delay of the system and by training the agent on a corresponding delayed environment as depicted in Figure 3. A key feature of the UNN is its ability to adapt to any robot regardless of its morphology. To keep this idea of "universality", the delay was randomized during training to ensure that the UNN can adapt to a wide range of delay. By giving it access to the immanent delay, we enable the UNN to act accordingly and to develop predictive capabilities. Thus, we add d to the task specific observations.
During training, the delay is sampled regularly from a discrete uniform distribution as $\mathcal{U}(d_{min}, d_{max})$ where d_{min} and d_{max} are respectively the minimum and the maximum delay considered for the environments. Since there is no assumption about the systems, we assumed a uniform distribution of the delay. But any knowledge could be used to deduce a better delay distribution. When deployed, the identified delay of the system is fed to the UNN, so it can act accordingly. While our approach can only yield sub-optimal CDMDP policies due to the incomplete state space considered, we believe that it represents an interesting trade-off between optimality and flexibility. This very simple method can improve drastically the performance of an agent on a delayed MDP as presented in section VI, given that the delay has been accurately determined and is suited for transfer on systems with different delays.

5 Experimental setup

5.1 System Architecture and Robots

In this section, we briefly present the different robots adopted throughout these experiments. We tested our method on both physical and simulated robots to demonstrate its efficiency and versatility. The physical robots used were a serial arm braccio robot with 5 DoF and a 4 DoF serial arm . These DIY robots are cheap and usually hard to work with, given their low reliability. Still, we manage to use them efficiently in our experiments. We also considered their simulated counterparts.
To sum things up, 5 different kinds of robots were used :

- **BAM** : the virtual BAM robot with the identity bases.
- **Robot 1** : the virtual braccio robot.
- **Robot 2** : the virtual 4 DoF robot.
- **Robot 3** : the physical braccio robot.
- **Robot 4** : the physical 4 DoF robot.

A fixed webcam was used to obtain the required pose estimations with OpenCV. The control frequency was 10 Hz, which means the agent was observing the environment state and acting every 0.1 second. The nominal delay was in average 300 ms on the physical systems. We identified the delay by measuring the time between a command send to the robot and the observation by the agent that the robot moved. On the simulation side, agent's training was performed in simulation using the Unity physic simulator with the ML-agent package introduced in [18], a set of convenient tools for RL with a complete and reliable implementation of several RL algorithms. The PPO algorithm[19] was used to create the neural network policies, as it provides a monotonous performance improvement while being perfectly adapted to continuous action spaces. On-policy algorithm are also known to deal better with delays. We trained four kinds of agents :

- **Delay Aware UNN Agent :** The BAM virtual robot is trained in simulation with exposition to randomized delays to create the UNN.

— **Delay Aware Vanilla Agent :** The agent is trained from scratch directly on the simulated robot, with exposition to randomized delays.
— Finally, we also considered their **delay unaware** counterparts, trained without exposition to delays, in order to display the benefits of our delay management approach.

These agents will be used for the transfers detailed in section 6.2 (see Figure 1).

5.2 Task description

We display our method benefits on a 2D manipulation task (planar task), where a robot needs to keep a ball at a desired position on a gutter. In this regard, only 3DoF were required for the physical robots (base rotation and wrist roll unused). To further increase the gap between both robots, the Robot 4 was used as a 2 DoF robot (wrist pitch unused). The gutter is fixed at one end and held at the other end by the robot's effector which therefore decides of its orientation and, as a consequence, of the position of the ball (see Figure 4). This task can be formalized with the following MDP :

State : $s_t \in \mathbb{R}^{4+1}$: the ball position and velocity on the gutter, the effector height, the desired ball position and the system delay d for the delay aware agents.

Action : $a_t \in \mathbb{R}^n$ is the target joints position (n being the number of considered joints). However, the vanilla agent was not making any progress with a full access to the action space. Indeed, to balance the ball on the gutter, it is first needed to hold it properly. These desired body configurations are just a fraction of the full state space and it is very unlikely to discover them without any prior knowledge of the task. To ease the vanilla agent learning process, its action space was constrained to output joints offsets values w.r.t a reference joints position which maintained the gutter in an equilibrium position.

Reward :

$$r_t = \begin{cases} r - \beta|\theta_e| & \text{if } d_{des,b} < \delta \\ -\alpha d_{des,b} - \beta|\theta_e| & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

where r is a small positive reward, δ is the positive reward area and $d_{des,b}$ is the distance between the ball and the desired ball position. $|\theta_e|$ is the angle between the effector pose and the vertical plane, α and β a weighting constant. This penalty ensures that the effector is in the right orientation to hold the gutter properly for the vanilla agent. The effector orientation constraint for the UNN is handled by the output base, which means that β is set to zero when training the UNN.

5.3 Delay Aware UNN creation

Creating the UNN module means training an agent to balance the gutter and keep the ball at the desired position. As the BAM method showed better transfer results [15], we decided to use it to create the UNN module. In this setting the robot is assimilated to its effector and the UNN output $o^{out} \in \mathbb{R}$ is a single value indicating at what height below or above the horizontal reference position of the gutter the effector should be. To take actions, the agent observes s^T, specific task information as well as the effector height given by $m_i^r(s^r)$. For this task, we chose the intermediate state s^u and o^{out} shared between the UNN module and the bases to be the effector position. The UNN module was receiving an extra input $d \sim \mathcal{U}(0.1, 1)$ representing the current delay of the system during training. A delay range between 0 and 1 is recommended as it corresponds to a normalized input. In our case, it also corresponds to our actual delay in second, with 0.1s being the smallest delay possible for our control frequency. The delay was created on the simulator by stacking the observations in a FIFO buffer, before feeding them to the UNN module.

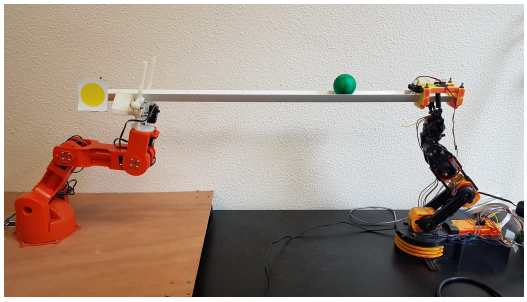


FIGURE 4 – Physical experiments setup. Left robot will perform the task, while the right robot is used only to hold one end of the gutter.

6 Results

In this section, we present our results both on training and transferring on the chosen manipulation task. In particular, we compare the UNN agents with the vanilla agents with and without delay awareness. For further experiments, delay was added artificially to the real system with the same FIFO method seen in section 5.3. Code can be found at github.com/sabeaussan/DelayAwareUNN. Videos showing our results are available here.

6.1 Training

During the training, the desired ball position and system delay (for delay aware agents) were regularly changed to improve the adaptive capabilities and re-usability of the UNN. More precisely, a new delay d was sampled from $\mathcal{U}(0.1, 1)$ every 15 episodes. The desired ball position given to the model, varying between 20% and 80% of the gutter length, was also sampled from a uniform distribution $\mathcal{U}(0.2, 0.8)$ every 1000 training steps. Both the BAM agents and the Vanilla agents were trained for 4 millions steps. Figure 5 shows the cumulative reward obtained per episode. Only the term $d_{des,b}$ (distance between the ball and the desired position) common to both reward functions was considered for the comparison, as it reflects the agent overall progression on the task. As shown in Figure 5, the BAM agents in both settings converge slightly faster than their vanilla counterparts. The BAM agents focus solely on the task, leaving robot specific considerations to their bases. This decomposition of the learning problem similar to hierarchical RL eases the learning process. It is also worth noting that introdu-

©AFIA2021

cing varying delay during training reduces the convergence speed, as the task becomes more challenging. However, in the UNN framework, this training overhead is outweighed by the increased reusability of the UNN module.

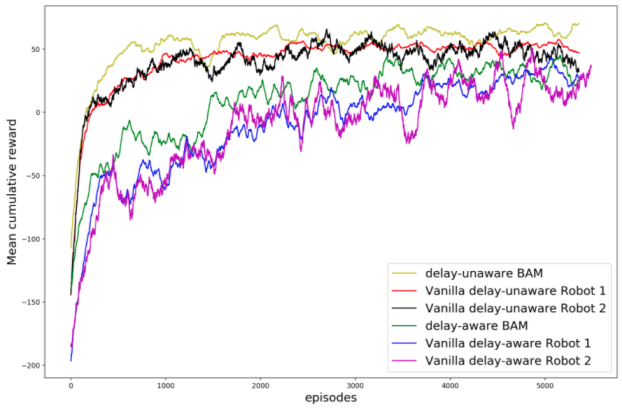


FIGURE 5 – Training curves. All the agents were trained for 400000 steps.

6.2 Transfer

There is two kinds of transfer to consider : simulation to real robot transfer and robot to robot transfer. The UNN framework mitigates the sim2real transfer problem by considering the real robot and the simulated one as two different robots, each one with its own bases, thus partially addressing the sim2real transfer as a robot to robot transfer. In this section we evaluate two methods of transfer

- **UNN transfer :** Once trained to convergence with the BAM robot, the UNN module is transferred to each robot of the set.
- **Vanilla transfer :** The vanilla agents trained on the simulated robot are directly transferred to their physical counterpart. This will serve as a baseline to study the UNN benefits for sim2real transfer.

The performance metric used was the integral of the absolute value of the error between the ball position and the desired ball position over time.This metric has the advantage of taking into account both settling time and the steady state error (the closer to 0, the better). For a fair comparison, each experiment has been conducted with the same settings (same initial ball position and desired ball position). Performances displayed in Tables 1 and 2 were averaged over 50 episodes.

6.2.1 Influence of delay

In this part, we evaluate the first contribution of this work : our delay management method, on both simulated and physical robots. Three delays were considered for the experiments : 300 ms (corresponding to the delay on the physical system), 500 ms and 700 ms. Figure 6 shows ball trajectories for the three delays considered, obtained by the UNN agents on robot 1 (virtual braccio robot) and 3 (physical braccio robot). On the simulation side, we added an optimal trajectory obtained with the delay unaware UNN agent acting on an undelayed environments to serve as a reference (see Figure 6a). The same agent was then exposed to the delays considered to study how quick performance deteriorates for unaware agents as the delay increases. As shown, agents not exposed to delays during training completely failed and systematically overshot when trying to get the ball at the required position in delayed environment. Figure 6b emphasizes the inability of the delay unaware agents to cope with the physical system immanent delay (300 ms) as the ball starts oscillating. Moreover, as the delay increases, the delay unaware agents tend to become unstable. As for delay aware agents, in the simulation, they still manage to follow closely the optimal trajectory.

Robots/Delays	**0.3**	**0.5**	**0.7**
BAM	3.12 / 15.57	3.94 / 22.57	4.91 / 25.28
UNN Robot 1	3.26 / 11.84	3.96 / 20.12	4.98 / 23.48
UNN Robot 2	3.43 / 12.21	4.19 / 18.47	5.10 / 21.19

TABLE 1 – Sim2sim transfer. Performances obtained for the UNN transfer on the simulated robots. Results are displayed with delay aware method on the left / delay unaware method on the right.

Table 1 shows the performances obtained in sim2sim transfer with the UNN agents on both delay aware and unaware settings. It is shown that delay aware agents perform from 3.5 to 5.72 times better than their unaware counterparts. It is also clear from looking at Figure 6b and Table 2, which shows the average performance after sim2real transfer, that dealing with delay in simulation greatly improves the results of the UNN agents once deployed on the physical robots. Vanilla agents also benefited from this delay management method, as shown in Table 2b, demonstrating the versatility of the proposed method.

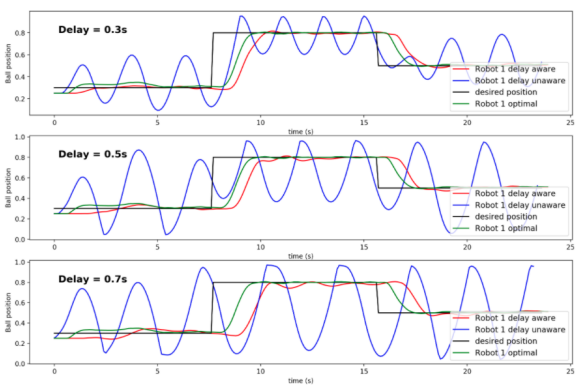
Robots/Delays	**0.3**	**0.5**	**0.7**
BAM	3.12 / 15.57	3.94 / 22.57	4.91 / 25.28
UNN Robot 3	4.78 / 9.88	5.05 / 22.32	8.02 / 24.43
UNN Robot 4	5.86 / 15.72	7.45 / 22.42	8.76 / 24.41

(a) UNN transfer : BAM → robot 3 and BAM → robot 4

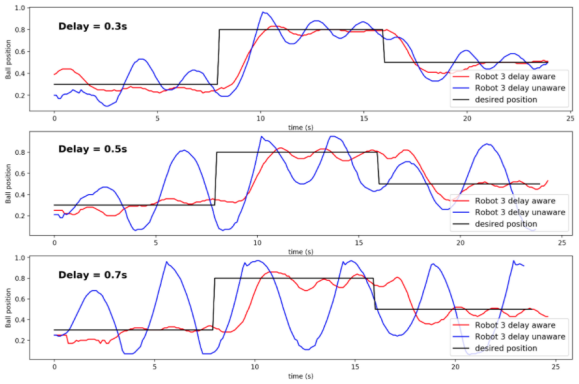
Robots/Delays	**0.3**	**0.5**	**0.7**
Vanilla Robot 1	3.32 / 17.33	4.22 / 26.17	5.56 / 31.48
Vanilla Robot 3	5.43 / 19.65	5.97 / 28.22	9.33 / 33.43
Vanilla Robot 2	3.78 / 18.63	4.81 / 26.45	6.16 / 32.48
Vanilla Robot 4	7.58 / 21.13	9.55 / 27.05	10.62 / 33.82

(b) Vanilla transfer : robot 1 → robot 3 and robot 2 → robot 4

TABLE 2 – Sim2real transfer. Performances obtained for the vanilla transfer and the UNN transfer on the physical robots. Results are displayed as delay aware method on the left / delay unaware method on the right.



(a) UNN Robot 1



(b) UNN Robot 3

FIGURE 6 – Ball trajectory with 0.3, 0.8 and 0.5 as desired ball position.

6.2.2 sim2sim transfer

In this paragraph, we discuss the results obtained when transferring the delay aware UNN module from the BAM robot to robots 1 and 2 in simulation. We also compare the performance obtained against delay aware vanilla agents which learned the task from scratch on robots 1 and 2. As shown in Tables 1 and 2b, UNN-based approachs slightly outperform the policy of the vanilla agents for the robots and delays considered. We want to emphasize that the UNN module has been trained only once and on only one robot, the BAM robot, but still performs better than the vanilla agents specifically trained on robots 1 and 2. These results demonstrate the appealing re-usability and effectiveness of the UNN module. In some cases, the delay aware UNN agents achieve zero-shot performances (e.g robot 1 on delay 0.5). In the worst case, the transfer efficiency is 90.9% (3.12/3.43), 100% being the performance obtained by the UNN module on the BAM robot. In average, the transfer efficiency is 97.7 % for robot 1 and 93.7% on robot 2. Ideally, the UNN module paired with any of the robots would yield similar performance as with the BAM robot if equation (1) was respected. However, in some cases the body configurations required to comply with the UNN commands are not precisely achievable by the robot. For instance, the desired effector position need some of the joints to rotate beyond their limits. This also explain why the UNN transfer is less efficient on the 2 DoF robot, as it is less expressive and has a harder time following UNN commands.

6.2.3 sim2real transfer

In this paragraph, we study the UNN methodology as a sim2real transfer tool. More specifically, we compare the performance obtained after transfer on the physical robots for Vanilla agents and UNN agents. In this case, both the UNN module obtained on the BAM robot and the vanilla agents obtained on the simulated robots, were transferred to the physical robots. As shown in Figure 6, the UNN agent on robot 3 still manages to put the ball at the desired positions without too much overshooting. Table 2 shows the results obtained. As usual, the agents trained in simulation and transferred to the real world show lower performance than their virtual counterparts due to the reality gap. However, they still manage to obtain decent performances. One notable result is that the delay unaware agents transferred to the physical robot obtain very poor performance unlike their delay-aware counterpart. Once again, UNN based agents outperform vanilla agents. Moreover, the UNN based transfer reaches up to 78% (100% corresponds to the BAM performance) in the best case, while the vanilla transfer reaches 70.6% (100% corresponds to the vanilla agent on robot 1). In average, the UNN sim2real transfer efficiency is 68% on robot 3 and 54% on robot 4, against 63% on robot 3 and 52.7% for robot 4 for the vanilla sim2real transfer. As mentioned earlier, this slight sim2real improvement can be attributed to the robot-agnostic nature of the UNN module. Indeed, even if the vanilla agents were trained in simulation with a virtual copy, it remains an inaccurate model of the physical robot. The UNN on the other hand ignores those discrepancies by considering the physical robot and the virtual one as two different robots, each with their own bases.

6.3 Discussion and perspectives

From the previous results, it appears clearly that the delay management method used considerably improves the performances when working with delayed environment, as its often the case on the real world. Moreover, the UNN approach not only achieves very efficient transfer between robots in simulation, but slightly improves sim2real transfer over vanilla transfer. However, the zero-shot sim2real transfer efficiency is nowhere near what was obtained for the sim2sim transfers but further training could be done on the physical robots to achieve better performance. As aforementionned, the UNN mitigates the sim2real transfer by considering the physical system as just another robot that can be interfaced with the UNN module. Nevertheless, the UNN module which was trained in simulation can still overfit on its environment. As a result, the instruc-

©AFIA2021

tions given can be unsuitable if it is placed in a new domain with a slightly different state distribution, e.g the real world. Fortunately, the UNN approach can be combined with state-of-the art sim2real methods such as automatic domain randomization[2] to improve sim2real transfer.

7 Conclusion

In this work, we studied the benefits of the UNN transfer for a sim2real application. More specifically, we addressed the delay management problem that occurs when working with a physical system by making the UNN "aware" of the latency of the system it is working with. By doing so, we extended the versatility of the UNN method and the range of compatible systems. We demonstrated this method efficiency by solving a dynamic manipulation task where delay management is paramount and showed that transfer across systems with heterogeneous delays and structurally distinct robots is possible. However, the UNN approach only is not sufficient for efficient sim2real transfer, but could be enhanced with other sim2real methods. This work empirically demonstrated the feasibility of our approach on a low dimensional task. Future work will investigate the efficiency of our delay-management method on a higher dimensional task.

Remerciements

This research was supported supported by the French Research Agency ANR through the AIM project.

Références

[1] V. Tsounis et al. DeepGait : Planning and Control of Quadrupedal Gaits using Deep Reinforcement Learning. *RA-L*, 2020.

[2] OpenAI et al. Solving Rubik's Cube with a Robot Hand. *arXiv :1910.07113*, 2019.

[3] J. Donahue et al. Decaf : A deep convolutional activation feature for generic visual recognition. In *Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning*, volume 32 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 647–655, 2014.

[4] M. Mounsif et al. Universal Notice Network : Transferable Knowledge Among Agents. In *6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pages 563–568, 2019.

[5] K. Bousmalis et al. Using Simulation and Domain Adaptation to Improve Efficiency of Deep Robotic Grasping. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4243–4250, Brisbane, QLD, May 2018.

[6] K. Arndt et al. Meta Reinforcement Learning for Sim-to-real Domain Adaptation. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2725–2731, Paris, France, May 2020.

[7] C. Finn, P. Abbeel, and S. Levine. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. In *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, volume 70 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 1126–1135, 2017.

[8] Y. Duan et al. RL^2 : Fast Reinforcement Learning via Slow Reinforcement Learning. *arXiv :1611.02779*, November 2016. arXiv : 1611.02779 version : 2.

[9] A. Gudimella et al. Deep Reinforcement Learning for Dexterous Manipulation with Concept Networks. *ICRA*, 2020.

[10] M. Mounsif et al. CoachGAN : Fast Adversarial Transfer Learning between Differently Shaped Entities :. In *Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pages 89–96, 2020.

[11] A. Gupta et al. Learning Invariant Feature Spaces to Transfer Skills with Reinforcement Learning. *ICLR*, 2017.

[12] C. Devin et al. Learning modular neural network policies for multi-task and multi-robot transfer. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2169–2176, Singapore, 2017.

[13] S. Behnke et al. Predicting away robot control latency. In *RoboCup 2003 : Robot Soccer World Cup VII*, pages 712–719, Berlin, Heidelberg, 2004. Springer Berlin Heidelberg.

[14] T.J. Walsh et al. Learning and planning in environments with delayed feedback. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 18(1) :83–105, February 2009.

[15] M. Mounsif et. al. Bam ! base abstracted modeling with universal notice network : Fast skill transfer between mobile manipulators. In *7th 2020 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (IEEE-CoDIT)*, July 2019.

[16] K.V. Katsikopoulos and S.E. Engelbrecht. Markov decision processes with delays and asynchronous cost collection. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(4) :568–574, April 2003.

[17] Dimitri P. Bertsekas. *Dynamic programming and optimal control. Vol.1*. Number 1 in Athena scientific optimization and computation series. Athena Scientific Publ, Belmont, Mass, 2. ed edition, 2000. OCLC : 833754683.

[18] A. Juliani et al. Unity : A General Platform for Intelligent Agents. *arXiv :1809.02627*, May 2020. arXiv : 1809.02627.

[19] J. Schulman et al. Proximal Policy Optimization Algorithms. *arXiv :1707.06347*, August 2017. arXiv : 1707.06347 version : 2.

Apprentissage auto-supervisé pour la détection d'actions illégales lors de la surveillance du trafic maritime

P. Bernabé[1,2], A. Gotlieb[1], B. Legeard[2,4], F. Olaf Sem-Jacobsen[3], H. Spieker[1]

[1] Simula Research Laboratory, VIAS - Oslo, Norvège
[2] Université de Bourgogne Franche-Comté, Institut FEMTO-ST - Besançon, France
[3] Statsat AS - Oslo, Norvège
[4] Smartesting - Besançon, France

{pierbernabe, arnaud, helge}@simula.no, frank.Sem-Jacobsen@statsat.no,
bruno.legeard@univ-fcomte.fr

Résumé

La surveillance du trafic maritime est confrontée à des difficultés très importantes dans la détection des activités illégales en mer. Dans cet article, nous présentons les premiers résultats d'une méthode d'apprentissage auto-supervisé qui vise à déceler les déconnexions volontaires du système d'identification des navires. En traitant les données provenant de quatre satellites de surveillance norvégiens, notre modèle d'apprentissage vise l'identification de navires soupçonnés d'activités illégales telles que la pêche dans des zones protégées ou bien le franchissement de zones d'exclusion économique en temps réel. Dans cet article, nous présentons une approche fondée sur des techniques d'apprentissage auto-supervisé, et expérimentée à partir de données réelles.

Mots-clés

Apprentissage automatique, Apprentissage auto-supervisé, Système d'identification automatique, Surveillance maritime.

Abstract

The surveillance of maritime traffic is confronted with very important difficulties in detecting illegal activities at sea. In this article, we present the first results of a self-supervised learning method which aims to detect voluntary disconnections of the identification' system of vessels. By processing data from four Norwegian surveillance satellites, our learning model aims to identify vessels suspected of illegal activities such as fishing in protected areas or crossing economic exclusion zones in real time. In this article, we present an approach based on self-supervised learning techniques, and experienced from real data.

Keywords

Machine Learning, Self-Supervised Learning, Automatic Identification System (AIS), Martime Surveillance

1 Introduction

1.1 Surveillance du trafic maritime

La surveillance du trafic maritime est une tâche complexe qui vise à identifier et contrôler l'activité des navires présents dans une zone maritime [12]. La surveillance a plusieurs objectifs, comme par exemple, identifier et guider les navires, aider à la prévention des collisions, lancer des missions de sauvetage en mer ou plus généralement, réguler le trafic maritime. Les systèmes de surveillance modernes visent aussi à détecter des activités illégales telles que les actions de piratage, de pêche illégale, d'intrusion dans les zones d'exclusion économique (EEZ), de transbordement de produits stupéfiants, de dégazage en mer, etc. La plupart du temps, la détection de ces activités illégales repose uniquement sur l'observation des navires, l'analyse visuelle des données et l'expertise des garde-côtes. Pourtant, l'exploitation automatisée des différentes sources de données pourrait s'avérer très utile pour la détection d'actions illégales [1]. En effet, les systèmes de surveillance maritime collectent des données provenant des communication-radio spécifiques émises par les navires, et celles-ci sont captées par différents moyens tels que des balises en mer, les sémaphores côtiers et des satellites dédiés à l'observation du trafic maritime.

L'émission de messages par des transpondeurs VHF [1] embarqués sur les navires d'un certain tonnage (i.e., $\geq$ 300 tonneaux) constitue la source d'information principale de la surveillance maritime. Ces messages s'appuient sur le protocole AIS (*Automatic Identification System*) qui transmet toutes les 2 à 10 secondes des informations telles que l'identifiant unique du navire (MMSI [2]), son statut (amarré, échoué, au mouillage, etc.), son type (cargo, pêche, plaisance, etc.), ses dimensions, sa route, sa vitesse, sa position (latitude, longitude), son cap, etc. Ces messages sont captés non seulement par les autres navires ainsi que les balises et les sémaphores lorsque les récepteurs sont à portée, mais

1. Very High Fréquency
2. Maritime Mobile Service Identity

©AFIA2021

également par des satellites dédiés à la surveillance du trafic comme indiqué plus haut. Dans ce dernier cas, les données sont nommées S-AIS. Il est important de noter que le capitaine d'un navire a la possibilité de couper volontairement l'émission des messages AIS et ceci est parfois fait dans le but de réaliser des actions illégales en mer. Par exemple, la déconnexion AIS est fréquemment utilisée par certains capitaines de navire de pêche afin de pêcher en toute impunité dans une zone interdite ou fortement réglementée. De part le volume de messages AIS reçus, une analyse manuelle de ces données reste très hasardeuse et la plupart du temps inopérante. Par exemple, en une seule journée (19/5/2019), les satellites de surveillance du trafic maritime opérés par la Norvège ont réceptionné 3 518 649 messages AIS, qui sont à ajouter aux 4 192 381 messages captés par les stations terrestres des côtes norvégiennes.

1.2 Méthodes pour la détection automatique d'actions illégales

L'utilisation de moyens automatisés pour la détection d'actions illégales est donc devenu un enjeu pour la surveillance du trafic maritime [4]. Parmi ces moyens, la recherche de déconnexions AIS volontaires à partir des messages AIS transmis par les navires est apparu comme une première application cruciale [8, 7, 14, 11]. Avec le lancement de satellites de surveillance, la disponibilité de données S-AIS pour des zones habituellement hors de portée a permis de systématiser cette surveillance y compris en pleine mer. Une approche directe pour ce problème consiste à définir des règles qui caractérisent la déconnexion volontaire des transpondeurs VHF mais cette approche se heurte à plusieurs difficultés liées essentiellement à la qualité des données. En effet,

- les messages S-AIS captés par une flotte de satellites de surveillance sont habituellement très irréguliers à cause des conditions météo difficiles, des collisions entre messages, de la position des satellites qui orbitent autour de la terre et qui n'offrent pas une couverture permanente des mers ;
- certains messages S-AIS sont bruités car les données non mises à jour, ou bien émises par des transpondeurs de piètre qualité ;
- certains navires embarquent plusieurs transpondeurs et brouillent volontairement les pistes en changeant d'émission VHF ;
- certaines zones sont saturées en bateaux (e.g., à l'approche des ports ou bien dans des couloirs très empruntés) et conduit à la congestion des modules de réception des satellites ;

Devant l'impossibilité d'identifier un système de règles caractérisant la déconnexion AIS légale et illégale, un courant de recherche a émergé depuis quelques années, qui consiste à entraîner et déployer des modèles d'apprentissage automatique supervisé pour la détection d'actions illégales en mer. La plupart des travaux initiaux se sont concentrés sur la prédiction de trajectoires et la détection d'anomalies pour un navire donné, sans se préoccuper du reste du trafic maritime [12, 4]. De même, des modèles probabilistes du comportement individuel des navires à partir de données historiques AIS ont émergés tels que des modèles de Markov [1, 5] ou bien des réseaux de neurones hiérarchiques [6]. Cependant, ces modèles sont d'une part mal adaptés au traitement de données bruitées telles que les données AIS issues des satellites et d'autre part, en ne prenant en compte que les comportements individuels des navires, ils manquent souvent de pertinence pour détecter des actions illégales dans la multitude des navires traversant une zone maritime donnée. Récemment, l'utilisation de l'apprentissage multi-tâches pour l'entraînement d'un modèle probabiliste de trajectoires typiques de navires à partir de données AIS a donné des résultats très encourageants pour la surveillance du trafic maritime [9]. En particulier, en utilisant une représentation qui régularise la fréquence des messages et complète le jeu de données, cette approche a permis un bien meilleur traitement des données bruitées [10] même si les jeux de données utilisés proviennent, non pas des satellites de surveillance, mais des balises en mer.

1.3 Nos contributions

Les résultats présentés dans cet article s'articulent autour de trois contributions distinctes :

1. À partir de données S-AIS provenant du captage d'une flotte de satellites opéré par notre partenaire Norvégien StatSat AS, nous constatons que la présence d'évènements de déconnexion AIS est très fréquente et seule une très faible proportion correspond à des déconnexions volontaires. Notre approche, basée sur l'apprentissage profond, permet de détecter ces déconnexions de manière fiable. C'est, à notre connaissance, la première fois que les déconnexions volontaires sont recherchées et détectées dans des données S-AIS avec un modèle à base de réseau de neurones multi-couches. Ceci ouvre des perspectives intéressantes pour couvrir des zones maritimes situées en pleine mer, c'est-à-dire situées loin des côtes et des balises, et pour la détection temps-réel des déconnexions permettant une intervention plus rapide des garde-côtes ;
2. Nous utilisons des données non-étiquetées pour entraîner nos modèles à base de réseaux de neurones dans une approche d'apprentissage auto-supervisée. Ces données n'ont pas été annotées par des opérateurs capables de discriminer les déconnexions AIS volontaires des autres, ce qui facilite l'automatisation et la généralisation de notre approche ;
3. À l'inverse d'autres méthodes existantes, notre approche ne s'appuie pas sur la reconstruction de messages AIS manquants. Nous créons une représentation qui s'appuie sur les réseaux d'attention et bénéficions ainsi d'une plus grande précision dans l'analyse des données. C'est, à notre connaissance, la première fois que les réseaux d'attention sont utilisés pour traiter des données AIS. Les résultats expérimentaux que nous avons obtenus démontrent les bénéfices liés à cette représentation.

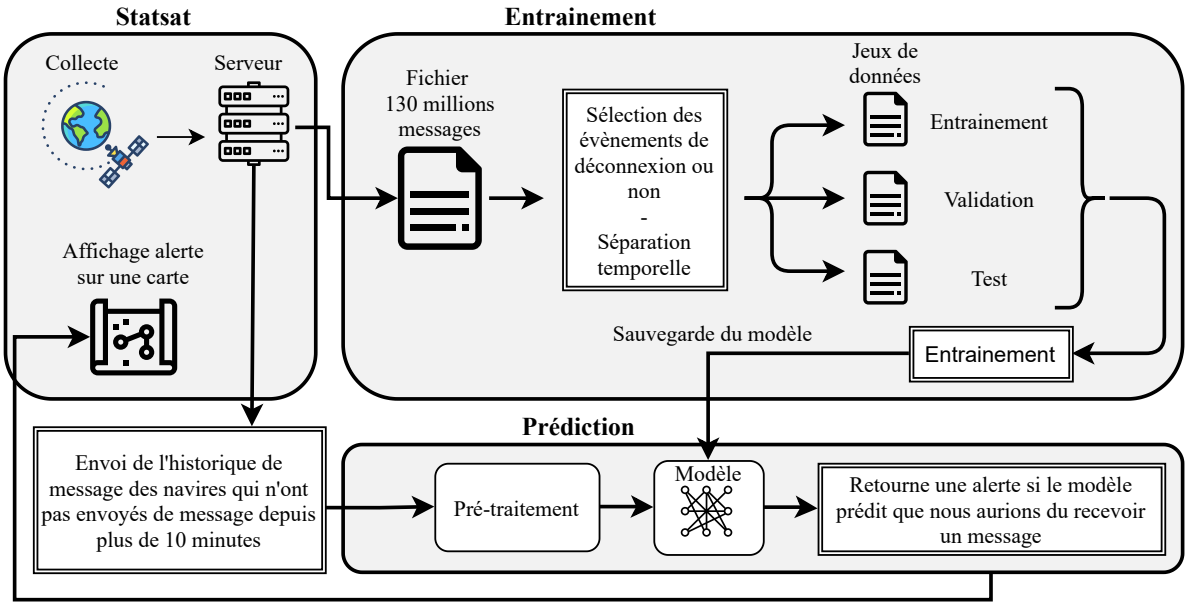


FIGURE 1 – Schéma de fonctionnement général de notre méthode d'apprentissage auto-supervisé pour la détection de déconnexions AIS volontaires.

1.4 Plan du papier

Le reste de cet article est organisé de la manière suivante : la section 2 donne un aperçu général de notre approche et indique les pré-requis nécessaires à sa compréhension avec une présentation succincte de l'apprentissage auto-supervisé et des réseaux d'attention. La section 3 décrit le traitement du flux des données, tandis que la section 4 présente notre modèle d'apprentissage profond et la représentation à base de réseaux d'attention. Dans la section 5, nous interprétons les résultats expérimentaux obtenus. Enfin, la section 6 conclut cet article en évoquant les pistes de travail en cours concernant l'application de l'apprentissage auto-supervisé à d'autres problématiques de la surveillance du trafic maritime.

2 Aperçu de notre approche

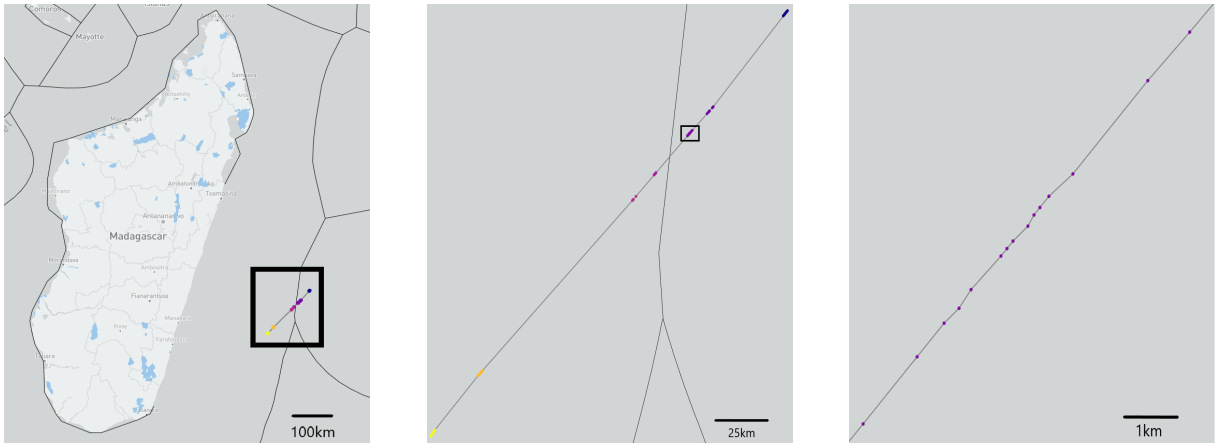
2.1 Schéma de fonctionnement général

La figure 1 présente le schéma général de notre méthode d'apprentissage auto-supervisé de déconnexions volontaires AIS. Le schéma se décompose en trois blocs distincts, intitulés *Statsat*, *Entraînement* et *Prédiction*. Le bloc Statsat correspond au travail de collecte et stockage des données S-AIS en provenance de satellites d'observation géo-marins gérés par l'opérateur étatique Norvégien Statsat AS. Le bloc Entraînement correspond au travail de sélection et de préparation des données et de calcul des annotations supplémentaires afin de créer un jeu de données propice à l'entraînement d'un modèle d'apprentissage auto-supervisée. Ce jeu de données est composé, comme à l'accoutumée, de trois sous-ensembles distincts : les données d'entraînement, les données de validation et les données de test. Une fois le modèle entraîné, celui-ci est déployé dans le bloc Prédiction qui prend en entrée l'historique en messages AIS de navires qui n'ont pas envoyé de messages depuis plus de 10 minutes. Après une phase de pré-traitement, les trajectoires de ces navires sont classifiées par le modèle entre ceux présentant un risque d'activités illégales (risque de déconnexions AIS volontaires) et les autres. Dans le premier cas, une alerte spécifique peut-être retournée au block StatSat qui se charge d'alerter la garde-côtière si la menace se confirme. À titre d'exemple, la figure 2 montre la trajectoire d'un navire identifié par notre méthode. La figure montre la distance parcourue et l'irrégularité entre les messages. En pleine mer, au franchissement d'une ligne territoriale, le navire cesse d'émettre les messages AIS, ce qui le rend suspect d'activités illégales.

2.2 Apprentissage auto-supervisé

Détecter les déconnexions AIS volontaires se heurte à un obstacle d'importance : il n'existe pas de moyen parfaitement adéquat d'annoter les jeux de données. En effet, comme indiqué plus haut, une solution consisterait à entraîner un modèle avec des données annotées par les garde-côtes, mais un tel travail est peu réaliste en pratique, du fait du temps exigé pour des personnels très qualifiés et très occupés. De plus, dans la mesure où de très nombreuses déconnexions AIS sont involontaires, il s'agirait peu ou prou de rechercher des aiguilles dans une botte de foin et la constitution d'un jeu de données équilibré serait extrêmement fastidieuse. Notre solution pour ce problème a donc consisté à extraire l'annotation depuis les données elles-mêmes dans une approche d'apprentissage auto-supervisé. Du fait que la très grande majorité des exemples où un bateau n'envoie pas de messages AIS pendant un laps de

©AFIA2021



(a) (b) (c)

FIGURE 2 – Exemple d'une trajectoire d'un navire à différentes échelles (de la plus grande échelle (a) à la plus petite (c)). La trajectoire est ici composée de 100 messages AIS, tandis que le navire parcourt une distance d'environ 250km.

temps suffisant est due à une perte de connexion AIS involontaire, notre modèle peut être entraîné avec l'objectif d'apprendre la tâche qui consiste à déterminer si un message doit être reçu dans ce laps de temps ou non. Si notre modèle prédit qu'un message doit être reçu dans ce laps de temps et qu'il n'arrive pas, alors le navire correspondant peut être classifié comme suspect. Ce laps de temps significatif, à la vue des données S-AIS dont nous disposons, a été fixé à 10 minutes.

Cette approche a l'avantage de permettre la construction d'un large jeu de données annotées à partir de l'historique des messages AIS, sans nécessiter une annotation manuelle. En effet, il suffit d'extraire des exemples de disparition de plus de 10 minutes ainsi que des exemples de réception de messages dans les 10 minutes pour construire un large jeu de données bien équilibré.

2.3 Réseaux d'attention

Dans le domaine de l'apprentissage auto-supervisé, les réseaux d'attention et les *"transformer models"* ont montré des résultats spectaculaires, en particulier dans le traitement automatique du langage naturel [13]. Introduits en 2015 dans [2], l'objectif des réseaux d'attention est d'améliorer l'apprentissage des parties les plus importantes des données d'entrée, en consacrant plus de puissance de calcul à celles-ci. Ces réseaux se sont montrés capables de corriger certains défauts inhérents des *"Long Short Term Memory"*. Une variante des premiers réseaux d'attention, nommée *"self-attention network"* (ou bien *"intra-attention network"*) permet de mettre en relation différents éléments d'une même séquence d'entrée pour en créer ce qui s'appelle *une représentation* [3]. Ces réseaux se sont révélés très utiles dans la création automatique de résumés de texte. Les *"tranformer models"* sont une variante des *"self-attention networks"* construits sans utiliser d'architecture récurrente. Ceci est possible grâce au mécanisme *"multi-head self-attention"* [13].

Dans notre approche, nous utilisons la partie encoder du *"tranformer models"* composé de deux blocs *"tranformer"*. Cet encodeur construit une représentation de la trajectoire du navire basée sur l'attention avec l'objectif de trouver des relations entre les différents messages d'un même navire, plus ou moins proches, et ainsi créer *une représentation*, comme détaillé dans la section 4.

3 Traitement du flux de données

3.1 Messages AIS

Les messages AIS sont composés d'informations statiques et dynamiques. Les champs statiques incluent les identifiants internationaux normalisés du navire, i.e., MMSI [3] and IMO, le nom du navire, le signe d'appel, la longueur, la largeur et le type de navire. Ces éléments statiques, qui sont saisis manuellement par le capitaine du navire dans l'émetteur AIS, sont automatiquement transmis sur un canal de diffusion, toutes les 6 minutes. Les émetteurs AIS envoient également des informations dynamiques toutes les 2 à 10 secondes selon la vitesse du bateau, ou toutes les 3 minutes si le bateau est au mouillage. Les informations dynamiques comprennent l'état de navigation (par exemple, "au mouillage", "pêche", etc.), la position du navire (latitude LAT, longitude LON), la vitesse du navire (SOG) [4], sa direction par rapport au pôle Nord (COG) [5], son cap qui est la direction (par rapport au pôle nord magnétique ou au pôle nord géographique) et les horodatages. Tous les messages AIS ne contiennent pas les mêmes informations et ne sont pas toujours envoyés à des horodatages réguliers. En règle générale, les messages AIS ont une portée d'environ 20 à 40km. La limitation de cette portée est due à la courbure de la terre et à la hauteur à laquelle l'antenne est installée sur les navires.

Depuis une dizaine d'années environ, le corps de garde-côtes utilise des satellites pour capter les messages AIS en

3. Maritime Mobile Service Identity
4. Speed Over Ground
5. Course Over Ground

TABLE 1 – Jeux de données utilisés pour le bloc Entraînement.

Jeux de données	Nombre de messages	Uniques navire	Nombre d'exemples extraits	Date
Entraînement	101 037 023	132 486	80 000	24/04 -> 26/05
Validation	12 497 753	88 489	10 000	26/05 -> 30/05
Test	12 945 336	91 023	10 000	30/05 -> 03/06

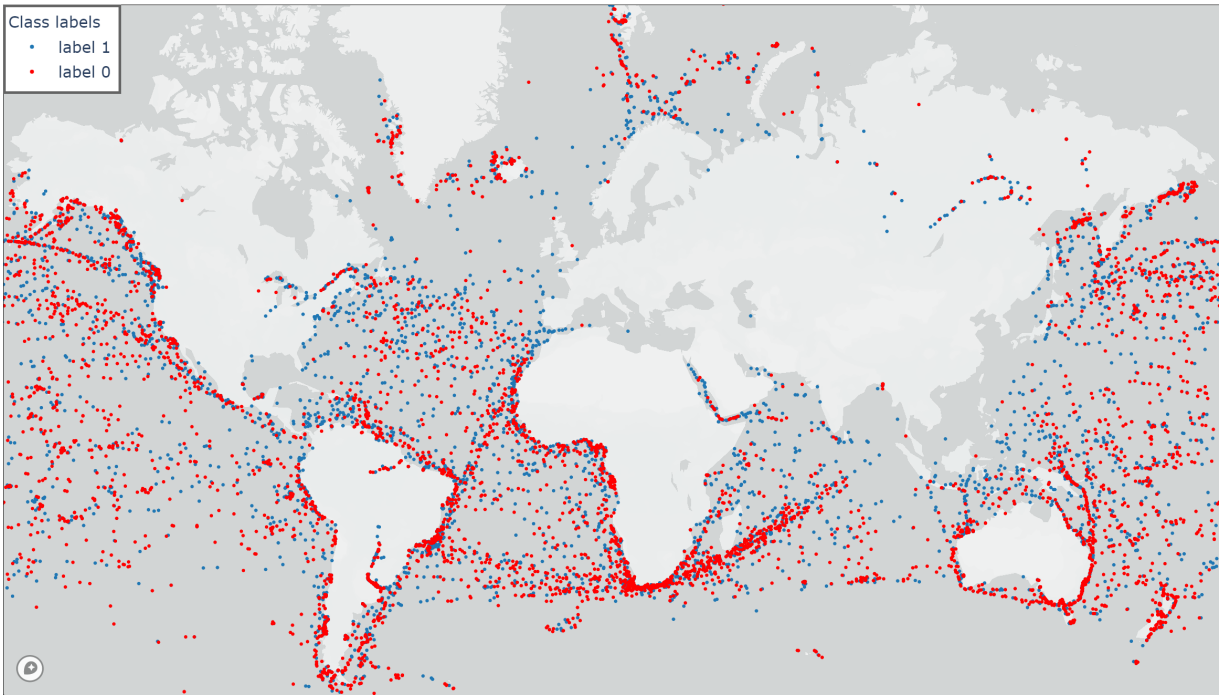


FIGURE 3 – Répartition des échantillons sur la surface du globe

dehors des zones couvertes par les balises. Cependant, il existe un problème inhérent à la norme AIS : le schéma d'accès radio défini dans la norme crée seulement 4500 plages horaires disponibles à chaque minute et les récepteurs peuvent être facilement submergés par de grandes empreintes de réception AIS. De part le nombre croissant d'émetteurs-récepteurs AIS et l'élargissement de la zone de captation des satellites, des collisions de messages peuvent avoir lieu et conduire à la disparition de certains d'entre eux. Certains ports de la mer Méditerranée, de la mer du Nord et des côtes chinoises sont très difficiles à surveiller à cause de cela.

3.2 Collection des données

Statsat est une compagnie norvégienne qui développe des infrastructures spatiales et opère des satellites de surveillance maritime pour le compte du gouvernement norvégien. La compagnie est responsable de la gestion des satellites *AISSAT 1 et 2* et *NORSAT 1 et 2* qui sont dédiés à la supervision des transmissions AIS au nom de l'administration côtière norvégienne et de l'agence spatiale norvégienne. Ces satellites sont positionnés en orbite polaire à une hauteur orbitale de 600-650km, de telle sorte qu'à chaque rotation autour de la terre, ils se décalent pour couvrir toutes les latitudes. Le choix de cette orbite conduit à une bien meilleure couverture des pôles par rapport à l'équateur. Cela conduit à une meilleure efficacité du modèle au niveau des pôles. Le jeu de données S-AIS proposé par Statsat pour le bloc Entraînement est composé de 126 480 112 (environ 126 millions) de messages AIS provenant de l'ensemble du globe, ce qui correspond aux messages collectés entre le 24 avril 2019 et 3 juin 2019 (environ 6 semaines de données).

3.3 Sélection et augmentation de caractéristiques

Notre approche vise la détection des déconnexions AIS volontaires pour les navires en mer (ce qui est illégal). Ainsi, partant du jeu de données S-AIS fourni par le bloc Statsat, pour chaque message AIS, nous sélectionnons les caractéristiques pertinentes que sont les champs de position (lat, lon), l'horodatage (t), et la vitesse (s).
Par ailleurs, nous enrichissons les caractéristiques avec Δt la différence de temps par rapport au message précèdent du même navire, ΔD_V la différence en mètres sur l'axe vertical avec le message précédant du même navire, ΔD_H la différence en mètres sur l'axe horizontal, D_P la distance au port, T_D la seconde du jour (entre 0 et 86 400). Il est à noter que :

— Δt et T_D permettent d'avoir une meilleure précision

©AFIA2021

sur la dimension temporelle que celle donnée par l'horodatage t ;
— ΔD_V et ΔD_H améliorent la compréhension de la position sur de petites distances ;
— D_P permet de filtrer les échantillons pertinents ;

Ainsi, le vecteur de caractéristiques correspondant à un message prend la forme suivante :

$$x = [t, lat, lon, s, \Delta t, \Delta D_V, \Delta D_H, D_P, T_D]$$

3.4 Trajectoire ou Échantillon

Un échantillon ($\mathcal{E}$) est une séquence temporelle de $\mathcal{T}$ messages successifs d'un navire $\mathcal{E} = [x_1, x_2, \ldots, x_T]$. Nous l'appelons également *trajectoire* car cela correspond à la trajectoire d'un navire dans une fenêtre temporelle. Il est à noter qu'il n'y a aucune condition posée sur les valeurs maximales de Δt et ΔD, entre deux messages successifs au sein d'une trajectoire.

3.5 Séparation des jeux de données

Les jeux de données utilisés pour l'entraînement, la validation et le test du modèle sont séparés en fonction de leur date. Nous aurions pu aussi séparer par navire mais la séparation temporelle a l'avantage de se rapprocher de l'utilisation qui est faite du modèle lors de son déploiement. L'objectif est d'effectuer des prédictions en s'appuyant sur les données passées de la trajectoire d'un navire. La table 1 décrit le volume des jeux de données ainsi que leur division temporelle.

3.6 Sélection et traitement des trajectoires

La figure 3 indique la répartition des messages AIS à la surface du globe. Pour atteindre un bon équilibre du jeu de données à partir de l'ensemble de ces messages, nous extrayons aléatoirement et de manière équitable 1) des trajectoires de navires présentant une continuité de transmission, et 2) des trajectoires de navires présentant une déconnexion AIS. Un seuil arbitraire de continuité a été fixé à 10 minutes pour l'entraînement de notre modèle car nous avons constaté que les déconnexions AIS sont assez courantes dans une période inférieure mais qu'elles deviennent anormales au-delà de 10 minutes. De manière empirique, nous avons constaté que ce seuil de 10 minutes est pertinent pour l'entraînement mais rien n'empêche, lors de la mise en production, de se concentrer sur des déconnexions AIS plus longues (e.g., 1 heure).
Pour la sélection des trajectoires dans le jeu de données, nous posons deux conditions :

1. l'historique des messages AIS du navire concerné doit être composé d'au moins 50 messages. Ceci exclut les bateaux qui viennent de rentrer dans la zone d'observation temporelle de notre jeu de données et qui sont peu pertinents pour l'entraînement du modèle. La limite de 50 messages a été choisie en utilisant les statistiques de la figure 5, on s'aperçoit que de 50 à 100 messages un navire peut parcourir un grande distance et que l'on rencontre régulièrement une longue déconnexion permettant ainsi au modèle de comprendre des situations de déconnexions ;
2. la trajectoire du navire doit être à plus de 5 kilomètres d'un port. Cela permet d'éliminer les exemples de déconnexions AIS volontaires (légales) qui ont lieu dans les ports. De plus, il est relativement facile pour la garde côtière de contrôler les bateaux sans transmission AIS qui se situent dans les ports. Pour déterminer la distance au port le plus proche, nous calculons la distance de l'arc entre deux points sur une sphère [6] avec une base de données de 20 756 ports fournie par l'organisation *"global fishing wacth"* [7].

Étant donné R le rayon de la terre (6371m), deux points p_1 (resp. p_2) ayant pour latitude lat_1 (resp. lat_2) et longitude lon_1 (resp. lon_2) (en radians), la formule utilisée pour le calcul de la distance d de l'arc sur un grand cercle est la formule d'Harvesine :

$$\begin{aligned} d(p_1, p_2) &= 2R * \arcsin(\sqrt{\alpha + \beta}) \\ \alpha &= \sin^2(\frac{lat_1 - lat_2}{2}) \\ \beta &= \cos(lat_1) * \cos(lat_2) * \sin^2(\frac{lon_1 - lon_2}{2}) \end{aligned}$$

4 Modèle d'apprentissage et entraînement

4.1 Architecture du modèle

La figure 4 donne un aperçu de l'architecture générale utilisée pour notre modèle d'apprentissage auto-supervisé. Tout d'abord, la partie pré-traitement divise l'entrée $\mathcal{E}$ en deux vecteurs, $\mathcal{V}_\mathcal{H}$ l'historique des messages AIS qui contient les informations relatives au précédent message et $\mathcal{V}_\mathcal{L}$ la position la plus récente. Ensuite, $\mathcal{V}_\mathcal{H}$ et $\mathcal{V}_\mathcal{L}$ sont normalisés par la couche $\mathcal{N}$. La division de l'entrée a pour objectif d'avoir un encodage qui prend en compte les possibles faibles distances que l'on peut retrouver entre deux messages, tout en conservant une très grande précision sur la position de la déconnexion sur le globe. $\mathcal{V}_\mathcal{H}$ est donné en entré à deux blocs *"transformers"* successifs avec l'objectif de faire des relations entre des messages plus ou moins lointains et d'extraire les informations importantes de la trajectoire. En revanche, $\mathcal{V}_\mathcal{L}$ est mis de coté avant d'être concaténé avec la représentation $\mathcal{R}$ de la trajectoire en sortie du transformer. Un ensemble de couches denses détermine si oui ou non, un message devrait être reçu dans les dix prochaines minutes. Au total, Le modèle $\mathcal{M}$ est composé de 4 690 021 de paramètres entraînables.
Dans la figure 4 , $\mathcal{B}$ représente la taille des batchs (groupe de données) et $\mathcal{W}$ la fenêtre de messages utilisés pour l'entraînement. Les résultats optimaux ont été obtenus avec $\mathcal{B} = 128$, $\mathcal{W} = 100$ et $\mathcal{R} = 64$.

6. La distance de l'arc sur une sphère n'est pas aussi précise que les formules de Vincenty en géodésie puisque la terre n'est pas une sphère parfaite, mais son calcul a l'avantage d'être vectorisable, ce qui est nécessaire dans le cas où le jeu de données contient un très grand nombre de trajectoires.
7. https://globalfishingwatch.org/datasets-and-code/anchorages/

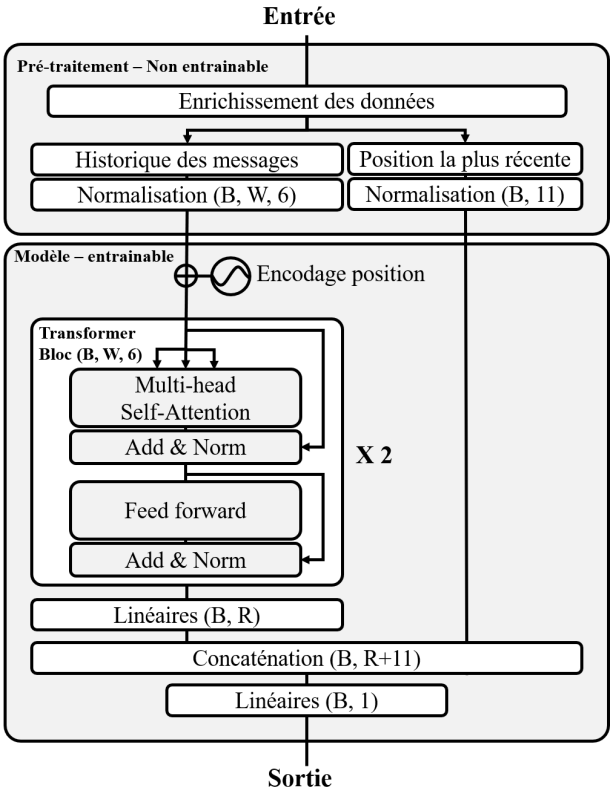


FIGURE 4 – Architecture du modèle

4.2 Préparation des données

Une partie importante de notre travail a été de trouver un encodage et une normalisation, nous permettant de gérer à la fois les grandes distances qui peuvent séparer deux messages tout en gardant une précision suffisante pour les messages espacés seulement de quelques secondes. La figure 5 montre la diversité des trajectoires et des messages. On peut noter par exemple que 10% des trajectoires dure moins de 100 minutes quand 10% des trajectoires durent plus de 40 heures. Dans ce dernier cas, les satellites n'ont été capable de capturer que 100 messages dans les 40 dernières heures. Cette grande durée est principalement due à l'écart entre quelques messages. En effet, on constate que 10% des trajectoires contiennent au moins un coupure de plus de 600 minutes (10h). La même analyse peut être effectuée sur les distances. De plus, nous avons travaillé à rendre le modèle générique pour qu'il puisse être utilisé pour analyser les trajectoires de n'importe quel instant et région du globe.

4.2.1 Historique des messages

Pour rendre le traitement de $\mathcal{V}_{\mathcal{H}}$ le plus générique possible, $\mathcal{N}$ supprime la position absolue représentée par la latitude et la longitude ainsi que le temps absolu représenté par l'horodatage. Le *"transformer model"* s'appuie sur la différence temporelle et la différence de distance avec le message précédent pour construire la représentation de la trajectoire. De plus, la seconde de la journée $\mathcal{S}_{\mathcal{D}}$ est ajoutée pour renforcer la détection de motifs temporels. Une normalisation cyclique $\mathcal{N}_{\mathcal{C}}$ (éq. 1) est appliquée sur les champs cycliques tels que la $\mathcal{S}_{\mathcal{D}}$, une normalisation linéaire $\mathcal{N}_{\mathcal{L}}$ (éq. 2) est appliquée sur les valeurs limites telles que la vitesse $\mathcal{V}$. Pour le Δt , ΔD_V et ΔD_H, un logarithme est appliqué (éq. 3).

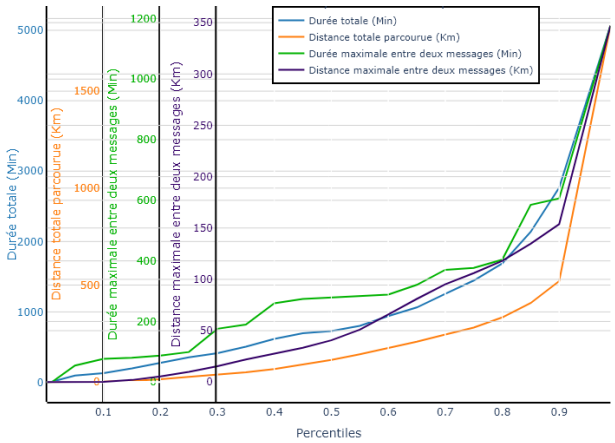


FIGURE 5 – Statistique des échantillons

4.2.2 Position la plus récente

Le vecteur $\mathcal{N}(\mathcal{V}_{\mathcal{P}})$ est composé de 11 valeurs permettant au modèle d'avoir une précision maximale sur la position du navire lors de la déconnexion. $\mathcal{N}$ décompose la latitude et la longitude en Degré-Minute-Seconde puis les normalise cycliquement pour conserver une continuité (éq. 4), par exemple lorsqu'un navire passe de la longitude 180 à -180. À noter que le degré de la latitude est encodé linéairement puisque un navire ne peut pas passer de la latitude -90 à 90.

$$\mathcal{N}_{\mathcal{C}} = [\sin \frac{2 * \pi * (x - \min x)}{\max x - \min x}, \cos \frac{2 * \pi * (x - \min x)}{\max x - \min x}] \tag{1}$$

$$\mathcal{N}_{\mathcal{L}} = \frac{(x - \min x)}{\max x - \min x} \tag{2}$$

$$\mathcal{N}(\mathcal{V}_{\mathcal{H}}) = [log(\Delta t), log(\Delta D_V), log(\Delta D_H), \mathcal{N}_{\mathcal{C}}(\mathcal{S}_{\mathcal{D}}), \mathcal{N}_{\mathcal{L}}(\mathcal{V})] \tag{3}$$

$$\mathcal{N}(\mathcal{V}_{\mathcal{P}}) = [\mathcal{N}_{\mathcal{L}}(lat_{Deg}), \mathcal{N}_{\mathcal{C}}(lat_{Min}), \mathcal{N}_{\mathcal{C}}(lat_{Sec}), \mathcal{N}_{\mathcal{C}}(lon_{Deg}), \mathcal{N}_{\mathcal{C}}(lon_{Min}), \mathcal{N}_{\mathcal{C}}(lon_{Sec}), ...] \tag{4}$$

4.3 Détection de déconnexions AIS volontaires

Notre modèle prédit si la réception d'un message AIS du navire est attendue ou non, dans les 10 prochaines minutes. Pour détecter les situations suspectes, nous devons comparer les sorties attendues et les prédictions du modèle, avec deux situations identifiées :

1. Les trajectoires où le navire émet un message AIS dans les 10 minutes sont utiles pour entraîner le modèle mais pas pour la prédiction. En effet, si le modèle prédit qu'un message est attendu, alors le modèle est conforme et si le modèle prédit qu'aucun message n'est attendu, alors une erreur (certaine) du modèle est présente.

©AFIA2021

2. Les trajectoires où le navire n'émet pas de message AIS dans les 10 minutes sont intéressantes pour la prédiction. En effet, si le modèle prédit qu'aucun message n'est attendu alors le modèle est conforme et la déconnexion AIS est soit involontaire (e.g. panne du transpondeur), soit légale (e.g., navire au mouillage). Par contre, si le modèle prédit qu'un message est attendu alors on a soit une erreur du modèle, soit une déconnexion AIS illégale. Ce sont ces cas-là qui sont les plus pertinents pour la garde-côtière, qui peuvent alors procéder à une analyse détaillée de confirmation ou infirmation. Dans ce dernier cas, l'historique des positions du navire est rapporté.

Dans tous les cas, il est crucial de disposer d'un modèle présentant une très haute précision afin de ne retourner que des trajectoires suspectes intéressantes aux garde-côtes.

5 Résultats et discussion

5.1 Entraînement du modèle

Une chaîne d'intégration continue a été mise en place entre le serveur de pré-traitement, celui d'entraînement et celui de prédictions en utilisant gitlab-ci pour l'orchestration et DVC [8] pour la mise en version des jeux de données. L'infrastructure expérimentale de recherche eX3 [9] nous fournit un environnement de calcul haute performance. L'infrastructure inclut un système DGX-2 [10] composé de 16 cartes graphiques NVIDIA Tesla V100. Pour notre entraînement, une seule de ces cartes nous permet d'entraîner le modèle à une vitesse de une époque toutes les 7s, chaque époque étant composée de 625 pas. Le modèle atteint sa précision maximale après 100 époques mais, afin d'assurer au modèle une convergence garantie, nous l'entraînons sur 1000 époques. Cela amène le temps d'entraînement à 7100s ±150s (soit environ 2h). Aucun sur-apprentissage n'est observé et cela est particulièrement important dans le contexte d'une mise en production avec un apprentissage continu. En effet, l'objectif est d'utiliser les données collectées au jour le jour pour améliorer la précision du modèle.

5.2 Résultats

Les performances obtenues par le modèle pour la prédiction de la réception d'un message dans les dix prochaines minutes sont excellentes. La figure 6 permet d'observer l'évolution de la précision jusqu'à ce que celle-ci atteigne 99% après les 100 premières époques. Pour une meilleure évaluation, le modèle a été entraîné 10 fois sur 1000 époques avec à chaque fois une initialisation aléatoire des paramètres. La figure 7 décrit les précisions finales obtenues sur le jeu d'entraînement, de validations et de test. La précision sur le jeu de test est la plus importante, et nous pouvons

8. Data Version Control
9. https://www.ex3.simula.no/
10. https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/Data-Center/dgx-2/dgx-2-print-datasheet-738070-nvidia-a4-web-uk.pdf

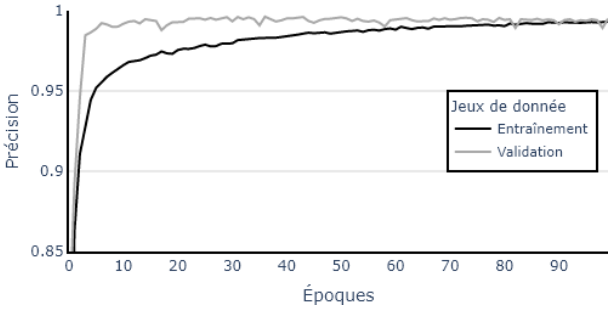


FIGURE 6 – Précision du modèle sur les 100 premières époques d'entraînement

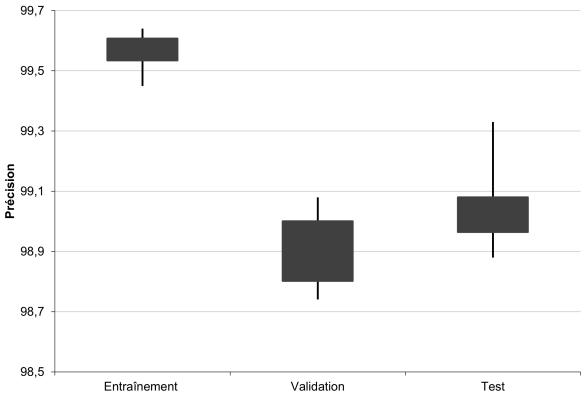


FIGURE 7 – Statistiques de précision sur 10 exécutions

observer une précision de 99% en moyenne avec un maximum atteint de 99.3%. Il est important de rappeler ici que la précision du modèle correspond à la prédiction de réception d'un message dans les 10 minutes et non pas à la prédiction de déconnexion AIS volontaires. Il n'existe pas, à notre connaissance, de jeux de données permettant de tester notre modèle précisément sur cette tâche. Par contre, l'analyse de la matrice de confusion (Table 2) confirme les bonnes performances du modèle. En effet, l'écart entre les faux négatifs et les faux positifs est significatif.

— **Faux négatif (F. nég.)** : le modèle prédit la non-réception d'un message et pourtant un message est reçu ;
— **Faux positif (F. pos.)** : le modèle prédit la réception d'un message mais aucun message n'est reçu.

TABLE 2 – Matrice de confusion, jeu de données de test - Doit-on recevoir un message du navire dans les 10 minutes ?

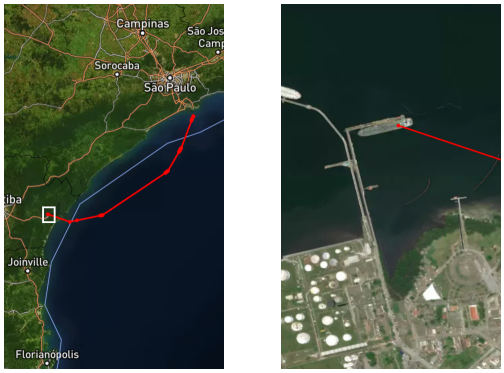
Prédiction \ Annotation	Oui	Non
Oui	4887	104 (F. pos.)
Non	1 (F. nég.)	4992

Sur le jeu de test, un seul faux négatif est détecté. Cette erreur de classification ne peut provenir que d'une erreur du modèle. Par contre, les 104 faux positifs détectés peuvent provenir d'une erreur du modèle mais aussi d'une coupure

anormale du signal. Cet écart consolide les résultats.

5.3 Détection des déconnexions AIS suspectes sur le jeu de données de tests

Sur la courte période de tests dont nous disposons (1 semaine), nous avons extrait tous les cas où la connexion avec un navire est perdue pendant plus de 2h, cela représente 160 574 cas. Le seuil de 2h a été choisi pour limiter le nombre d'exemples à tester. De plus, 2h de coupure sont suffisantes pour effectuer des infractions mais restent un évènement fréquent dans le contexte d'une capture par satellite. Sur ces 160 574 cas, le modèle a permis de classifier 12 navires qui aurait dû envoyer un message dans les 10 premières minutes de la déconnexion. Nous pensons que ce filtrage est une aide précieuse pour les garde-côtes qui peuvent concentrer leur attention sur ces cas suspects. Parmi ces 12 déconnexions suspectes, 10 ont eu lieu après avoir jeté l'ancre dans de petits ports, non répertoriés dans le fichier que nous utilisons pour le filtrage des ports. La figure 8 montre une une de ces dix trajectoires qui sont détectées par notre modèle, mais non illégales. Par contre, les deux autres trajectoires sont suspectes, comme indiquées dans la figure 9. Les deux trajectoires entrent dans une zone économique exclusive avant que l'on perde leur trace. Bien sûr, rien ne nous permet d'affirmer avec certitude que ces déconnexions sont volontaires mais elles nécessitent de lancer des investigations approfondies de la part de la garde-côtière.

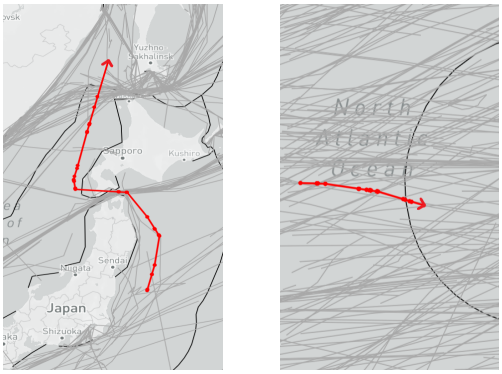


(a) (b)

FIGURE 8 – Un exemple de déconnexion volontaire détectée mais non illégale. Image (b) est le zoom de l'image (a)

5.4 Discussion

Les déconnexions AIS volontaires (illégales) sont des évènements très rares et la quantité de données utilisée pour le test permet de confirmer que le modèle est bien capable de prédire si un navire doit recevoir un message dans les 10 prochaines minutes. Cependant, à ce stade de nos travaux, il ne nous est pas encore possible de fournir un score de précision pour la détection des déconnexions anormales. La matrice de confusion donne une bonne idée de la validité du modèle mais il faut tester le modèle sur un jeu de données plus grand (c'est-à-dire sur une plage de temps plus



(a) (b)

FIGURE 9 – Deux exemples de déconnexion suspecte d'après notre modèle

longue) pour apprendre des motifs de déconnexion AIS. Pour l'instant, le modèle n'est entraîné que sur des données entre avril et juin 2020, c'est-à-dire des données du printemps, ce qui peut créer un biais par rapport à des données d'autres saisons. Nous travaillons à intégrer une année complète de données dans l'expérience. De plus, le modèle ne détecte que les déconnexions AIS qui ont lieu au moment où un des satellites survole la zone. Cela rend le modèle très efficace près des pôles mais moins à l'équateur car les satellites couvrent moins souvent cette zone. Cette faiblesse inhérente à notre jeu de données doit faire l'objet d'une attention particulière.

6 Conclusion et perspectives

Les résultats sur la prédiction de réception de messages sont très encourageants sur nos données de test (99% de précision), ce qui rend cette approche par apprentissage auto-supervisé particulièrement intéressante pour détecter les déconnections AIS volontaires en temps réel. La mise à disposition prochaine d'un jeu de données sur une année entière nous permettra d'expérimenter notre modèle sur d'autres périodes de l'année, ce qui réduira le biais potentiel lié à l'utilisation de données du printemps uniquement. Par ailleurs, l'apprentissage de motifs de déconnexions AIS telles que le franchissement de frontière d'une zone d'exclusion économique sera possible. En parallèle, nous visons également l'entraînement de modèles auto-supervisés pour d'autres tâches de détection détections illégales. En particulier, nous nous intéressons aux rendez-vous en mer pour le transbordement de cargaisons illégales et à l'identification de navires en mer.

Remerciements

Les résultats présentés dans cet article ont été financés par le *"Research Council of Norway" (RCN)* dans le cadre du projet *"AI-driven testing of false data injection attacks against transport infrastructure (TSAR)"* [#287893]. En outre, les résultats ont été obtenus grâce à l'infrastructure expérimentale eX3 (exploration du calcul exascale), qui est également financée par le RCN [# 270053]. Les données S-AIS utili-

©AFIA2021

sées ont été généreusement mis à disposition par l'administration de la garde-côte Norvégienne.

Références

[1] Bryan Auslander, Kalyan Moy Gupta, and David William Aha. Maritime Threat Detection Using Probabilistic Graphical Models. In *Proc. of the 25th Int. FLAIRS Conf.*, May 2012.

[2] Dzmitry Bahdanau, Kyunghyun Cho, and Yoshua Bengio. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. In Yoshua Bengio and Yann LeCun, editors, *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, May 7-9, 2015, Conference Track Proceedings*, 2015.

[3] Jianpeng Cheng, Li Dong, and Mirella Lapata. Long short-term memory-networks for machine reading. In Jian Su, Xavier Carreras, and Kevin Duh, editors, *Proceedings of the 2016 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2016, Austin, Texas, USA, November 1-4, 2016*, pages 551–561. The Association for Computational Linguistics, 2016.

[4] Dominik Filipiak, Milena Stróżyna, Krzysztof Wecel, and Witold Abramowicz. Big data for anomaly detection in maritime surveillance : spatial AIS data analysis for tankers. *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, 215(4) :5–28, 2018.

[5] Natalie Fridman, Doron Amir, Yinon Douchan, and Noa Agmon. Satellite Detection of Moving Vessels in Marine Environments. In *Proc. of the AAAI Conf.*, volume 33, pages 9452–9459, July 2019.

[6] Kwang-Il Kim and Keon Myung Lee. Deep Learning-Based Caution Area Traffic Prediction with Automatic Identification System Sensor Data. *Sensors*, 18(9) :3172, September 2018.

[7] Lacey Malarky and Beth Lowell. Avoiding detection : Global case studies of possible AIS avoidance. Technical report, OCEANA, Oct. 2020.

[8] Fabio Mazzarella, Michele Vespe, Dario Tarchi, Giuseppe Aulicino, and Antonio Vollero. AIS reception characterisation for AIS on/off anomaly detection. In *19th Int. Conf. on Information Fusion (FUSION 2016), Heidelberg, Germany, July 5-8, 2016. IEEE 2016*, 2016.

[9] Duong Nguyen, Rodolphe Vadaine, Guillaume Hajduch, René Garello, and Ronan Fablet. A Multitask Deep Learning Architecture for Maritime Surveillance using AIS Data Streams. *IEEE 5th Int. Conf. on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, pages 331–340, October 2018.

[10] Duong Nguyen, Rodolphe Vadaine, Guillaume Hajduch, René Garello, and Ronan Fablet. GeoTrackNet-A Maritime Anomaly Detector using Probabilistic Neural Network Representation of AIS Tracks and A Contrario Detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021.

[11] Jaeyoon Park, Jungsam Lee, Katherine Seto, Timothy Hochberg, Brian A. Wong, Nathan A. Miller, Kenji Takasaki, Hiroshi Kubota, Yoshioki Oozeki, Sejal Doshi, Maya Midzik, Quentin Hanich, Brian Sullivan, Paul Woods, and David A. Kroodsma. Illuminating dark fishing fleets in north korea. 6(30) :eabb1197. Publisher : American Association for the Advancement of Science Section : Research Article.

[12] Lokukaluge P. Perera, Paulo Oliveira, and C. Guedes Soares. Maritime Traffic Monitoring Based on Vessel Detection, Tracking, State Estimation, and Trajectory Prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3) :1188–1200, September 2012.

[13] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N Gomez, Łukasz Kaiser, and Illia Polosukhin. Attention is All you Need. In *NeurIPS 2017*, pages 5998–6008, 2017.

[14] Henri Weimerskirch, Julien Collet, Alexandre Corbeau, Adrien Pajot, Floran Hoarau, Cédric Marteau, Dominique Filippi, and Samantha C. Patrick. Ocean sentinel albatrosses locate illegal vessels and provide the first estimate of the extent of nondeclared fishing. 117(6) :3006–3014. Publisher : National Academy of Sciences Section : Biological Sciences.

ABSG : un modèle d'agent socialement inspiré pour la formation de coalitions

Mickaël Bettinelli, Michel Occello, Damien Genthial
Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP*, LCIS, 26000 Valence, France
*Institut d'ingénierie Univ. Grenoble Alpes

mickael.bettinelli@lcis.grenoble-inp.fr

Résumé

Nous avons conçu un système d'aide à la décision dans le cadre de l'économie circulaire. Son but est de concevoir de nouveaux produits à partir de composants récupérés très variables. Ce système est ouvert, permettant d'ajouter ou de retirer des composants à tout moment. Les composants sont avatarisés en tant qu'agents virtuels et considérés comme un système multi-agent. Un utilisateur peut avoir besoin du système pour concevoir des produits. Les agents du système doivent donc former des coalitions qui représentent un produit. Nous proposons un nouveau modèle d'agent d'inspiration sociale adapté à ce système pour résoudre un problème de génération de structure de coalition. Ce modèle centré sur l'agent permet aux agents de savoir avec quel agent former une coalition basée sur les principes d'attraction des sciences humaines et sociales.

Mots-clés

Formation de coalitions, système multi-agent, modèle d'agent

Abstract

We have designed a decision support system for the circular economy. Its goal is to design new products from highly variable post-used components. This system is open, allowing components to be added or removed at any time. Components are avatarized as virtual agents and seen as a multiagent system. A user can require the system to design products. Therefore agents of the system must form coalitions that represent a product. We propose a new socially inspired agent model adapted to this system to tackle a coalition structure generation problem. This agent-centered model allows agents to find out with which agent to form a coalition based on the Humanities and Social Sciences principles of attraction.

Keywords

Coalition formation, multiagent system, agent model

1 Introduction

L'économie circulaire se concentre sur la réduction des déchets à travers la mise en place de stratégies de réutilisation dans un système de production. Le programme transdisciplinaire CIRCULAR (ANR-15-IDEX-02) est un projet qui développe les technologies et les conditions nécessaires pour rendre les nouveaux systèmes industriels circulaires capables de transformer des produits en fin de vie en nouveaux produits.

Dans [4], les auteurs ont introduit un nouveau système d'aide à la décision capable de concevoir de nouveaux produits à partir d'un ensemble de composants récupérés. Le système d'aide à la décision doit regrouper des composants permettant de concevoir les produits requis par un utilisateur. Le système dépend d'un ensemble de composants autonomes et variables en nombre et en caractéristiques (par exemple, le prix, les dimensions, la forme, etc.). Cependant, il ne s'agit pas d'optimiser un ensemble de quantités fixes, mais de faire émerger de nouvelles structures en nombre variable à partir des caractéristiques de chaque composant. Ainsi, le système peut présenter plusieurs solutions et les composants peuvent participer à plusieurs conceptions de produits simultanément, éventuellement en conflit lorsque les composants utilisés ne sont pas suffisamment nombreux pour toutes les fabriquer. Ces conflits peuvent nécessiter l'intervention de l'utilisateur et le comportement du système doit donc pouvoir être explicable. En outre, certaines solutions peuvent être incomplètes ou de niveaux de qualité différents. Le système est dynamique, ouvert, à grande échelle et ces dynamiques ne dépendent que du comportement intrinsèque des composants et de leur capacité à évoluer avec les données.

Il est alors complexe d'identifier un état global du système et d'en déduire un modèle de résolution global. Le problème est donc de décomposer de manière adéquate la modélisation d'un système composé d'une multitude d'agents autonomes. Nous nous tournons naturellement vers une méthode de résolution de problèmes incrémentale régie par une optimisation continue de l'interaction entre les éléments locaux : les systèmes multi-agents. Pour ce faire, nous avatarisons les composants en agents virtuels [14]. L'objectif des agents est décidé par l'utilisateur lorsqu'il demande au système de concevoir un produit. Ce faisant, il donne aux agents leurs désirs (*e.g.* un agent peut souhaiter faire partie d'une coalition avec un autre agent à bas prix). Ce problème de formation de groupe est appelé dans la littérature "problème de formation de coalitions" (CF) [17]. Comme les agents sont des entités autonomes, nous

©AFIA2021

les considérons comme des humains qui ont des désirs, des croyances et des objectifs. C'est pourquoi nous nous inspirons des sciences humaines et sociales (SHS) et de la dynamique de groupe pour aborder notre problème de CF. Cependant, il s'agit d'un vaste problème comportant de nombreuses variantes. Comme nous le verrons dans les sections suivantes, nous nous concentrons plus spécifiquement sur le problème de la génération des structures de coalitions (CSG).

Nous présentons ABSG (Attraction Based Structures Generation), un modèle d'agent d'inspiration sociale conçu pour traiter un problème de formation de coalitions décentralisé dans un système ouvert et variable. La partie 2 fait une brève présentation de la littérature sur le sujet. La partie 3 définit le problème. La partie 4 présente les propriétés et la prise de décision de notre modèle d'agent. Nous présentons l'opérationalisation de notre modèle dans la partie 5 et discutons de nos résultats expérimentaux dans la partie 6.

2 Revue de littérature

Le problème de CSG produit des groupes d'agents qui ont trois principales caractéristiques : (1) ils sont axés sur un objectif et ont une durée de vie courte, (2) ils sont formés avec un but et se séparent lorsque ce but n'existe plus et (3) les structures organisationnelles sont généralement plates [17]. Plusieurs approches sont utilisées pour aborder le problème de CSG, telles que, de manière non exhaustive : la programmation dynamique, le choix social informatique, l'intelligence distribuée, le multi-agent.

Les algorithmes de programmation dynamique sont des algorithmes créant des coalitions optimales. Le problème de formation de coalitions est traité par les CSP (Complete Set Partitioning) dans lesquels l'objectif est de trouver, à partir d'un ensemble d'entités fini, un ensemble de coalitions dont la somme des scores est maximisée. Le premier algorithme de programmation dynamique pour un problème de partitionnement d'un ensemble a été proposé par [21]. Il a plus tard servi d'inspiration à Michalak *et al.* dans [13] qui ont réalisé un des algorithmes les plus rapides pour résoudre le problème de CSP : ODP-IP. Bien que trouvant des solutions optimales, les algorithmes produits dans cette discipline sont très sensibles à l'explosion combinatoire et ne peuvent traiter des problèmes de formation de coalitions possédant plus d'une trentaine d'agents.

Le choix social s'intéresse à la conception et à l'analyse de méthodes de prise de décisions collectives. Le problème de formation de coalitions est aussi référé comme un problème d'assortiment (*matching*) dans lequel on peut affecter des agents à d'autres agents mais aussi des agents à des ressources. Cette seconde alternative est très similaire au problème d'allocation de tâches [2]. Le problème de l'assortiment est introduit par David Gale et Lloyd Shapley [7]. Dans ce travail les auteurs proposent un algorithme de mariages stables dans lequel l'objectif est de regrouper des hommes et des femmes deux à deux de manière à respecter au mieux les préférences de tous. Le problème est plus tard étendu au problème hôpitaux/résidents [12] [5]. Cependant, ce n'est plus un problème liant deux éléments de deux ensembles, mais un élément d'un ensemble à plusieurs éléments d'un autre ensemble. Ce problème peut être rapproché de la formation de coalitions où les hôpitaux seraient des coalitions d'un nombre d'individus prédéfini. Contrairement au problème de formation de coalitions comme nous l'abordons, ce ne sont pas les membres qui veulent s'associer à d'autres membres mais les groupes qui possèdent des préférences sur les futurs membres.

L'intelligence distribuée se concentre sur la coordination dans l'espace de multiples entités, appelées agents ou particules, sans contrôle centralisé. Les agents permettent via leur comportement le calcul distribué d'une solution à un problème de coordination. L'approche la plus courante consiste à analyser la formation et la stabilité d'un unique essaim constitué de quelques dizaines d'individus homogènes. Les particules sont dites homogènes lorsque celles-ci sont toutes identiques et que rien ne permet de les distinguer. Au contraire, elles sont dites hétérogènes lorsqu'elles ont leurs propres caractéristiques modifiant leur comportement. Kumar *et al.* présentent une méthode parvenant à doter les agents d'un essaim d'un comportement ségrégatif [11]. Leur méthode se base sur un champ de potentiel appliqué à chaque agent leur permettant de les agréger en un essaim stable. Inácio *et al.* utilisent une stratégie inspirée de l'optimisation par essaims particulaires (PSO) pour la ségrégation d'agents hétérogènes [9]. De la même manière que dans [11], les agents possèdent un type leur servant à identifier les individus avec lesquels former un essaim. Bien que plus adapté à un passage à l'échelle que les méthodes de programmation dynamique, notre problème de formation de coalitions ne consiste pas à regrouper des agents selon un type en plusieurs groupes disjoints mais de faire émerger des coalitions, possiblement chevauchantes, en fonction des caractéristiques et des désirs variables des agents du système.

Le multi-agent s'intéresse aussi aussi au problème de formation de coalitions. [18] présente la méthode SACF permettant de construire des coalitions dans un système ouvert. SACF est une méthode dynamique appliquée à un scénario de réseaux électriques intelligents où des agents peuvent former des coalitions afin de fournir de l'énergie à un réseau. Dans ce scénario, les agents doivent former des coalitions en interagissant uniquement avec le voisinage proche ce qui permet de limiter une explosion combinatoire liée aux problèmes de CSG. Les auteurs évaluent leur méthode jusqu'à 70 agents et montrent qu'elle est robuste à l'entrée et à la sortie des agents. En outre, leur méthode permet de former des coalitions d'une qualité très proche de l'optimum dans des expériences à petite échelle. Bien que leur approche donne de bons résultats, la dynamicité de leur système est limitée. En effet, l'énergie que les agents peuvent apporter au réseau ne peut pas varier pendant l'expérience. La réorganisation des coalitions n'est donc pas traitée par cette méthode. Dans [1], les auteurs présentent deux méthodes pour construire des coalitions basées sur les caractéristiques et les préférences de plusieurs agents qui ré-

duisent le nombre d'échecs dans la recherche de coalitions. Leur méthode permet à l'agent de prendre des décisions en fonction de préférences qui sont agrégées avec une intégrale de Choquet. Ce travail présente des similitudes avec le nôtre puisque nous utilisons également une notion de préférences, appelée attraction dans la suite. Cependant, leur objectif et les contraintes utilisées sont différentes. Alors que nous essayons de faire émerger les meilleures coalitions possibles dans un système multi-agent ouvert et variable, ils essaient d'empêcher leur méthode de ne pas trouver de coalition dans un système multi-agent non variable. Même si leur méthode empêche l'échec dans le processus de CF, ils n'évaluent pas la qualité des coalitions formées.

3 Définition du problème

Les agents ont leurs propres caractéristiques et désirs qui peuvent être modifiés à tout moment. Au lancement du système, chaque individu ignore les caractéristiques et les désirs des autres agents. Leur objectif est de former des coalitions avec les agents qui répondent le mieux à leurs désirs. Pour ce faire, les agents peuvent interagir et échanger leurs caractéristiques et leurs désirs. Les agents utilisent ces informations pour évaluer leurs accointances en calculant une valeur d'attraction. L'attraction représente la mesure dans laquelle un agent est attiré par une de ses accointances en fonction de plusieurs facteurs (le traitement de l'attraction est expliqué dans les parties suivantes). Plus la valeur est faible, plus l'attrait est important. Les agents ont la possibilité de former, de rejoindre ou de quitter des coalitions en fonction de la valeur d'attraction qu'ils ont pour les autres agents et pour leurs coalitions.

Dans le problème de CSG, nous considérons un ensemble d'agents N tel que $Agents = \{a_1, ..., a_n\}$ dans un système ouvert où les agents peuvent entrer ou sortir à tout moment. Soit CS l'ensemble des coalitions réalisées par les agents de telle sorte que $CS = \{Co_1, Co_2, ..., Co_n\}$. Une coalition Co_i est définie comme un tuple : $Co_i = \langle i, A, s \rangle$ où i est l'identifiant du groupe, $A \subset Agents$ et $|A| \geq 2$ et s est un agent leader avec $s \in A$. Un leader est un chef de coalition qui donne l'autorisation aux autres membres de la modifier lorsque ceux-ci veulent proposer à un membre extérieur de la rejoindre ou s'ils souhaitent la quitter. La représentation des coalitions n'étant pas centralisée, son rôle permet aux membres de maintenir une représentation correcte de leur coalition. C et D sont des ensembles de caractéristiques et de désirs tels que $C = \{c_1, c_2, ..., c_m\}$, $D = \{d_1, d_2, ..., d_m\}$ et $|C| = |D|$ car une caractéristique c_i est la satisfaction d'un désir d_i.

Chaque agent est défini comme un tuple : $a = \langle C^a, D^a, Acq^a, V^a, Coal^a, V^{ac} \rangle$ où :

- C^a est un ensemble de caractéristiques : $C^a = \{c_1^a, c_2^a, ..., c_n^a\}$ tel que $C^a \subset C$;
- D^a est un ensemble de désirs : $D^a = \{d_1^a, d_2^a, ..., d_n^a\}$ appartenant à l'agent tel que $D^a \subset D$;
- Acq^a est une liste d'agents. Elle représente ses accointances ;
- V^a est la liste des valeurs d'attraction liées à ses accointances telle que la valeur d'attraction pour l'accointance Acq_i^a est V_i^a et $V_i^a \geq 0$;
- $Coal^a$ est la liste des coalitions auxquelles l'agent appartient ;
- V^{ac} est la liste des valeurs d'attraction liées à ses coalitions de sorte que la valeur d'attraction pour la coalition $Coal_i^a$ est V_i^{ac} et $V_i^{ac} \geq 0$.

Les agents choisissent de former ou de rejoindre une coalition avec d'autres agents qui répondent à leurs désirs de telle sorte que $C^j \subset D^i$. Les agents sont égoïstes, ils essaient d'atteindre leur propre but. Ils ne sont pas conscients de l'objectif global du système multi-agent. Nous partons du principe que la connaissance des agents est exacte, que les communications ne peuvent pas être perturbées et que les agents sont dans un réseau entièrement connecté.

4 Modèle d'agent

La figure 1 montre un aperçu du modèle d'agent ABSG, composé de trois principaux modules : (1) les mémoires, (2) le module social et (3) le module décisionnel. Les sections 4.1, 4.2 et 4.3 détaillent ces modules. Les agents ABSG fonctionnent à plusieurs, ils ont besoin d'un protocole d'interaction pour se comprendre. Les actions représentent les messages qu'un agent peut envoyer. Les perceptions sont les messages reçus des autres agents. La partie 4.4 explique comment les agents interagissent.

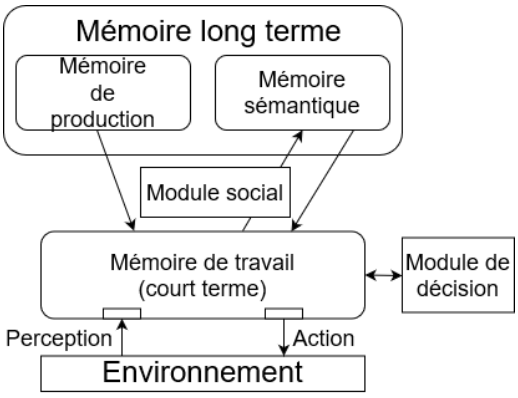


FIGURE 1 – Modèle ABSG

4.1 Mémoires

Comme décrit dans la partie précédente, nous sommes dans un contexte très variable où les agents peuvent être modifiés à tout moment. Notre modèle doit prendre en compte les modifications concernant l'agent lui-même et les autres agents de son environnement. Ainsi, les agents doivent être suffisamment adaptables pour former des coalitions avec de nouveaux entrants ou quitter une coalition en fonction des caractéristiques des autres membres. Pour répondre à ces besoins, notre modèle doit être capable de construire une représentation des agents et de leur environnement. Il doit stocker des informations sur ses propres caractéristiques et désirs et sur ses accointances (*e.g.* comment les contacter, quelles sont leurs caractéristiques, *etc.*). Ces informations

©AFIA2021

peuvent être stockées dans trois types de mémoires : (1) une mémoire de travail, mémoire à court terme stockant les variables temporaires utilisées par le module de prise de décision, (2) une mémoire sémantique, mémoire à long terme stockant des faits sur l'environnement de l'agent, (3) une mémoire de production, mémoire à long terme stockant des règles de prise de décision.

4.2 Module social

En plus de la représentation des connaissances, ABSG doit prendre des décisions en fonction de son environnement. Nous avons donc intégré une heuristique de sélection d'action et un module d'évaluation de la qualité dans notre modèle d'agent. Comme les humains sont bien adaptés pour former des groupes et y travailler efficacement, nous nous inspirons du champ de la *dynamique de groupe* [6] en SHS. *La dynamique de groupe* est un domaine qui décrit ce que sont les groupes restreints, comment ils sont formés et comment ils sont maintenus. En utilisant cette approche, nous introduisons une nouvelle métrique dans notre modèle d'agent permettant d'estimer pas à pas la qualité des autres agents. Ce module produit une valeur d'attraction évaluant dans quelle mesure un agent répond aux désirs d'un autre agent. La valeur d'attraction est traitée en s'inspirant de l'intelligence distribuée [19][3]. Elle est initialisée de manière aléatoire, puis mise à jour dynamiquement et régulièrement pendant le temps d'exécution de l'agent en fonction de son environnement. L'équation traitant l'attraction la fait converger si les croyances des agents ne sont pas modifiées (*cf.* preuve [3]). Cette façon de traiter la valeur d'attraction présente deux avantages : premièrement, elle permet aux agents d'explorer des solutions avant de converger vers un état final, deuxièmement, elle permet à un observateur externe de suivre la progression du système dans la recherche de solutions.

L'attraction est une distance entre deux points virtuels dans un espace euclidien à une dimension. Le premier représente l'agent qui traite la valeur, le second représente l'agent pour lequel on veut connaître la valeur d'attraction. L'équation suivante permet de mettre à jour l'attraction entre les deux agents en calculant le mouvement du second point dans l'espace :

$$\dot{x}^i = f\left(|x^i - x^j|\right) \tag{1}$$

$$f(y) = -y\left(\frac{a}{\|y\|} - \frac{b}{\|y\|^4}\right) \tag{2}$$

où x^i et x^j sont les positions des individus i et j dans l'espace euclidien et $i \neq j$. L'agent i, qui traite la valeur, ne se déplace pas et se trouve toujours au point 0. $f(y)$ est la fonction d'attraction/répulsion où a et b sont deux constantes et $||y||$| la norme euclidienne donnée par $||y|| = \sqrt{y^T y}$ qui est la distance entre deux agents dans l'espace euclidien. Nous avons également créé deux fonctions paramétriques pour choisir les bonnes constantes a et b.

$$f_a(z) = \frac{0.05^z}{2} \qquad f_b(z) = 20^{(3+z)} * z^3 \tag{3}$$

z est un biais qui intègre les facteurs sociaux décrit dans les parties suivantes. f_a et f_b ont été établis empiriquement. Ils permettent de conserver un bon rapport entre a et b et gèrent bien la fonction d'attraction/répulsion quelle que soit la valeur de z. Cependant, ces fonctions n'ont pas été conçues pour être optimales.

Dans *la dynamique de groupe*, le sous-domaine *formation de groupes* se concentre sur les processus qui génèrent des liens d'attraction entre les membres des groupes. Le processus de formation de groupes est un phénomène complexe qui implique de nombreuses dimensions. Parmi ces dimensions, les principes d'attraction prennent une grande part [15, 6, 8] :

- principe de similarité (s) : les individus aiment les personnes qui leur ressemblent [20]. Dans notre système, la similarité est une distance entre les désirs de deux agents ;
- principe de complémentarité (c) : les individus aiment les personnes qui leur ressemble et dont les qualités sont complémentaires aux leurs. Nous le représentons par la complémentarité des caractéristiques des agents ;
- principe d'attractivité physique (a) : les individus sont plus attirés par les personnes qui sont physiquement attractives. Dans notre système, l'attractivité physique est considérée comme l'adéquation entre les caractéristiques d'un individu et les désirs de l'autre ;
- principe du minimax (m) : les individus sont attirés par les personnes qui leur offrent une récompense maximale pour un coût minimal.

Les agents doivent être capables d'évaluer l'attrait qu'ils ont pour d'autres agents afin de former des groupes dans le système. Pour ce faire, nous construisons l'équation 4 qui intègre ces principes.

$$z = \frac{\frac{4}{3} * s * a}{c} + m \tag{4}$$

4.3 Module de décision

4.3.1 Prise de décision

La prise de décision du modèle ABSG est basée sur deux facteurs : (1) les règles de comportement issues de la mémoire de production, (2) la valeur d'attraction traitée pour les accointances ou les groupes. Les comportements sont un ensemble de règles qui indiquent comment un agent doit agir dans des situations spécifiques. Ils sont similaires à une déclaration "si/alors".

Règle 1. Si l'agent ne connaît pas les caractéristiques d'une de ses accointances, alors il les lui demande.
Règle 2. Si l'agent reçoit une demande de caractéristiques, alors il les envoie à l'accointance qui les demande.
Règle 3. Si l'agent a une valeur d'attraction inférieure à un seuil α pour une de ses accointances, alors il lui envoie une requête de formation d'un groupe.
Règle 4. Si l'agent reçoit une demande de formation d'un groupe et que la valeur de l'attraction pour l'émetteur de

la demande est inférieure à un seuil α, alors il accepte la requête, sinon il la refuse.

Règle 5. Si l'accointance possèdant la plus faible valeur d'attraction n'est pas dans le groupe qui possède la plus faible valeur d'attraction de l'agent, alors il lui envoie une requête à son accointance pour lui demander de rejoindre son groupe.

Règle 6. Si l'agent reçoit une demande pour rejoindre un groupe et que son attraction pour l'accointance émettrice est inférieure à un seuil β, alors il accepte, sinon il refuse.

Règle 7. Si l'attraction de l'agent pour un groupe est supérieure à un seuil γ, alors il le quitte en notifiant tous les autres membres de son départ.

Règle 8. Si un agent change de caractéristiques, alors il renvoie les nouvelles à toutes ses accointances.

Ces règles font partie du modèle ABSG et sont utilisées par les agents pour savoir quelle action exécuter en fonction de leur état actuel. Mais un agent doit choisir la bonne règle à appliquer. Pour cela, ils suivent un cycle de décision qui leur permet de sélectionner leur prochaine action.

4.3.2 Cycle de décision

Il est divisé en quatre phases :

- la phase d'élaboration : ABSG charge dans la mémoire de travail toutes les règles de production qui peuvent être déclenchées ;
- la phase de décision : ABSG choisit une règle à lancer. Si plusieurs règles peuvent être lancées, il choisit la règle de plus haute priorité qui est l'ordre dans lequel elles sont présentées dans la partie précédente ;
- la phase d'application : l'action de la règle sélectionnée est exécutée. La mémoire de travail et la mémoire sémantique sont modifiées ;
- la phase de socialisation : les valeurs d'attraction des connaissances et des coalitions sont mises à jour en fonction du nouvel état de la mémoire sémantique.

4.4 Interactions

Les interactions permettent aux agents de s'auto-organiser en coalitions. Les messages transmettent des informations telles que les caractéristiques des agents ou des requêtes afin de former, rejoindre ou quitter un groupe. Nous utilisons le langage de communication des agents (FIPA-ACL) pour faire communiquer les agents. La figure 2 illustre une instance du protocole interne d'un agent dans un scénario de formation de groupes. L'état 1 est le début, l'état 4 la fin, *!* dénote les messages émis, *?* les messages attendus et *x* l'identifiant de la nouvelle coalition.

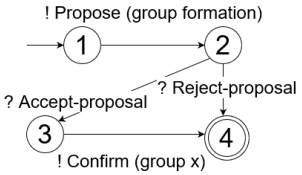


FIGURE 2 – Protocole de proposition de formation de groupe

5 Opérationalisation

5.1 Facteurs sociaux

Nous caractérisons un agent par deux listes de décimaux. Elles sont la représentation des caractéristiques et des désirs des agents sous forme numérique.

- caractéristiques personnelles (C) : ce sont les caractéristiques physiques des agents (par exemple, poids, forme, dimensions, prix, *etc.*) ;
- désirs (D) : sont les caractéristiques des accointances avec lesquelles les agents aimeraient former un groupe (*e.g.* dimensions désirées, prix désiré, *etc.*) ;

Dans cette expérience, nous utilisons une liste de trois décimaux compris entre 0 et 1 pour représenter les informations de chaque module de nos agents. La taille des matrices n'a aucune importance pour le bon fonctionnement du système. Afin d'utiliser ces informations, nous devons intégrer les principes de l'attraction de la partie 4.2 à notre expérimentation.

Similarité (s), Attrait physique. Le principe de similarité est une distance entre les désirs de deux agents. Le principe de l'attractivité physique est une distance entre les désirs d'un agent et les caractéristiques d'un autre agent. Soit $\lceil M \rceil$ le nombre d'éléments d'une matrice M à N dimensions.

$$s = \frac{\sqrt{u^T u}}{\lceil D \rceil} \qquad u = x_D^i - x_D^j \tag{5}$$

où x_D^i et x_D^j sont les matrices des désirs des agents i et j. Le principe de l'attractivité physique est traité avec la même équation en remplaçant les matrices utilisées par la matrice de désir d'un agent et les caractéristiques de l'autre.

Complémentarité (c). C'est une distance entre les caractéristiques de deux agents :

$$c = 1 - \frac{\sqrt{u^T u}}{\lceil C \rceil} \qquad u = x_C^i - x_C^j \tag{6}$$

où x_s^i et x_s^j sont les matrices des caractéristiques des agents i et j.

Principe du minimax. Il augmente l'attraction lorsqu'un individu rejette une proposition d'un autre. Il permet aux individus de cesser d'envoyer une demande lorsqu'elle a été rejetée plusieurs fois.

$$m = nbR * \epsilon \tag{7}$$

où nbR est le nombre de demandes rejetées par un agent et ϵ un paramètre à ajuster.

6 Expériences et analyses

6.1 Méthodologie

Dans ces expériences, pour simuler une demande de produit d'un utilisateur, le but des agents est de former des coalitions contenant un nombre spécifique de membres tout en trouvant les meilleurs agents en fonction de leurs désirs et de leurs caractéristiques. Nous avons défini la taille idéale

©AFIA2021

des coalitions à 4 pour les rendre réalisables dans les expériences à plus petite échelle. La valeur d'une coalition $V(C)$ est une valeur comprise entre 0 et 1. Elle est utilisée comme mesure de la qualité pour un utilisateur extérieur. 0 représente la qualité la plus faible qu'une coalition peut avoir, 1 représente la qualité la plus élevée.

$$V(C) = moyenne(S_c, R_c) \tag{8}$$

où R_c est la distance moyenne entre les désirs de chaque agent d'une coalition et les caractéristiques de tous les autres membres. S_c est un ratio associé à la taille de la coalition défini comme

$$S_c = \frac{(|cs - O_s|)}{O_s} \tag{9}$$

où cs est la taille d'une coalition et O_s la taille optimale d'une coalition. O_s est fixé à 4 pour ces expériences.
La valeur d'attraction $A(C)$ représente l'attraction qu'un agent exerce sur son groupe. Elle est traitée avec une équation proche de $V(C)$. $A(C)$ est définie de telle sorte que :

$$A(C) = \gamma_S S_c + \gamma_A A_c \tag{10}$$

où A_c est l'attraction moyenne que les agents ont pour les autres membres de la coalition.
Les seuils utilisés dans la section 4.3 sont choisis empiriquement : $\alpha = 5$, $\beta = 20$, $\gamma = 25$. Plus les α et les β sont petits, plus la qualité des coalitions est bonne et moins il y a de coalitions.
Dans les sections suivantes, nous évaluons cinq critères : (1) la durée des expériences, (2) la qualité des groupes formés, (3) la robustesse du système à la charge de communication, (4) la robustesse à l'ouverture, (5) la robustesse à la variabilité. Les caractéristiques et les désirs des agents sont générés de manière aléatoire pour les sections 6.2, 6.4 et 6.5 et de manière pseudo-aléatoire pour la section 6.3. Puisque nous avons besoin de connaître la meilleure solution pour évaluer la qualité de notre résultat, un script Python génère des agents afin que nous connaissions la valeur de la meilleure coalition possible. Les expériences sont effectuées cinq fois et moyennées. Elles sont exécutées sur un PC multi-cœur Intel i7-6600U CPU (2.60GHz), 16 Go, 64-bit, Manjaro Linux 20.1.

6.2 Durée des expériences

La figure 3 compare la durée d'exécution des algorithmes ODP et ODP-IP de [16] et celle du modèle ABSG. ODP-IP et ODP sont deux algorithmes exacts qui trouvent les meilleures coalitions possibles dans un système. Nous les exécutons sur la même machine qu'ABSG afin de comparer le temps d'exécution. ODP et ODP-IP sont plus rapides sur les premières expériences, le temps d'exécution augmente de façon exponentielle avec le nombre d'agents. Contrairement à ces deux algorithmes, le temps d'exécution d'ABSG est polynomial. ABSG devient plus rapide qu'ODP-IP à partir de 25 agents et plus rapide qu'ODP à partir de 23 agents. ABSG semble donc plus adapté pour traiter un nombre élevé d'agents comme notre système d'aide à la décision.

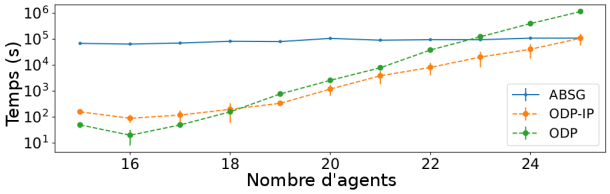


FIGURE 3 – Durée des expériences en fonction du nombre d'agents

6.3 Qualité des groupes

Nous avons généré les caractéristiques des agents pseudo-aléatoirement afin de connaître la valeur de la meilleure coalition que nos agents peuvent construire pendant l'exécution. La figure 4 compare nos résultats à la méthode SACF et à la méthode de Janovsky et Deloach. Le modèle d'agents produit de bonnes coalitions avec une qualité moyenne de 97,5% et un écart-type moyen de 1,1%. La méthode SACF et le modèle ABSG sont tous deux conçus pour traiter un problème de CSG dans un environnement ouvert. Dans [18], la valeur de la coalition est corrélée à la somme des valeurs des membres de la coalition tandis que dans [10], elle est définie comme la moyenne des gains que chaque membre des coalitions obtient de par sa participation à celles-ci. Mais comme ces méthodes expriment leur résultat en pourcentage de la solution optimale qu'elles peuvent trouver, la principale différence avec nos résultats est probablement due au fait que notre modèle d'agent est conçu pour un système d'aide à la décision et que nous ne considérons que la meilleure coalition comme une solution. Contrairement à ABSG, les solutions de la méthode SACF et de la méthode de Janovsky et Deloach sont une structure de plusieurs coalitions.

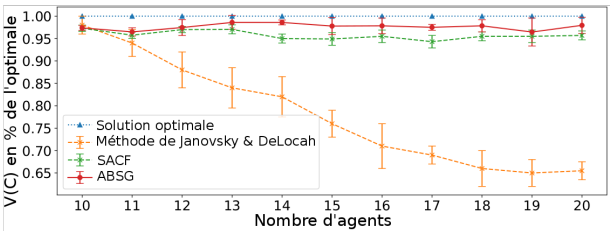


FIGURE 4 – Comparaison de la qualité des solutions pour l'ABSG, la méthode SACF et de la méthode de Jenovsky et DeLoach

6.4 Robustesse à la charge de communication

La figure 5 montre que le nombre de messages suit une augmentation polynomiale. Cela peut s'expliquer par le fait que les agents ne se connaissent pas au début de l'expérience. Ils doivent donc émettre des messages pour connaître les caractéristiques et les désirs des autres agents afin d'estimer leur attirance pour eux et de prendre des décisions. Au contraire, dans [18], les agents ne s'échangent pas d'information sur eux. Les messages leur servent uniquement à créer, rejoindre ou quitter des coalitions ce qui explique que leur méthode soit moins émettrice de communications que ABSG.

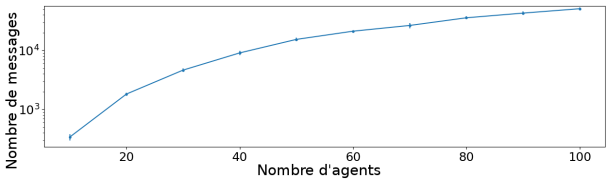


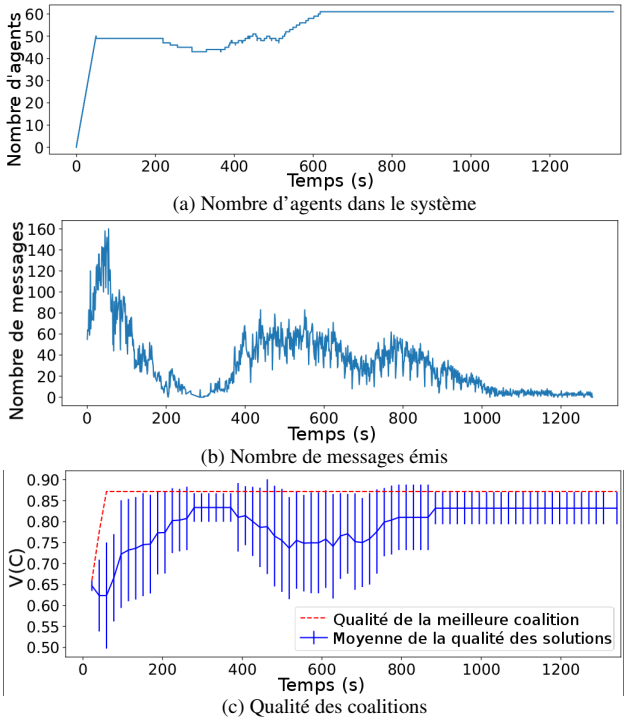
FIGURE 5 – Nombre de messages émis en fonction du nombre d'agents dans le système

6.5 Robustesse à l'ouverture

Nous voulons voir comment le système réagit lorsque nous ajoutons ou retirons des agents. Notez que, contrairement à la section 6.3, nous ne connaissons pas la valeur optimale qu'une coalition peut avoir. La figure 6a montre le nombre d'agents dans le système. Deux phases se chevauchent. Pendant la première (200s-500s), nous retirons aléatoirement des agents du système puis, pendant la seconde (400s-650s), nous en ajoutons de nouveaux. Tout en retirant des agents du système au cours de la première phase, le nombre de messages émis reste faible (figure 6b). D'abord parce que le système converge naturellement vers des solutions et que les agents réduisent leurs interactions. Mais nous retirons également les agents du système, laissant les agents restants avec moins d'accointances avec lesquelles interagir. Au contraire, la suppression d'agents ne semble pas avoir d'impact sur la qualité moyenne des coalitions (figure 6c). Cela peut être dû au fait que tous les agents éliminés ne faisaient pas partie d'une coalition à ce moment-là. Dans la deuxième phase, on peut voir que le lancement de nouveaux agents augmente le nombre de messages émis. Lorsqu'ils entrent dans le système, ils sont inconnus et les agents doivent envoyer leurs caractéristiques et leurs désirs à d'autres. La première fois, l'introduction de nouveaux agents diminue la qualité moyenne des coalitions. En effet, la valeur d'attraction des anciens agents pour les nouveaux est initialisée de manière aléatoire. Ensuite, lorsque le nombre d'agents dans le système est stable, de nouveaux agents entrent dans les coalitions et la qualité des coalitions augmente.

6.6 Robustesse à la variabilité

Dans cette expérience de 50 agents, nous voulons voir comment le système réagit si les agents changent aléatoirement leurs caractéristiques et leurs désirs. Dans cette expérience, nous ne connaissons pas la valeur optimale qu'une coalition peut avoir. À environ 200s, tous les agents modifient aléatoirement les valeurs de leurs caractéristiques et de leurs désirs, ce qui entraîne l'explosion des messages émis (figure 7a). Conformément à la règle 8, lorsque les agents reçoivent de nouvelles caractéristiques, ils doivent les envoyer à leurs accointances. La qualité des coalitions sont largement affectées par ces modifications (figure 7b). Lorsqu'ils reçoivent les nouvelles caractéristiques de leurs accointances, les agents mettent à jour toutes leurs valeurs d'attraction et se réorganisent, ce qui augmente la moyenne des qualités de coalition. Seules les coalitions détériorées par les changements de caractéristiques et de désirs des



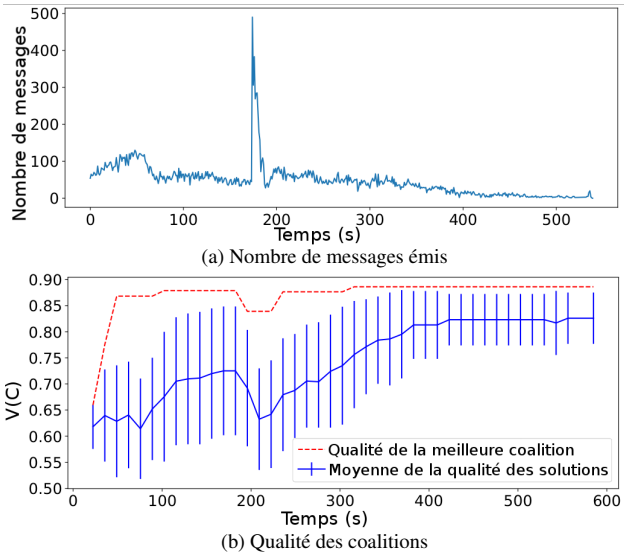
(a) Nombre d'agents dans le système

(b) Nombre de messages émis

(c) Qualité des coalitions

FIGURE 6 – Expérimentation de l'ouverture

agents se réorganisent. Si une coalition reste de bonne qualité après la modification des agents, celle-ci n'est pas modifiée. Le système recherche des solutions de manière incrémentale et peut s'adapter à des modifications de ses agents sans avoir à reconstruire les coalitions en partant de zéro. En outre, on remarquera que le système est anytime, il est capable de délivrer une solution à tout moment.



(a) Nombre de messages émis

(b) Qualité des coalitions

FIGURE 7 – Expérimentation de la variabilité

7 Conclusion

Nous avons présenté le modèle d'agent ABSG conçu pour résoudre le problème de génération de structures de coa-

©AFIA2021

litions. Ce modèle est basé sur les principes d'attraction des SHS et permet aux agents de former des coalitions. Les coalitions sont construites sur la base d'une valeur d'attraction que chaque agent du système estime pour ses accointances. Cette valeur est prise en compte par les agents pour former des coalitions, les rejoindre ou les quitter. Les résultats expérimentaux montrent qu'ABSG est plus adapté pour une application à grande échelle que les algorithmes d'optimisation. Nous montrons également que les coalitions formées par les agents d'ABSG sont proches de l'optimum lors d'expériences à petite échelle. En outre, ABSG produit de meilleures coalitions que certaines autres approches similaires de la littérature. Nous montrons également qu'ABSG est adapté à un système ouvert et variable où les agents peuvent-être modifiés à tout moment dans des expériences à grande échelle. Les travaux futurs consisteront à intégrer pleinement le modèle d'agent dans un système d'aide à la décision et à le tester sur un cas d'étude réèl.

Références

[1] Samir Aknine, Suzanne Pinson, and Melvin F Shakun. A multi-agent coalition formation method based on preference models. *Group Decision and Negotiation*, 13(6) :513–538, 2004.

[2] Elliot Anshelevich and Wennan Zhu. Ordinal approximation for social choice, matching, and facility location problems given candidate positions. *ACM Transactions on Economics and Computation (TEAC)*, 9(2) :1–24, 2021.

[3] Mickael Bettinelli, Occello Michel, and Genthial Damien. Coalition formation problem : a group dynamics inspired swarming method. *HAL preprint hal-02903531*, 2020.

[4] Mickaël Bettinelli, Michel Occello, Damien Genthial, and Daniel Brissaud. A decision support framework for remanufacturing of highly variable products using a collective intelligence approach. *Procedia CIRP*, 90 :594–599, 2020.

[5] Felix Brandt, Vincent Conitzer, Ulle Endriss, Jérôme Lang, and Ariel D Procaccia. *Handbook of computational social choice*. Cambridge University Press, 2016.

[6] Donelson R Forsyth. *Group dynamics*. Cengage Learning, 2010.

[7] David Gale and Lloyd S Shapley. College admissions and the stability of marriage. *The American Mathematical Monthly*, 69(1) :9–15, 1962.

[8] David Dryden Henningsen, Mary Lynn Miller Henningsen, and Paul Booth. Predicting social and personal attraction in task groups. *Groupwork*, 23(1) :73–93, 2013.

[9] Fabrício R Inácio, Douglas G Macharet, and Luiz Chaimowicz. Pso-based strategy for the segregation of heterogeneous robotic swarms. *Journal of Computational Science*, 31 :86–94, 2019.

[10] Pavel Janovsky and Scott A DeLoach. Multi-agent simulation framework for large-scale coalition formation. In *2016 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI)*, pages 343–350. IEEE, 2016.

[11] M. Kumar, D. P. Garg, and V. Kumar. Segregation of heterogeneous units in a swarm of robotic agents. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(3) :743–748, 2010.

[12] David F Manlove. Hospitals/residents problem. 2008.

[13] Tomasz Michalak, Talal Rahwan, Edith Elkind, Michael Wooldridge, and Nicholas R Jennings. A hybrid exact algorithm for complete set partitioning. *Artificial Intelligence*, 230 :14–50, 2016.

[14] Michael Mrissa, Lionel Médini, Jean-Paul Jamont, Nicolas Le Sommer, and Jérôme Laplace. An avatar architecture for the web of things. *IEEE Internet Computing*, 19(2) :30–38, 2015.

[15] Theodore M Newcomb. Some varieties of interpersonal attraction. 1960.

[16] Talal Rahwan, Tomasz P Michalak, Edith Elkind, Michael Wooldridge, and Nicholas R Jennings. An exact algorithm for coalition structure generation and complete set partitioning. DCS, 2013.

[17] Talal Rahwan, Tomasz P Michalak, Michael Wooldridge, and Nicholas R Jennings. Coalition structure generation : A survey. *Artificial Intelligence*, 229 :139–174, 2015.

[18] Gabriel De O. Ramos, Burguillo Juan C., and Ana L.C. Bazzan. Self-adapting coalition formation among electric vehicles in smart grids. In *2013 IEEE 7th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, pages 11–20, 2013.

[19] Hong Shi and Guangming Xie. Collective dynamics of swarms with a new attraction/repulsion function. *Mathematical Problems in Engineering*, 2011, 2011.

[20] Elaine Walster, Vera Aronson, Darcy Abrahams, and Leon Rottman. Importance of physical attractiveness in dating behavior. *Journal of personality and social psychology*, 4(5) :508, 1966.

[21] D Yun Yeh. A dynamic programming approach to the complete set partitioning problem. *BIT Numerical Mathematics*, 26(4) :467–474, 1986.

Modèles de Flocking adaptés aux Environnements avec Obstacles et Communications Dégradées

Alexandre Bonnefond[1,2], Olivier Simonin[1], Isabelle Guerin-Lassous[2]

[1] CHROMA team, CITI, INSA Lyon & Inria
[2] DANTE team, LIP, Lyon 1 & Inria

prenom.nom@inria.fr

Résumé

Dans ce papier, nous étudions des modèles de flocking existants et proposons des extensions afin d'améliorer leurs performances dans des environnements ayant des obstacles impactant les communications. Souvent décrits comme des systèmes robustes, il y a cependant un manque de compréhension quant à la comparaison de ces modèles et à l'impact de la qualité des communications sur l'échange des données de contrôle. En tenant compte de la propagation radio, nous modélisons comment les obstacles impactent les communications dans un simulateur que nous utilisons notamment pour optimiser les paramètres du flocking. Les résultats des simulations montrent l'efficacité des modèles proposés et la façon dont ils s'adaptent à ces nouvelles contraintes environnementales.

Mots-clés

Modèles de flocking, robotique en essaim, simulation des communications.

Abstract

In this paper, we study existing flocking models and propose extensions to improve their abilities to deal with environments having obstacles impacting the communication quality. Often depicted as robust systems, there is yet a lack of understanding how flocking models compare and how they are impacted by the communication quality when they exchange control data. By taking into account the radio propagation, we model the obstacles' impact on communications in a simulator that we use to optimize flocking parameters. The simulation results show the efficiency of the proposed models and how they adapt to different environmental constraints.

Keywords

Flocking models, swarm robotics, simulation of commmunications.

1 INTRODUCTION

Depuis sa formulation par Craig Reynolds [2] en 1987, le principe du flocking n'a cessé de susciter un intérêt grandissant. Fondé sur trois interactions simples entre agents, la cohésion, la séparation et l'alignement (voir Fig. 1) le flocking est un modèle décentralisé qui permet à un essaim de se déplacer dans divers types d'environnements. Si ce modèle a été initialement pensé comme un contrôleur fondé sur les perceptions locales, le développement des drones autonomes et leurs moyens de communications permettent d'adapter le flocking à ce type d'agents. Les drones sont capables aujourd'hui d'échanger avec leurs voisins proches, via un canal de communication haute fréquence, les informations nécessaires au flocking comme leur vitesse et leur position. Ainsi, la plupart des travaux récents [3][4][5] considèrent des flockings exploitant les communications. Cependant, ils ne prennent pas en compte les caractéristiques des communications et comment elles sont impactées par la présence d'obstacles. Des hypothèses trop simples sont un frein pour la définition de modèles exploitables en conditions réelles. Les travaux de [6] donnent une bonne idée des effets de communication réalistes sur un comportement émergent. Cependant, les contrôleurs proposés sont trop simples pour refléter comment les modèles de flocking standards sont affectés.

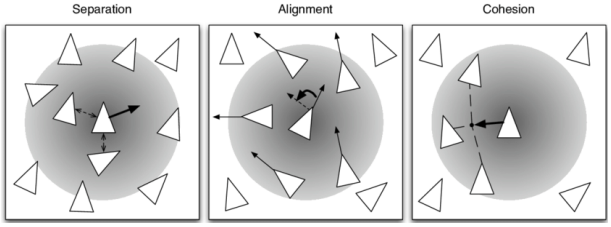


FIGURE 1 – Flocking : les 3 interactions définies par Reynolds (illustration de Bouraqadi et Doniec [1])

Le but de cet article est de comparer les modèles de flockings et d'examiner comment ils sont impactés par la qualité des communications pour l'échange de données de contrôle, cette qualité variant selon la distribution des obstacles. Dans ce cadre, nous proposons d'étendre deux modèles de référence (Olfati-Saber [3] et Vásárhelyi/ Vicsek [5]) pour améliorer leur robustesse à la présence d'obstacles et leur décentralisation. Nous étendons le simulateur de flockings de Viragh *et al.* [7] pour évaluer ces modèles. En combinant cet outil avec un processus d'optimisation des paramètres nous montrons que les modèles

©AFIA2021

de flocking proposés sont plus robustes dans les environnements très contraints.
En Section 2, nous présentons les modèles de flocking existants avec un focus sur les deux modèles de référence étendus dans cet article. Ces extensions sont présentées en détail en Section 3. La Section 4 présente les modèles de communication réalistes introduits dans les simulations, et comment ils permettent de redéfinir la notion de voisinage. Nous comparons alors ces différents modèles en Section 5 en considérant des environnements variés en termes d'obstacles, avant de conclure.

2 Modèles de flocking existants

Les modèles de flocking sont généralement utilisés pour réaliser le déplacement collectif d'une flotte d'agents ou de robots. Ces modèles reposent sur trois interactions fondamentales introduites par Reynolds [2] :

- **La séparation** des voisins pour éviter les collisions
- **L'alignement** avec les voisins pour une direction/vitesse proche des voisins
- **L'attraction** vers les voisins pour maintenir la cohésion.

On note N le nombre d'agents dans le système. Chaque agent i est défini par sa position $\mathbf{q}_i$ et sa vitesse $\mathbf{v}_i$ (les notations en gras représentent des vecteurs). Chaque agent a un ensemble de voisins N_i avec lesquels il interagit :

$$N_i = \{j \in [\![1, .., N]\!]; j \neq i : \|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\| \leq r\} \quad (1)$$

où r est la distance inter-agent maximum sous laquelle deux agents sont considérés voisins.
La plupart des modèles de flocking sont définis sur la base de ces trois interactions, mais lorsqu'elles sont traduites en contrôle bas-niveau plusieurs variantes et extensions existent. Parmis ces modèles de flocking, on trouve dans la littérature les approches leader-follower [8], champs de potentiels [9], behavior-based [10], les structures virtuelles [11] ou encore les modèles construits par apprentissage par renforcement [12]. Selon l'approche choisie ce ne sont pas les mêmes caractéristiques qui sont mises en avant et le comportement du flocking peut être différent.
Aujourd'hui le flocking est utilisé pour répondre à différentes problématiques et le modèle de Reynolds est intégré dans des contrôleurs multi-agent plus complexes comme celui d'Olfati-Saber [3] (noté O-S plus loin). Dans son travail, en 2006, l'auteur définit un cadre mathématique approprié afin d'assurer la stabilité de son modèle. Cet aspect est primordial dans la théorie du contrôle et garantit un comportement non chaotique ce qui est indispensable pour des applications basées sur l'utilisation de drones par exemple. Olfati-Saber introduit également des fonctionnalités telles que l'évitement d'obstacles ainsi qu'une "rétroaction de navigation" donnant aux agents une direction globale dans laquelle se diriger. Cette dernière caractéristique est capitale pour éviter la fragmentation de la flotte (*i.e.* la formation de multiple clusters). Pour ces raisons, ce modèle a été largement réutilisé dans la littérature [13] [12] avec quelques modifications afin de servir différents objectifs. La dynamique utilisée par Olfati-Saber est basée sur une régulation en vitesse ($\dot{\mathbf{q}}$), par un double intégrateur :

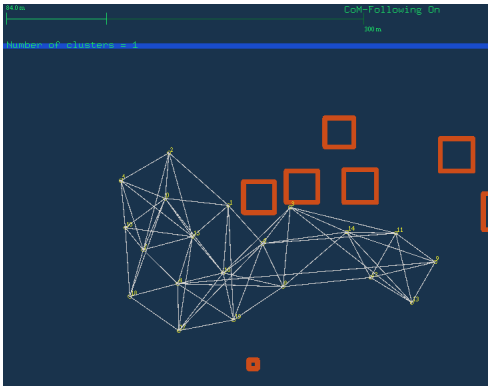


FIGURE 2 – Représentation des agents avec les liens de communication effectifs (utilisés pour interagir) utilisant le modèle d'Olfati-Saber (O-S), obstacles en orange

.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i \end{cases}, \quad (2)$$

et l'entrée du contrôle $\mathbf{u}_i$, appliquée à chaque agent i repose sur la somme de 3 forces :

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{f}_i^g + \mathbf{f}_i^d + \mathbf{f}_i^\gamma, \quad (3)$$

où $\mathbf{f}_i^g$ est un terme basé sur un gradient combinant à la fois la séparation et l'attraction, $\mathbf{f}_i^d$ est le terme d'alignement de vitesse qui agit comme une force de frottement visqueux et $\mathbf{f}_i^\gamma$ est la rétroaction de navigation. Ce dernier terme agit comme si il y avait un leader virtuel dont la position et la vitesse seraient connues par tous les agents. Nous verrons dans la Section 3 que nous utilisons le travail d'O-S comme première couche pour construire un nouveau modèle qui répond à nos attentes. Néanmoins, comme nous visons un flocking sans direction préférentielle ou but de haut niveau connu des agents, nous ne prendrons pas en compte ce terme de rétroaction. La Fig. 2 représente l'évolution des agents utilisant le modèle d'O-S. On se rend compte de la régularité du "maillage" formé par les agents.
Un autre formalisme majeur du flocking a été introduit par Vicsek [14] en 1995 et considère que les agents sont "autopropulsés". Cette caractéristique, qui dérive d'observations des matériaux ferromagnétiques, sera très importante dans notre formulation dans le sens où elle mène à un *flocking pur* (comme défini plus haut). S'appuyant sur cette idée, Vásárhelyi et al. ont développé un framework [5] qui rassemble un simulateur incluant les caractéristiques d'un environnement réaliste telles que les délais de communication, l'inertie, la fréquence de fonctionnement des capteurs, les approximations des capteurs embarqués et les bruits ambiants. Le modèle est défini par une équation d'accélération $\mathbf{a}_i$ pour chaque agent i (voir [7]). En omettant le bruit, cette accélération est colinéaire à la différence entre les vecteurs vitesse désirée $\mathbf{v}_i^d$ et vitesse actuelle $\mathbf{v}_i$. Elle est également

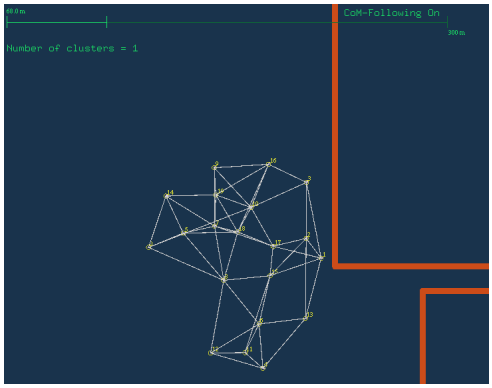


FIGURE 3 – Représentation des agents avec les liens de communication effectifs (utilisés pour interagir) utilisant le modèle de Vásárhelyi.

bornée par une accélération maximum :

$$\mathbf{a}_i = \boldsymbol{\eta}_i + \frac{\mathbf{v}_i^d - \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i^s}{|\mathbf{v}_i^d - \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i^s|} \cdot \min\left\{\frac{\mathbf{v}_i^d - \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i^s}{\tau_{CTRL}}, a_{max}\right\}, \tag{4}$$

où $\boldsymbol{\eta}_i$ représente le bruit extérieur (tel que l'effet du vent), $\mathbf{v}_i^s$ correspond au bruit interne sur la mesure de vitesse (due aux approximations du GPS), τ_{CTRL} est le temps d'établissement du contrôleur en vitesse, a_{max} est l'accélération maximum fixée et $\mathbf{v}_i^d$ est la vitesse désirée qui est bornée :

$$\mathbf{v}_i^d = \frac{\tilde{\mathbf{v}}_i^d}{|\tilde{\mathbf{v}}_i^d|} min\{|\tilde{\mathbf{v}}_i^d|, v^{max}\}, \tag{5}$$

où v^{max} est la vitesse maximale autorisée pour chaque agent et $\tilde{\mathbf{v}}_i^d$ est définie de la manière suivante :

$$\tilde{\mathbf{v}}_i^d = \frac{\mathbf{v}_i}{|\mathbf{v}_i|} v^{flock} + \mathbf{v}_i^{rep} + \mathbf{v}_i^{frict} + \sum_s \mathbf{v}_{is}^{wall} + \sum_s \mathbf{v}_{is}^{obstacle} \tag{6}$$

où $\mathbf{v}_i$ est la vitesse réelle de l'agent i, v^{flock} est la vitesse souhaitée, $\mathbf{v}_i^{rep}$ est le terme de répulsion basé sur le modèle du demi ressort, $\mathbf{v}_i^{frict}$ est le terme d'alignement qui synchronise le mouvement au sein de la flotte, $\mathbf{v}_{is}^{wall}$ et $\mathbf{v}_{is}^{obstacle}$ correspondent aux termes utilisés pour l'évitement d'obstacles et de murs. La combinaison de cette loi de contrôle ajoutée aux expériences réelles en extérieur présentées dans l'article font de ce framework une piste très intéressante pour nos travaux et c'est pour cette raison que nous allons nous en inspirer pour proposer une version étendue. La Fig. 3 représente l'évolution des agents avec le modèle de Vásárhelyi. Bien que le maillage créé par les agents semble moins régulier que pour le modèle d'O-S (Fig. 2), il n'en est pas moins robuste comme le montreront les résultats de la Section 5.

Bien que ces différents modèles atteignent de bonnes performances en simulation, en termes de stabilité et de robustesse, de nombreux problèmes surgissent quand il s'agit de passer à des expériences à grande échelle (avec des vrais drones en extérieur). En effet, comme expliqué dans l'article [5], en pratique, de nombreuses pertes de communication surviennent et c'est un inconvénient majeur lorsque l'on travaille avec des drones.

3 Extension des modèles de flocking

Afin d'éviter les désavantages rencontrés par les modèles présentés en section 2 quand ils sont mis dans un environnement plus réaliste, nous proposons de nouveaux modèles de flocking. Ces derniers exploitent les interactions fondamentales des modèles précédents [5] et [3] avec de nouvelles fonctionnalités visant à plus de robustesse en présence d'obstacles.

3.1 Modèle VAT : Vásárhelyi + Attraction

De par sa stabilité, le contrôleur en vitesse de Vásárhelyi défini en (6) ne contient pas de terme d'attraction dans sa forme initiale. Cependant, une fois mis dans un environnement fortement contraint (incluant des délais et des erreurs dans les communications, approximation de position et présence de multiples obstacles) nous nous sommes rendu compte que la fréquence des coupures de communication augmentait rapidement menant à un accroissement du nombre de fragmentations de la flotte. Nous avons donc décidé d'introduire un terme d'attraction basé sur le modèle du demi-ressort afin d'améliorer la cohésion de la flotte dès que possible :

$$v_{ij}^{att} = \begin{cases} p^{att}(r_0^{att} - q_{ij})\dfrac{\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j}{q_{ij}}, & \text{si } q_{ij} > r_0^{att} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \tag{7}$$

où p^{att} est un gain linéaire, $q_{ij} = |\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j|$ est la distance entre les agents i et j et r_0^{att} est la portée d'attraction en-dessous de laquelle les agents arrêtent de s'attirer pour éviter les collisions. Ajouter ce terme à la loi de contrôle doit être fait en accord avec le terme de répulsion afin d'éviter de créer un phénomène oscillatoire instable. Par conséquent, r_0^{att} doit être suffisamment grande pour que les agents aient une marge de déplacement entre l'attraction et la répulsion. Notre première proposition consiste donc en un contrôleur basé vitesse dénoté VAT (ajout de $\mathbf{v}_i^{att}$ à l'eq. (6)) :

$$\tilde{\mathbf{v}}_i^d = \frac{\mathbf{v}_i}{|\mathbf{v}_i|} v^{flock} + \mathbf{v}_i^{rep} + \mathbf{v}_i^{att} + \mathbf{v}_i^{frict} + \sum_s \mathbf{v}_{is}^{wall,obst} \tag{8}$$

Les interactions avec les murs et les obstacles sont concaténées dans le même terme $\sum_s \mathbf{v}_{is}^{wall,obst}$ et l'équation (5) reste valide. Cette vitesse désirée englobe 12 paramètres agissant sur chaque terme de cette loi et produisant des comportements différents. Nous verrons dans la section 5.2 comment ces paramètres sont optimisés afin d'atteindre un comportement optimal.

3.2 Modèle VOS : Vásárhelyi + Olfati-Saber

Le second modèle que nous proposons, dénoté VOS, est basé sur une combinaison du modèle d'Olfati-Saber [3] pour sa stabilité ainsi que certaines parties du modèle de Vásárhelyi [5] afin d'avoir l'auto propulsion et l'évitement

©AFIA2021

d'obstacles. Pour cela, nous avons développé une structure de contrôle imbriquée alliant les deux contrôleurs :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = \alpha \mathbf{f}_i^g + \beta \mathbf{f}_i^d & \text{(9a)} \\ \tilde{\mathbf{v}}_i^d = \dfrac{\mathbf{v}_i}{|\mathbf{v}_i|} v^{flock} + \sum_s \mathbf{v}_{is}^{wall,obst} + \int_{T_s} \mathbf{u}_i \, dt & \text{(9b)} \end{cases}$$

$\mathbf{u}_i$ correspond à l'éq. (3) d'O-S sans la rétroaction de navigation $\mathbf{f}_i^\gamma$. En effet son calcul centralisé était introduit pour gérer la fragmentation. Or nous voulons développer un système de flocking totalement décentralisé. Dans 9a, α et β sont des coefficients multiplicateurs qui compensent le délai introduit par l'intégration. Dans 9b, $\tilde{\mathbf{v}}_i^d$ de l'éq. (2) d'O-S est étendue en introduisant le terme d'auto propulsion de Vásárhelyi (v^{flock}), qui permet de gérer localement la fragmentation. Nous ajoutons aussi un terme d'évitement des obstacles de l'environnement, semblable à celui de Vásárhelyi. Enfin, $T_s = 1/f_s$ avec f_s la fréquence nominale du contrôleur. Les équations qui en découlent englobent 10 paramètres qui nécessiteront une optimisation (voir la section 5.2).

4 Communications et voisinage en présence d'obstacles

La plupart des simulations de flocking considèrent des communications idéales et ne prennent pas en compte l'impact de l'environnement sur la qualité des communications, provoquant un écart conséquent avec les conditions d'expérimentation réelles.

Généralement, les simulations utilisent un seuil de distance en-dessous duquel la communication est possible et inversement (paramètre r de l'éq. 1). Avec ce type d'approche, les communications sont parfaites [3], ou plus réalistes avec la prise en compte de délais et pertes de paquets aléatoires comme dans [5] [7]. Dans [15], les auteurs développent un système hybride de propagation combinant une étape de prédiction et une étape d'apprentissage de l'affaiblissement de propagation. Ils utilisent l'outil SPLAT ![1] afin de prédire les fluctuations du champ de propagation en fonction de la topologie d'une zone. Bien que cette méthode donne une bonne estimation des mesures radio, elle ne se soucie pas de l'adaptation du système multi-agent face à ces variations. Sur le même sujet, dans [6], l'auteur explique comment un comportement émergent, tel que le flocking, est impacté lorsque l'on utilise un modèle de propagation relativement réaliste. Cependant l'étude sur la dynamique du flocking mis en place est peu approfondie dans cet article.

Dans la suite, nous introduisons une étape d'estimation de la propagation radio en utilisant le modèle *log distance path loss* (noté LDPL) à la fois dans le vide mais aussi au sein des obstacles et nous regardons comment des environnements hétérogènes affectent la qualité de communication et donc la stratégie de flocking.

1. Informations pour SPLAT ! : https ://www.qsl.net/kd2bd/splat.html

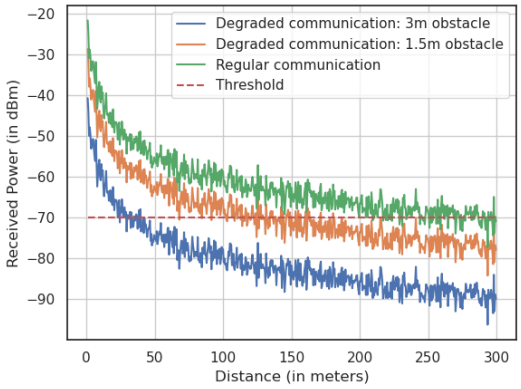


FIGURE 4 – Évolution de la puissance reçue en fonction de la distance inter-agent. La courbe verte représente un chemin sans obstacle, la courbe orange représente un chemin qui intègre un obstacle de 1.5 mètres et la courbe bleue intègre un obstacle de 3 mètres de long.

4.1 Modèle de perte *Log distance* en environnements avec obstacles

Au lieu d'utiliser un modèle de communication basé uniquement sur la distance inter-agent, nous souhaitons modéliser de manière plus précise la manière dont évoluent les ondes radio avec l'environnement et par conséquent savoir comment sont affectées les interactions pour un voisinage donné. Pour ce faire, nous considérons le modèle LDPL qui prédit la perte de puissance qu'un signal subit en fonction de l'environnement [16]. Il se formule de la façon suivante :

$$PL = P_{Tx_{dBm}} - P_{Rx_{dBm}}, \tag{10}$$

$$PL = \begin{cases} PL_0 + 10\gamma log_{10} \dfrac{d}{d_0} + X_g, & \text{si } d \geq d_0 \\ PL_0, & \text{sinon} \end{cases} \tag{11}$$

où, PL est l'affaiblissement du signal entre l'émetteur et le récepteur considérés et séparés d'une distance d mesuré en décibels (dB), $P_{Tx_{dBm}}$ est la puissance du signal émis par l'émetteur en dBm, $P_{Rx_{dBm}}$ est la puissance du signal reçu par le récepteur en dBm, PL_0 est l'affaiblissement du signal sur une distance de référence d_0 calculé en utilisant le modèle de Friis d'affaiblissement en espace libre sans obstacle (une valeur de 6m a été choisie pour d_0), γ est le coefficient de l'affaiblissement qui dépend de l'environnement et X_g est un bruit qui représente les variations de l'affaiblissement causées par les obstacles et les chemins multiples. Cette variable suit une distribution normale centrée en zero et un écart type σ dB. Ce modèle sera appelé **regular** par la suite. La courbe verte de la Figure 4 représente l'évolution de $P_{Rx_{dBm}}$ en fonction de la distance entre le récepteur et l'émetteur, dans un environnement où il n'y a pas d'obstacles et lorsque $P_{Tx_{dBm}} = 20dBm$. Nous pouvons voir qu'il faut environ 300 mètres pour atteindre le seuil de puissance $P_{min} = -70dBm$ correspondant au niveau minimum de puissance requis pour établir une communication entre les agents.

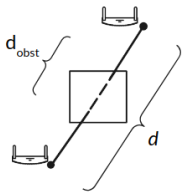


FIGURE 5 – Représentation du chemin parcouru par un signal entre deux nœuds et traversant un obstacle.

Dans la formule précédente, l'environnement est modélisé par, entre autres, le paramètre γ et X_g. Afin de prendre en compte l'impact des différents obstacles sur la qualité de communication, nous ajoutons un modèle de dissipation au sein des obstacles créant des pertes majeures en termes de puissance reçue. L'affaiblissement du signal résultant s'exprime de la façon suivante :

$$PL = \begin{cases} PL_0 + 10\gamma log_{10}(\frac{d-d_{obst}}{d_0}) & \text{si } d - d_{obst} \geq d_0 \\ + X_g + PL_{obst}(d_{obst}), & \\ PL_0 + PL_{obst}(d_{obst}), & \text{sinon} \end{cases} \quad (12)$$

où, d_{obst} est la distance parcourue par le signal au sein d'un obstacle (voir Fig. 5) et PL_{obst} est l'affaiblissement du signal en dB dû à l'obstacle. PL_{obst} est définie de la manière suivante :

$$PL_{obst}(d_{obst}) = 10\gamma_{obst} log_{10}(d_{obst}) + K \quad (13)$$

où γ_{obst} est le coefficient d'affaiblissement pour un obstacle et K est une constante. Nous supposons que $d_{obst} \geq 1m$. Nous appellerons ce modèle **degraded**. Les courbes orange et bleu dans la Figure 4 représentent l'évolution de $P_{Rx_{dBm}}$ en fonction de la distance entre le récepteur et l'émetteur sur un chemin comprenant un obstacle tel que $d_{obst} = 1.5m$ et $d_{obst} = 3m$. Dans cette configuration, nous avons $\gamma_{obst} = 4$, $P_{Tx_{dBm}} = 20dBm$ et $K = 0$. Nous pouvons voir que ce modèle de communication a un impact très négatif sur la qualité de communication puisqu'il ne faut plus que 30 mètres pour perdre la communication entre deux agents qui ont un obstacle de 3 mètres entre eux.

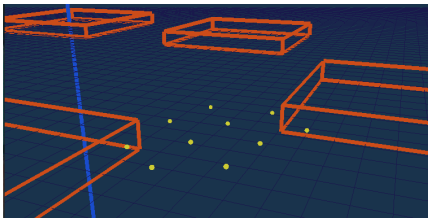
4.2 Redéfinition du voisinage

En utilisant le nouveau modèle de propagation proposé à la section précédente, nous pouvons redéfinir le voisinage d'interaction N_i pour chaque agent i :

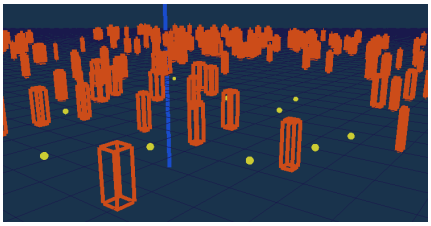
$$N_i = \{j \in [\![1, .., N]\!]; j \neq i : PL_{ij} \leq P_{threshold}\} \quad (14)$$

où PL_{ij} est l'affaiblissement du signal (Eq. 12) mesuré entre j (émetteur) et i (récepteur) et $P_{threshold}$ ($\neq P_{min}$) est le seuil de puissance en-dessous duquel la communication n'est plus possible. Aussi, nous introduisons un autre seuil N_{max}, ajustable, qui agit sur la cardinalité de N_i :

$$N_i = \begin{cases} N_i, & \text{if } |N_i| \leq N_{max} \\ N_i^{filtered}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (15)$$



(a) Vue 3D de l'environnement "City"



(b) Vue 3D de l'environnement "Forest"

FIGURE 6 – Illustration des environnements tests avec le simulateur [7]

où $N_i^{filtered}$ correspond à un sous-ensemble de N_i où les agents correspondant à la puissance reçue la plus faible sont récursivement retirés jusqu'à ce que $|N_i| = N_{max}$. Ce seuil est très important car il permet de limiter le voisinage et donc le coût de calcul au niveau de chaque agent, tout en conservant les voisins les mieux connectés.
Avec cette nouvelle définition du voisinage, basée sur un modèle de communication plus réaliste, nous pouvons étudier l'évolution d'une flotte d'agents dans des environnements fortement contraints par de nombreux obstacles.

5 Comparaison des modèles

5.1 Outil de simulation

Le simulateur que nous utilisons est une extension de l'outil [2] développé par Viragh et al. [7] illustré figure 6. C'est un simulateur multi-agent qui introduit des variables aléatoires pour modéliser les différents bruits ajoutés sur des variables telles que la position GPS ou encore les communications.
Les hyper-paramètres utilisés pour une expérience tels que sa durée T ou encore le pas de calcul de la methode d'Euler sont réglables. La distribution des obstacles est quant à elle définie par plusieurs paramètres tels que sa densité D qui se mesure de la manière suivante :

$$D = 100 \times \frac{\sum_s A_s}{A_{arena}}, \quad (16)$$

où A_s est la surface de l'obstacle s et A_{arena} est la surface de l'arène. La Figure 6(b) montre une vue 3D de l'environnement appelé "Forest" pour sa quantité d'obstacles.
De nombreuses fonctionnalités ont été ajoutées à ce simulateur comme la détection des clusters, en appliquant l'algorithme *Depth First Search* sur le graphe des agents connectés, mais aussi la possibilité de changer à la volée le modèle de flocking ou de communication (regular/degraded).

2. Accès au projet initial ici : `https://github.com/csviragh/robotsim`

©AFIA2021

5.2 Optimisation des paramètres

Comme nous l'avons mentionné dans la Section 3, les modèles que nous étudions ont de nombreux paramètres qui doivent être optimisés afin d'obtenir le meilleur comportement possible. En s'inspirant du travail de [5], nous avons défini plusieurs métriques permettant d'évaluer les performances de nos modèles de flocking :

- **Velocity** :

$$\Psi_{vel} = \frac{1}{T}\frac{1}{N}\int_0^T \sum_{i=1}^{N} |\mathbf{v}_i(t)|dt, \qquad (17)$$

qui caractérise la vitesse moyenne de la flotte.

- **Collision** (entre agents) :

$$\Psi_{col} = \frac{1}{T}\frac{1}{N(N-1)}\int_0^N \sum_{i=1}^{N}\sum_{j\neq i} \Theta(q_{ij}(t) - r^{coll})dt, \qquad (18)$$

mesure le ratio de collisions, avec Θ la fonction de Heaviside et r^{coll} la distance minimale autorisée entre deux agents.

- **Connected** :

$$\Psi_{clust} = \frac{1}{T}\int_0^T |\overline{O(t)}|dt, \qquad (19)$$

$$O(t) = \{i \in [\![1, .., N]\!] : |N_i(t)| = 0\}, \qquad (20)$$

$\overline{O(t)}$ est l'ensemble des agents connectés au temps t, càd. le complémentaire des agents isolés $O(t)$.

- **Wall** (collision) :

$$\Psi_{wall} = \frac{\int_0^T \sum_{i=1}^{N} \Theta(\tilde{q}_{is}(t))\tilde{q}_{is}(t)dt}{\int_0^T \sum_{i=1}^{N} \Theta(\tilde{q}_{is}(t)dt}, \qquad (21)$$

où $\tilde{q}_{is}$ prend des valeurs positives en-dehors de l'arène et à l'intérieur d'un obstacle, et inversement. Ψ_{wall} caractérise la distance moyenne passée à l'intérieur des obstacles.

- **Cluster Correlation** :

$$\Psi_{corr} = \frac{1}{T}\frac{1}{N}\int_0^T \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{|N_i| - 1} \sum_{j\in N_i} \frac{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j}{|\mathbf{v}_i||\mathbf{v}_j|}dt, \qquad (22)$$

mesure l'alignement moyen par cluster.

- **Cluster Received Power** :

$$\Psi_{pow} = \frac{1}{T}\frac{1}{N}\int_0^T \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{|N_i| - 1} \sum_{j\in N_i} P_{Rx_{ij}}(t)dt, \qquad (23)$$

mesure la puissance reçue moyenne par cluster.

Ces métriques permettent de définir les conditions nécessaires pour obtenir un comportement optimal : $\Psi_{vel} \rightarrow v^{flock}$, $\Psi_{col} \rightarrow 0$, $\Psi_{clust} \rightarrow 1$, $\Psi_{wall} \rightarrow 0$, $\Psi_{corr} \rightarrow 1$, $\Psi_{pow} \geq P_{min}$. Les résultats obtenus sont passés dans des fonctions non linéaires pour normaliser les valeurs entre 0 et 1 (la fonction sigmoid par exemple), et ce afin de définir un problème d'optimisation multi-objectif.

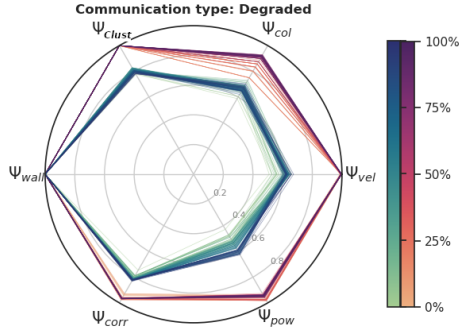


FIGURE 7 – Évolution des métriques durant l'optimisation en utilisant une communication dégradée dans l'environnement generic.

TABLE 1 – Métriques de VAT et VOS en env. GENERIC

	Vel	Col	Clust	Wall	Corr	Pow
VAT	0.999	0.99	0.94	1	0.86	0.202
VOS	0.612	0.88	0.92	1	0.784	0.26

Dans ce papier nous utilisons un algorithme génétique multi-objectif appelé *NSGA-III* [17].

La stratégie est ici d'optimiser les modèles VAT et VOS sur un environnement "générique", *i.e.* avec une densité moyenne d'obstacles et avec un modèle de communication dégradé. Le nombre d'agents utilisé lors de l'optimisation et les simulations, dont les résultats sont donnés en Section 5.3, est toujours le même, $N = 10$. Nous utilisons ensuite ces versions optimisées avec différentes distributions d'obstacles afin de comparer leurs performances. L'environnement générique a $N_{obst} = 90$ obstacles uniformément distribués dans une arène de $1250m^2$. Chaque obstacle est représenté par un carré dont le coté L suit une distribution normale (Gaussienne) $L \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$, centrée sur $\mu = 24$ mètres et un écart type $\sigma = 12$ mètres. La densité de cet environnement est $D = 3.3\%$.

Le processus d'optimisation est présenté en Fig. 7 où l'on peut observer l'évolution de la moyenne des métriques sur le front de Pareto à chaque génération pour les deux modèles (VOS en bleu et VAT en rouge). L'échelle de couleurs donne une information sur l'avancement de l'optimisation basée sur le nombre maximum de générations. La Table 1 regroupe les valeurs moyennes des métriques après 100 évaluations des solutions optimisées dans l'environnement *generic* avec une communication *degraded*. On se rend compte ici que les deux modèles ont des performances relativement similaires sauf pour la métrique *velocity* qui est plus basse pour le modèle VOS.

TABLE 2 – Performances de VA dans [5]

	Vel	Col	Clust	Wall	Corr	Pow
VA	0.938	0.945	1	0.997	0.916	N/A

TABLE 3 – FOREST

	Regular			Degraded		
	VA	VAT	VOS	VA	VAT	VOS
Vel	**0.975**	**0.946**	0.032	**0.975**	**0.955**	0.055
σ	0.010	0.03	0.052	0.008	0.023	0.063
Col	0.301	**1**	0.793	0.286	**0.961**	0.799
σ	0.429	0.099	0.382	0.429	0.172	0.380
Clust	0.637	**0.98**	**0.923**	0.508	**0.938**	0.868
σ	0.148	0.085	0.13	0.118	0.121	0.163
Wall	1	1	1	1	1	1
σ	0	0	0	0	0	0
Corr	0.133	**0.712**	0.54	0.128	**0.698**	0.531
σ	0.068	0.106	0.12	0.06	0.12	0.112
Pow	0.033	0.53	0.517	0	0.045	0.031
σ	0.049	0.11	0.074	0	0.079	0.066
Dist	132.3	37.9	49.9	132.5	42.11	54.37

5.3 Résultats et analyse

Notre but ici est de comparer les modèles VAT (Sec.3.1) et VOS (Sec.3.2) dans des environnements différents et avec des modèles de communication différentes (regular et degraded). La comparaison est basée sur deux environnements différents (voir Fig. 6) :

1. **Forest** : $N_{obst} = 500$; $L \sim \mathcal{N}(4,\, 2)$; $D = 0.7\%$.
2. **City** : $N_{obst} = 15$; $L \sim \mathcal{N}(200,\, 20)$; $D = 36.5\%$.

Nous allons également faire une comparaison avec le modèle de Vásárhelyi, noté VA, que nous simulerons en utilisant les paramètres optimaux fournis dans [5]. Ce modèle repose sur les équations 4, 5 et 6 mais est désormais soumis à la nouvelle définition du voisinage basée sur la puissance reçue. Les tables 3 et 4 regroupent les résultats de 100 évaluations stochastiques des modèles optimaux. Les valeurs moyennes des métriques normalisées entre 0 et 1 (1 étant le meilleur cas, 0 le pire) ainsi que leurs variances sont affichées. La dernière ligne correspond à l'inter-distance moyenne entre agents (en mètre). Afin d'être cohérent dans nos résultats, nous utilisons les mêmes hyper-paramètres à savoir, le temps d'expérience $T = 600s$, la précision de la méthode d'Euler $DeltaT = 0.01s$, le délai introduit dans les communications $t_d = 0.2s$ et la fréquence de communication 5Hz. Ces modèles sont présentés dans la vidéo [3].

La première observation importante ici est que le modèle VA a de moins bonnes performances que dans [5] (voir Table 2). Cela peut s'expliquer par le fait que l'auteur ne considéré que de petites arènes qui assuraient indirectement un effet de cohésion. Notre modèle de propagation ajoute aussi une nouvelle contrainte. Les inconvénients de ne pas ajouter un terme d'attraction sont quant à eux encore plus visibles dans l'environnement *forest* où la métrique *cluster* est relativement basse, ce qui signifie que le phénomène de fragmentation a eu lieu à maintes reprises (Clust=0.637 dans Table 3). Le fait que le modèle VAT soit aussi conçu et optimisé dans un contexte de communication **dégradé**, et donc bénéficie du *neighbour filtering*, participe à expliquer les écarts entre VAT et VA.

3. vidéo : https://team.inria.fr/chroma/files/2021/03/JFSMA_2021.mp4

5.3.1 Maintien de la connectivité

L'un de nos objectifs dans cet article est d'implémenter un modèle capable d'éviter les fragmentations à répétition. Nous pouvons voir dans les deux tables que cet objectif est globalement atteint. En effet, pour VAT et VOS, la moyenne de la métrique *cluster* est haute, $0.868 \leq$ Clust ≤ 0.985. Cela démontre que même si quelques fragmentations se sont produites, les clusters résultants ont réussi à réparer les connexions détruites afin de former un seul et unique groupe. Malgré nos efforts, des fragmentations partielles restent possibles, notamment dans l'environnement *forest*.

5.3.2 Puissance reçue et collisions

La distance inter-agent est une composante résultante de toutes les interactions et est principalement modifiée lors de l'optimisation de la métrique *received power* ainsi que *collision*. Les agents doivent évoluer dans un intervalle de distance avec les autres qui est pré-défini : pas trop près afin d'éviter les collisions sans pour autant aller trop loin et perdre la connexion avec le groupe. Il est important de comprendre que dans ces tables, une valeur faible de *received power* ne veut pas dire que la connexion est perdue mais qu'elle est faible et donc sujette à des pertes de paquets et autres erreurs. Par exemple dans la Table 4, nous avons Pow $= 0.573$ pour le modèle VOS avec une communication *degraded* mais cela est équivalent à une valeur de $P_R = -59.4dBm$, ce qui signifie qu'en moyenne, la communication était possible. En comparaison, dans la Table 3, pour le modèle VAT avec une communication *degraded*, Pow $= 0.045 \simeq -71.7dBm$ ($-70dBm$ étant la valeur seuil en deçà de laquelle la communication n'est plus possible). On peut noter que même avec une communication moyenne faible les agents arrivent à garder une formation de flotte (la métrique de *cluster* étant haute).

5.3.3 *Overfitting* de l'environnement

Comme mentionné plus haut, les modèles que nous simulons ne sont pas optimisés sur les environnements que nous utilisons pour la comparaison. Par conséquent, il y a un risque d'overfitting sur une distribution d'obstacles donnée. Nous pouvons observer cela pour le modèle VOS dans la Table 3 où la moyenne de la métrique *velocity* est basse, $0.032 \leq$ Vel ≤ 0.055, ce qui équivaut à environ 60% de la vitesse désirée v^{flock}. Bien que dans la Table 1, Vel$=0.612$, il y a approximativement 5 fois moins d'obstacles dans cet environnement *generic* où l'optimisation est effectuée. Dans *forest*, il y a énormément d'obstacles proches les uns des autres entraînant un "effet de cage" et empêchant la flotte de voler à la vitesse désirée. Cela crée aussi de fortes oscillations $0.531 \leq$ Corr ≤ 0.54 et quelques collisions $0.793 \leq$ Col ≤ 0.799 (voir vidéo). Le modèle VOS n'est par conséquent pas robuste à cette variation de distributions.

5.3.4 Communications *Regular/Degraded*

Les effets résultant de la communication *degraded* peuvent s'observer dans les deux tables. De plus, la dernière ligne qui concerne la distance inter-agent montre que ce type de communication va provoquer l'augmentation de la distance moyenne entre les agents, ce qui cause la plupart du temps

©AFIA2021

TABLE 4 – CITY

	Regular			Degraded		
	VA	VAT	VOS	VA	VAT	VOS
Vel	**0.999**	**1**	0.484	**0.999**	**1**	0.501
σ	1.1e-5	0	0.095	4.8e-5	0	0.101
Col	0.71	**0.999**	**0.918**	0.654	**1**	0.86
σ	0.442	0.09	0.264	0.47	0	0.33
Clust	0.671	**0.985**	**0.939**	0.54	**0.915**	**0.925**
σ	0.18	0.065	0.142	0.197	0.17	0.165
Wall	1	1	1	1	1	1
σ	0	0	0	0	0	0
Corr	0.605	**0.912**	0.886	0.73	**0.945**	0.894
σ	0.165	0.067	0.082	0.112	0.04	0.073
Pow	0.512	**0.797**	0.684	0.335	**0.777**	0.573
σ	0.205	0.092	0.073	0.286	0.16	0.204
Dist	82.19	29.4	44.3	86.76	33.8	45.55

de la fragmentation. Cependant, le modèle VAT semble être très robuste aux pertes introduites par le mode *degraded*, ce qui en fait un modèle particulièrement performant.

6 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé deux nouveaux modèles de flocking fondés sur l'état de l'art (VAT Vásárhelyi + Attraction et VOS Vásárhelyi + Olfati-Saber) dans le but d'être robuste à des communications dégradées par la présence d'obstacles. Nous avons comparé ces modèles par simulation utilisant un modèle de propagation réaliste intégrant un modèle de perte (LDPL) au sein des obstacles. Cela nous a permis d'analyser comment les modèles de flocking sont affectés ou au contraire robustes à des communications dégradées par les obstacles. Parmi les solutions proposées, et après leur optimisation, nous pouvons affirmer que le modèle VAT donne des résultats plus encourageants que VOS et le modèle initial de Vásárhelyi.
La suite des travaux consistera à implémenter des stratégies de flocking adaptatives capables de se comporter de manière optimale dans des environnements hétérogènes. Nous préparons aussi des expérimentions avec des drones réels.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet "DYNAFLOCK" co-financé par Inria et AID-DGA (convention N° 2019 65 0072 0072 00 470 75 01). Les expérimentations ont été réalisées avec le support de la plateforme Grid5000.

Références

[1] Noury Bouraqadi and Arnaud Doniec. Flocking-based multi-robot exploration. In *4th National Conference on "Control Architectures of Robots"*, Toulouse, France, 2009.

[2] Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4) :25–34, 1987.

[3] Reza Olfati-Saber. Flocking for multi-agent dynamic systems : algorithms and theory. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 51(3) :401–420, 2006.

[4] Heng Li, Jun Peng, Weirong Liu, Jing Wang, Jiangang Liu, and Zhiwu Huang. Flocking control for multi-agent systems with communication optimization. pages 2056–2061, 06 2013.

[5] G Vásárhelyi, C Virágh, G Somorjai, T Nepusz, AE Eiben, and T Vicsek. Optimized flocking of autonomous drones in confined environments. *Science Robotics*, 3(20), 2018.

[6] B. Fraser, R. Hunjet, and C. Szabo. Simulating the effect of degraded wireless communications on emergent behavior. In *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*, pages 4081–4092, 2017.

[7] Csaba Virágh, Gábor Vásárhelyi, Norbert Tarcai, Tamás Szörényi, Gergo Somorjai, Tamás Nepusz, and Tamás Vicsek. Flocking algorithm for autonomous flying robots. *Bioinspiration & Biomimetics*, 9(2) :025012, may 2014.

[8] G. W. Gamage, G. K. I. Mann, and R. G. Gosine. Leader follower based formation control strategies for nonholonomic mobile robots : Design, implementation and experimental validation. In *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, pages 224–229, 2010.

[9] S. S. Ge and Cheng-Heng Fua. Queues and artificial potential trenches for multirobot formations. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4) :646–656, 2005.

[10] T. Balch and R. C. Arkin. Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6) :926–939, 1998.

[11] N. H. M. Li and H. H. T. Liu. Formation uav flight control using virtual structure and motion synchronization. In *2008 American Control Conference*, pages 1782–1787, 2008.

[12] Ronny Lim and W. Sheng. Hybrid system of reinforcement learning and flocking control in multi-robot domain. 2016.

[13] H. M. La and W. Sheng. Flocking control of a mobile sensor network to track and observe a moving target. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3129–3134, 2009.

[14] Tamás Vicsek, András Czirok, Eshel Ben-Jacob, Inon Cohen, and Ofer Shochet. Novel type of phase transition in a system of self-driven particules. *Physical review letters*, 75(6) :1226, 1995.

[15] Eric Frew Spencer Watza, Ramya Kanlapuli. Hybrid rf propagation model using itm and gaussian processes for communication-aware planning. In *RSS 2017 RCW Workshop*, 2017.

[16] Theodore Rappaport. *Wireless Communications : Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, USA, 2nd edition, 2001.

[17] J. Blank and K. Deb. Pymoo : Multi-objective optimization in python. *IEEE Access*, 8 :89497–89509, 2020.

Vers des classifieurs ontologiquement explicables

G. Bourguin, A. Lewandowski, M. Bouneffa, A. Ahmad

Université du Littoral Côte d'Opale, LISIC

{gregory.bourguin, arnaud.lewandowski, mourad.bouneffa, adeel.ahmad}@univ-littoral.fr

Résumé

Répondant au besoin d'explicabilité des IA qui utilisent l'Apprentissage Profond (AP), ce papier explore les apports et la faisabilité d'un processus de création de classifieurs explicables basés sur des ontologies. La démarche est illustrée par l'utilisation de l'ontologie des Pizzas pour créer un classifieur d'images qui fournit des explications visuelles impliquant une sélection de features ontologiques. Nous proposons une implémentation en complétant un modèle d'AP avec des tenseurs ontologiques générés à partir de l'ontologie exprimée avec la Logique de Description.

Mots-clés

Apprentissage automatique, ontologie, explicabilité, classifieur.

Abstract

In order to meet the explainability requirement of AI using Deep Learning (DL), this paper explores the contributions and feasibility of a process designed to create ontologically explainable classifiers while using domain ontologies. The approach is illustrated with the help of the Pizzas ontology that is used to create an image classifier that is able to provide visual explanations concerning a selection of ontological features. The approach is implemented by completing a DL model with ontological tensors that are generated from the ontology expressed in Description Logic.

Keywords

Machine learning, ontology, explainability, classifier

1 Introduction

Ces dernières années ont été marquées par une large démocratisation de solutions basées sur l'Apprentissage Automatique (AA), en particulier l'Apprentissage Profond (AP). Si la prolifération de ces nouveaux outils destinés à supporter des utilisateurs dans des tâches très diverses a démontré leur grande utilité, elle s'est aussi accompagnée de questionnements concernant la confiance que l'on peut leur accorder. De nombreux papiers de recherche ont ainsi souligné le problème de l'opacité des algorithmes d'AA, et le besoin prégnant envers de nouvelles solutions permettant d'entrouvrir ces boites noires pour faciliter leur acceptation. Cette problématique est au cœur du mouvement XAI [2] (eXplainable AI) et d'un grand nombre de travaux de recherches tournés vers l'explicabilité des IA (cf. partie 2).

Comme le souligne [12], expliquer clairement à un utilisateur final le rationnel ayant mené à une décision peut être aussi important que la décision elle-même. Pour ce faire, il est nécessaire que la solution proposée soit non seulement capable de fournir des explications quant à ses décisions, mais aussi que ces explications soient compréhensibles par l'utilisateur, c'est- à-dire qu'elles soient en adéquation avec son niveau d'abstraction. Le niveau d'abstraction auquel les explications doivent être proposées dépend donc des connaissances de l'utilisateur, de son expertise, voire de son point de vue. Le défi pour les concepteurs est alors de créer des IA explicables capables de combler l'écart sémantique entre les entités manipulées par les algorithmes, et celles permettant d'expliquer leurs décisions.

Issues du domaine de l'Ingénierie des Connaissances, les ontologies ont pour but de capturer les connaissances liées aux domaines d'expertises des utilisateurs, et de permettre aux algorithmes de les manipuler. Les ontologies sont d'ores et déjà utilisées par les chercheurs en AA dans le but d'augmenter les jeux de données utilisés pour entrainer les modèles : sélection de données basées sur leurs propriétés ontologiques, ajouts d'étiquettes déduites de l'ontologie. Cependant, l'utilisation des ontologies qui nous intéresse dans ce papier est celle qui implique des moteurs d'inférence dans le calcul du résultat : les chercheurs utilisent les algorithmes de l'AA pour identifier des entités ontologiques de « bas niveau » (ex. la présence d'objets dans une image), puis injectent ces informations dans un moteur d'inférence afin d'effectuer des déductions à haut niveau d'abstraction (ex. classification de l'activité humaine) [3]. Ce type de processus est particulièrement intéressant du point de vue de l'explicabilité du fait que l'inférence ontologique est un processus déductif qui peut être expliqué. Toutefois, la littérature souligne que l'inférence ontologique coûte cher [8], et ce type de processus n'est généralement mis en œuvre que lorsque la tâche de classification est trop complexe pour les algorithmes d'AA classiques.

Prenant acte du besoin d'explicabilité, l'objectif de ce papier est d'explorer un processus de création de classifieurs automatiques capables de fournir des explications fondées sur une ontologie. Nous ne focalisons pas ici sur les moyens permettant d'améliorer la classification, mais sur les apports d'une ontologie pour l'explicabilité. Nous explorons aussi la faisabilité d'une telle approche en utilisant des outils classiques de l'AP, et proposons une solution permettant de compléter un modèle d'AP avec des tenseurs (au sens

©AFIA2021

de Tensorflow [1]) générés à partir d'assertions exprimées en Logique de Description (DL).
Nous avons choisi d'exemplifier notre démarche en réutilisant la fameuse ontologie des Pizzas proposée par l'Université de Manchester. Notre objectif n'étant pas la performance de classification, le but de notre classifieur est d'étiqueter des images synthétiques représentant des pizzas avec les classes définies dans l'ontologie. Du point de vue de l'explicabilité, il s'agit de générer des heatmaps différenciant les garnitures (toppings) qui correspondent aux définitions ontologiques des classes.
La 2ème partie de ce papier propose un état de l'art du besoin et des solutions pour l'explicabilité des IA, ceci en focalisant sur les approches qui veulent y intégrer des connaissances grâce aux ontologies. La 3ème partie illustre les apports d'une approche fondée sur un raisonnement ontologique pour l'explicabilité, et introduit la démarche générique que nous proposons. La 4ème partie en présente l'application via l'implémentation d'un classifieur d'images ontologiquement explicable. La 5ème partie présente des réflexions qui découlent de cette expérience, avant de conclure dans la partie 6.

2 Explicabilité

Il est un consensus établi sur l'importance que revêt l'utilisation d'IA dotées de capacités d'apprentissage, de raisonnement et d'adaptation pour l'accomplissement de tâches informatiques de plus en plus complexes indispensables au développement des activités humaines [26]. Les systèmes basés sur l'AP sont de plus en plus performants, mais deviennent en corollaire de plus en plus complexes et opaques. Ils apparaissent comme des boites noires [9], rendant très problématique l'intervention humaine pour la compréhension de leurs décisions, ainsi que pour le contrôle de leur exécution, de leur déploiement, et de leur évolution [2][13]. En conséquence, le besoin de transparence et surtout d'explicabilité des IA s'est révélé crucial avec des aspects liés à la confiance qu'un utilisateur peut leur accorder en matière de sureté de fonctionnement de systèmes critiques pilotés par l'IA, mais également en matière d'éthique et du respect de règles légales et sociales telles que la non ségrégation et le respect de la vie privée [11].
Dans ce papier, nous nous intéressons à l'explicabilité de l'IA en tant que justifications des décisions compréhensibles par les utilisateurs. La nécessité de fournir des explications est un besoin ancien étant apparu dès les premières implémentations de systèmes experts [25]. Les systèmes à base de règles, ainsi que les algorithmes d'AA réputés plus transparents, comme la régression linéaire et les arbres de décision, ont également besoin d'outils simplifiant, résumant, et expliquant leurs prédictions. Cela peut se traduire par une restitution de la trace d'exécution des règles appliquées pour aboutir à une décision, ou encore par la simplification d'un arbre de décision en remplaçant des nœuds et arcs de niveaux de granularité fine par des concepts plus généraux issus de la terminologie du domaine de l'utilisateur [2]. Cependant l'application de ces techniques s'avère très difficile, voire impossible, en ce qui concerne l'explicabilité des systèmes à base d'AP.

2.1 Les méthodes *Post hoc*

Les outils pour l'explicabilité des systèmes d'AP mettent majoritairement en œuvre des approches dites *post hoc* permettant de fournir des explications sur des modèles préexistants. La plupart de ces méthodes sont aussi appelées agnostiques du fait qu'elles sont applicables à tout algorithme d'AP.
Les techniques d'explication utilisent en majorité les facteurs d'importance des features d'entrée et reposent sur l'idée d'associer à chacune une valeur traduisant l'importance de son rôle dans la prédiction. Il est ainsi possible d'obtenir des explications sur une prédiction particulière, ou des explications plus globales exprimées par différents graphiques associant feature, facteur d'importance, et prédictions.
Un des domaines où ce type de travaux est le mieux représenté est celui de la vision par ordinateur (CV, Computer Vision) basée sur les réseaux de neurones convolutionnels (CNN). En CV, les features correspondent aux pixels d'une image fournie en entrée. Les propositions consistent à mettre en correspondance les prédictions et les pixels qui ont conduit à une classification [27]. Pour ce faire, diverses approches ont été adoptées avec en particulier les travaux consistant à explorer l'architecture des réseaux pour déterminer comment les couches intermédiaires perçoivent le monde extérieur [23]. Une des méthodes les plus représentatives de ces travaux est la méthode Grad-CAM (Gradient-Weighted Class Activation Mapping) [28] (et ses dérivées) qui utilise le gradient d'un concept cible pour produire des heatmaps identifiant les régions de l'image qui ont le plus participé à sa reconnaissance.
Les techniques utilisant une identification des features d'entrée pour expliquer un modèle ne sont pas limitées au domaine de la CV. Ainsi, des outils tels que LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations) [19] permettent aussi bien d'identifier des pixels dans une image pour un problème de CV, que d'identifier les termes participant à une prédiction dans un modèle de NLP (Natural Language Processing). La technique utilisée est l'explication par simplification qui consiste à construire des modèles linéaires sur des sous-parties du système global : il s'agit de produire des explications à partir de perturbations locales en simulant le fonctionnement du modèle boîte noire par un modèle naturellement transparent. Si dans le cas de LIME, les perturbations sont générées par le système, d'autres systèmes permettent d'explorer les prédictions à la suite de changements de valeurs de certaines features dans un processus interactif d'explication et par une analyse de type What-If [17], fournissant ainsi une sorte d'analyse contrefactuelle. Enfin, on peut aussi citer l'outil SHAP [15] (SHapely Additive exPlanation) qui s'inspire de la théorie des jeux, ou plus particulièrement de celle qui consiste à trouver la manière la plus équitable de distribuer les gains aux joueurs en

1. https ://www.tensorflow.org/guide/tensor

se basant sur leur taux de contribution lors de la partie. Les joueurs représentent ici les features du modèle. Une revue systématique de ce type d'approche est effectuée dans [30]. Les techniques et outils évoquées ci-avant se sont avérés très utiles dans de nombreux travaux pour fournir des explications sur le fonctionnement de modèles d'IA. Cependant, comme le souligne [14], et comme nous le verrons dans la partie 3.2, ces approches ne garantissent aucunement que les explications fournies soient compréhensibles par les utilisateurs.

2.2 Explicabilité & Ontologies

Un des objectifs principaux de l'explicabilité est de fournir aux utilisateurs, souvent des spécialistes de domaines, une description compréhensible de la manière dont le système a produit une prédiction, ou des facteurs clés qui ont conduit à cette prédiction.

L'apport des ontologies dans l'explicitation et l'axiomatisation de la sémantique d'un domaine n'est plus à démontrer. Pour de nombreux auteurs, il est apparu évident que les ontologies peuvent servir à fournir des explications adéquates et cohérentes aux conclusions d'un modèle d'AP [5]. Par exemple, dans [22], les auteurs opèrent une méthode *post-hoc* de mise en correspondance entre l'entrée d'un réseau de neurones et les classes d'une ontologie suggérée, et génèrent automatiquement des règles en Logique de Description (DL) à partir des instances classifiées pour obtenir des expressions qui opèrent comme des explications.

Dans [1] les auteurs proposent une architecture de réseaux de neurones dans laquelle des couches dites sémantiques sont introduites pour produire des explications. Ce type d'approche est formalisée dans [14] et développée plus avant dans [16] sous le concept de *semantic bottleneck* : il s'agit de construire un classifieur qui intègre dès sa conception des couches sémantiques spécifiques qui permettent au module d'AP d'extraire des features sémantiques qui sont elles-mêmes utilisées pour calculer la classification finale. La contribution pondérée des features sémantiques permet de fournir des explications quant à la prédiction, et aide à comprendre les erreurs de classification. Il faut toutefois noter que même si ces travaux parlent de sémantique, ils ne mettent pas en œuvre une approche ontologique.

Enfin, nous souhaitons citer les travaux tels [3][6] qui s'intéressent à l'interprétation d'images fondée sur des ontologies. Dans ces travaux, un processus d'AP comme la détection d'objets ou la segmentation sémantique est utilisé pour identifier des features qui correspondent aux concepts de l'ontologie, et qui servent ensuite à inférer des déductions de plus haut niveau d'abstraction. Ces travaux impliquent un raisonnement à base de DL dans le but de rendre possible ou d'améliorer des tâches de classification complexes. Même s'ils ne focalisent pas explicitement sur la problématique d'explicabilité, une classification basée sur la DL est intrinsèquement explicable, et ces solutions peuvent de fait fournir des explications au niveau d'abstraction de l'ontologie impliquée.

2.3 Positionnement

Notre but est de fournir des explications tout en mettant en exergue, dans les données d'entrée, les features qui ont participé aux prédictions. De ce point de vue, nous nous inspirons des outils tels que Grad-CAM ou LIME. Cependant, à la différence de ces outils, notre approche n'est pas agnostique : même si notre démarche se veut générique, les explications que nous voulons fournir sont intimement liées au domaine visé et les features que nous voulons mettre en exergue se doivent d'être au niveau d'abstraction des utilisateurs, c.à.d, de notre point de vue, des features ontologiques.

L'approche que nous développons n'est pas non plus *post-hoc* puisque nous verrons que l'ontologie est ici directement impliquée dans le processus même de création du classifieur. Elle est similaire à celles utilisant des *semantic bottlenecks*, à la différence près que la sémantique est ici fournie par une ontologie qui, de plus, sert directement au calcul de la prédiction.

De ce point de vue, nous sommes fortement inspirés par les travaux impliquant ontologies et DL pour l'interprétation d'images à haut niveau d'abstraction. Notre démarche est cependant aussi quelque peu différente en focalisant résolument sur le problème d'explicabilité, et en proposant des classifieurs explicables qui impliquent des ontologies y compris dans des tâches de classification qui n'en auraient *a priori* pas besoin. Enfin, l'interprétation à haut niveau d'abstraction peut impliquer des moteurs d'inférence externes qui s'intègrent difficilement dans un pipeline classique d'AA : comme le souligne [8], l'inférence ontologique est un mécanisme coûteux. C'est pourquoi nous proposons une mise en œuvre qui n'utilise pas de moteur d'inférence ontologique « classique » comme Jena, Hermit ou Pellet, mais qui repose sur des modules de raisonnement spécifiques que nous générons automatiquement à partir des définitions de l'ontologie, et qui utilisent les mêmes technologies d'implémentation que les modèles d'AP (cf. 4.2).

3 Explicabilité Ontologique

3.1 Domaine d'illustration : les pizzas

Pour illustrer notre démarche, nous avons choisi de réutiliser l'ontologie des Pizzas (Université de Manchester). Les raisons sont multiples, mais la principale est le fait que cette ontologie est accessible et possède une très grande notoriété.

L'ontologie des pizzas définit un ensemble de classes de pizzas (ex. *Napoletana*), sous-classes de la classe *NamedPizza* (elle-même sous-classe de *Pizza*). Les définitions utilisent principalement la propriété d'objet *hasTopping* dont le domaine est la classe *Pizza*, et l'image est la classe *PizzaTopping* qui est la superclasse de garnitures telles que les anchois (*AnchoviesTopping*), etc.

L'ontologie définit 22 sous-classes de *NamedPizza* à partir de 36 sous-classes de *PizzaTopping*. Pour simplifier la construction du jeu de données (les images de pizzas), nous avons choisi de focaliser sur 14 sous-classes de *NamedPizza* en impliquant 16 sous-classes de *PizzaTopping*. On

©AFIA2021

trouvera ainsi par exemple la *Napoletana* définie par :

$$\begin{aligned} Napoletana \equiv & Pizza \\ & \sqcap (\exists\, hasTopping.AnchoviesTopping) \\ & \sqcap (\exists\, hasTopping.OliveTopping) \\ & \sqcap (\forall\, hasTopping \\ & .(AnchoviesTopping \sqcup OliveTopping)) \end{aligned} \quad (1)$$

Notre objectif étant de mettre en relation les résultats d'un classifieur d'images avec les définitions de l'ontologie, nous avons constitué un jeu de données dont les exemples sont étiquetés avec les sous-classes de *NamedPizza*, et dont les images correspondent à l'ontologie, c'est-à-dire que les toppings apparaissant dans l'image étiquetée correspondent à la définition ontologique de l'étiquette.
D'autres chercheurs ont déjà constitué des jeux de données contenant des images de pizzas [18] : aucun ne correspond aux définitions fournies par l'ontologie. De plus, notre but dans ces expérimentations n'est pas d'optimiser la classification (en termes de précision, etc.), mais d'étudier les apports et la faisabilité d'une démarche impliquant une ontologie pour améliorer l'explicabilité d'un classifieur. Inspirés par les travaux de [18] qui génèrent des images de pizzas synthétiques pour obtenir un jeu de données contrôlé, nous avons mis en œuvre une méthode similaire et créé un module Pizzaïolo qui génère des images synthétiques de pizzas à partir de l'ontologie en combinant des cliparts de toppings (cf. Figure 1). Les images utilisent volontairement la même base (seule la répartition des toppings varie en nombre, position et orientation) de manière à forcer un quelconque classifieur (non ontologique) à focaliser sur les toppings pour différencier les pizzas.

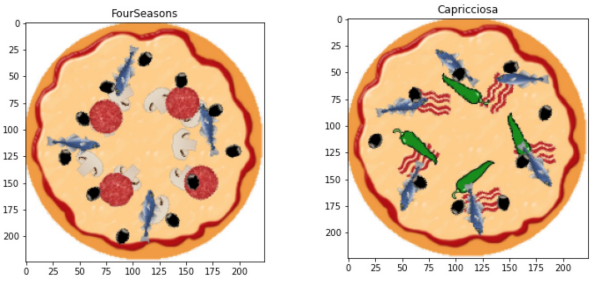


FIGURE 1 – Pizzas synthétiques ontologiques.

La tâche de classification de ces images étant assez simple, nous n'avons généré qu'un «petit» jeu de données totalement équilibré de 200 pizzas par classe.

3.2 Problèmes d'approche non ontologique

Pour illustrer les problèmes liés aux outils pour l'explicabilité, nous avons construit et entrainé un classifieur « classique » basé sur un CNN dont la base est formée par une architecture VGG19 [24] pré-entrainé sur Imagenet [20], à laquelle nous avons simplement ajouté une couche Dense (256) puis un SoftMax (14 classes de pizzas). Les données étant simples, le classifieur a pu être entrainé pour atteindre une précision de 100% sur un ensemble de test constitué de 20% des échantillons.
Nous avons ensuite utilisé les outils dérivés de LIME [19] et Grad-CAM [23] qui expliquent le résultat d'une classification en générant une heatmap mettant en valeur les pixels de l'image qui ont principalement participé à la prédiction. Nos images étant constituées de manière à ce que les seuls éléments qui différencient les pizzas soient les toppings présents sur l'image, on peut espérer que les heatmaps focalisent sur les pixels qui y correspondent.

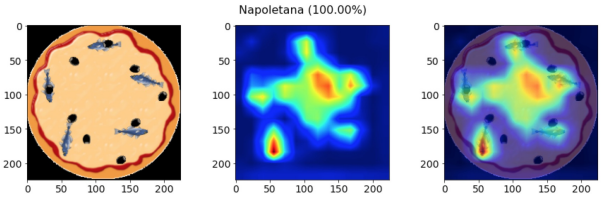


FIGURE 2 – Explication fournie par Grad-CAM.

La Figure 2 montre les résultats obtenus avec Grad-CAM pour la classification d'une *Napoletana* qui est constituée uniquement d'olives et d'anchois (cf. définition partie 3.1). Les résultats issus de LIME et Grad-CAM sont similaires. On peut constater que le CNN focalise bien sur les anchois. Cependant, il ignore les olives, tout en focalisant aussi sur une partie de la base (vide de toppings). On peut alors considérer que pour le CNN, cette pizza est une *Napoletana*, du fait qu'elle a des anchois et du vide : ce qui ne correspond bien entendu pas à la définition que l'on attendait.

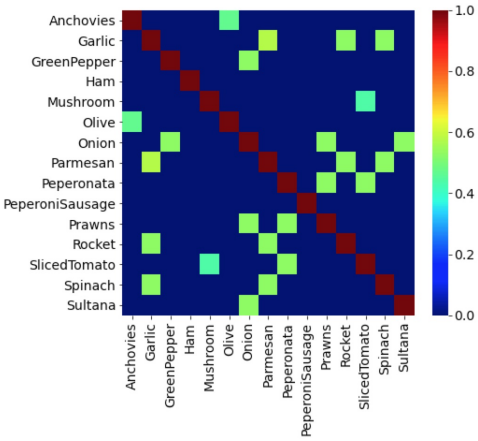


FIGURE 3 – Corrélation ontologique des toppings.

Toutefois, l'ontologie des pizzas permet d'expliquer ce phénomène si on l'utilise pour générer une matrice de corrélation ontologique des toppings (Figure 3). Cette matrice révèle en quelle mesure les toppings sont corrélés dans les définitions ontologiques des pizzas : on peut constater que les anchois (*AnchoviesTopping*) apparaissent systématiquement avec des olives (*OliveTopping*). Par contre, les olives apparaissent fréquemment avec d'autres toppings. De fait, pour le CNN, sur une *Napoletana* constituée uniquement

d'anchois et d'olives, le discriminant est la présence d'anchois. De plus, l'étude des définitions de toutes les classes de l'ontologie (non illustrée ici) révèle que la *Napoletana* est la pizza qui possède le moins de toppings, ce qui peut expliquer pourquoi le CNN a aussi considéré la zone vide comme un discriminant.
Ces remarques n'ont aucunement pour but de discréditer les outils tels que Grad-CAM et LIME. Comme nous venons de le montrer, ils se révèlent très utiles pour expliquer comment fonctionne un classifieur. Cependant, ces explications ne peuvent généralement être interprétées que par des spécialistes en IA et, comme l'ont souligné les travaux tentant d'associer une sémantique aux filtres des CNN [10], cet exemple démontre que le niveau d'abstraction des discriminants qui émergent de l'entraînement d'un CNN n'est pas en adéquation avec celui d'un expert des pizzas. De fait, ces outils ne paraissent pas les plus indiqués pour fournir des explications facilement interprétables par des experts du domaine.

3.3 Approche proposée

La démarche que nous proposons a pour but de créer un classifieur et de fournir des explications au niveau d'abstraction des experts du domaine d'application, c.à.d., de notre point de vue, dans les termes d'une ontologie. Dans notre exemple, il s'agit de classifier des images de pizzas avec les classes de l'ontologie, et de générer des heatmaps qui correspondent aux définitions ontologiques de ces classes.
Les étapes de la réalisation consistent à :

(a) Construire un ensemble C constitué des classes de l'ontologie prédites en sortie du classifieur.

(b) Soit D l'ensemble des axiomes de l'ontologie qui définissent les concepts de C :
D = {d | $\exists$ c $\in$ C, d $\equiv$ c est un axiome de l'ontologie}.
Soit P l'ensemble des propriétés de l'ontologie impliquées dans D.
Soit R l'ensemble des images de P tel que :
R = {r | r=range(p), p $\in$ P}.
Construire l'ensemble F des features ontologiques f $\in$ F, c.à.d. des triplets (c, p, r) impliqués dans D et qui seront utilisés dans l'explication d'une classification.

(c) Mettre en œuvre une technique d'AA permettant de construire l'ensemble FI $\subseteq$ F des features ontologiques identifiées (assertions satisfaites) dans une donnée envoyée au classifieur et qui sont de la forme FI = {fi $\in$ F | fi $\equiv$ $\exists$ p.r}

(d) Mettre en œuvre un raisonnement ontologique qui utilise D et FI pour calculer CI $\subseteq$ C, l'ensemble des classes ci identifiées pour une donnée.

(e) Utiliser l'ensemble des axiomes DI $\subseteq$ D tel que DI = {di $\equiv$ ci} et l'ensemble FI pour expliquer la classification CI.

Dans notre exemple :

(a) C = {c $\sqsubseteq$ Pizza}
ex. Napoletana

(b) D = {d $\equiv$ c}
ex. ($\exists$ hasTopping . AnchoviesTopping) $\sqcap$
($\exists$ hasTopping . OliveTopping) $\sqcap$
($\forall$ hasTopping .
(AnchoviesTopping $\sqcup$ OliveTopping))
P = { hasTopping }
R = {r $\sqsubseteq$ PizzaTopping }
ex. AnchoviesTopping
F = {(c $\sqsubseteq$ Pizza, hasTopping, r $\sqsubseteq$ PizzaTopping)}
ex. (Napoletana, hasTopping, AnchoviesTopping)

(c) Module de segmentation sémantique (cf. 4.1)

(d) Module OntoClassifier (cf. 4.2)

(e) Projection des assertions OWL (cf. 4.3)

Il est à noter que les étapes (b) et (c) sont fortement liées du fait qu'il serait vain de construire F avec des features ontologiques qui ne pourraient pas être extraites des données. Dans notre exemple, nous avons focalisé sur la propriété *hasTopping* du fait qu'elle est en adéquation avec les définitions des pizzas, mais aussi parce que la présence des toppings (éléments de R) peut être déduite de l'image. Le fait qu'il n'y ait ici qu'une seule propriété dans P (*hasTopping*) est lié à l'exemple : il serait tout à fait possible de considérer plusieurs propriétés différentes à extraire des données d'entrée pour inférer une classification.
On peut aussi souligner que le niveau d'abstraction des explications est intimement lié au niveau d'abstraction des features ontologiques. En effet, si dans notre exemple il sera possible d'expliquer qu'une image représente une *Napoletana* du fait qu'elle est constituée d'anchois et d'olives, le classifieur n'aura pas d'explication à fournir sur la manière dont il a décidé qu'une zone de l'image représente un anchois. Pour pouvoir le faire, il faudrait raffiner l'ontologie en donnant une définition des toppings eux-mêmes à partir de features ontologiques de plus bas niveau. Néanmoins, il faut rappeler que toute démarche pour l'explicabilité est confrontée au fait qu'à un certain niveau d'abstraction, on considère ne plus devoir fournir d'explications. On peut par exemple citer [12] qui propose un classifieur d'espèces d'oiseau mêlant CNN et NLP pour proposer des explications : l'outil peut expliquer qu'une image représente un Albatros du fait que l'oiseau possède un bec jaune, etc., mais il ne tente pas de démontrer ce qu'est un bec jaune.
Enfin, on peut remarquer que cette démarche engendre la création d'un pipeline de classification possédant 2 entités principales : un module utilisant une technique d'AP pour extraire les features ontologiques, suivi d'un module de raisonnement ontologique. Comme nous l'avons souligné, cette décomposition est similaire à celle que l'on peut trouver dans les solutions dédiées à identifier des classes de haut niveau d'abstraction comme les activités humaines [3][6]. Cependant, dans ces travaux, l'ontologie est principalement mise en œuvre pour aider la classification. La démarche que nous proposons est de partir de l'ontologie dans le but explicite de fournir des explications, y compris pour des problèmes de classification qui n'auraient *a priori* pas besoin d'ontologie. Nous verrons aussi dans la suite du papier que nous proposons une solution originale nommée

©AFIA2021

OntoClassifier pour la partie raisonnement de notre pipeline de classification.

4 Classifieur Ontologique

Cette partie présente l'implémentation de notre démarche sur l'exemple des pizzas présenté précédemment. Cette implémentation est constituée de 2 principaux modules : un module d'AP de segmentation sémantique destiné à identifier les features ontologiques (FI) présentes dans une image, et un module ontologique nommé OntoClassifier destiné à calculer les classes CI qui peuvent être déduites de FI, tout en étant capable de fournir des explications. Ces 2 modules sont implémentés et associés en Tensorflow 2. Le pipeline général de notre classifieur est présenté dans la Figure 4. Une image fournie en entrée de ce pipeline est traitée séquentiellement (flèches vers la droite) par le module d'AP (cf. 4.1), puis par le module ontologique (cf. 4.2) pour obtenir en sortie l'ensemble CI des classes identifiées pour cette image. Le mécanisme d'introspection du module ontologique permet ensuite de fournir des explications à propos de chaque classe identifiée ci ∈ CI (flèches vers la gauche) en utilisant sa définition ontologique di ∈ DI et les features fi ∈ FI correspondantes qui peuvent de plus être projetées sur (mises en exergue dans) l'image de départ (cf. 4.3).

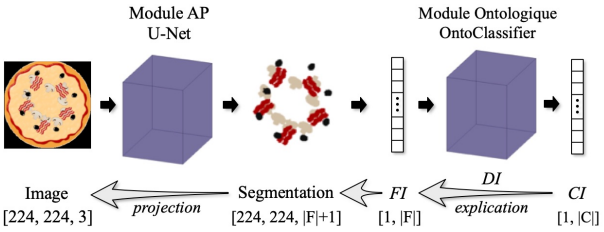


FIGURE 4 – Classifieur ontologiquement explicable.

4.1 Module AP : Segmentation Sémantique

La première partie du pipeline de classification a pour mission d'identifier les features ontologiques fi ∈ FI, c.à.d. la satisfiabilité des assertions correspondantes aux triplets de F sachant qu'ici :

$$F = \{(c \sqsubseteq \text{Pizza}, \text{hasTopping}, r \sqsubseteq \text{PizzaTopping})\}$$

Nous avons choisi d'utiliser une technique de segmentation sémantique dont l'objectif est d'étiqueter chaque pixel d'une image avec les classes de {r ⊑ PizzaTopping}. Notre jeu de données étant simple et totalement contrôlé, nous avons mis en œuvre une architecture de modèle basée sur U-Net [20], et généré les masques de segmentation nécessaires à l'entraînement du modèle en même temps que nos images. Cette implémentation de U-Net (basée sur MobileNetV2 [21] avec les poids d'Imagenet [7]) reçoit en entrée des images de pizzas constituées de 3 canaux (RGB) (224x224x3) pour obtenir en sortie une segmentation de l'image en 17 canaux (224x224x17). Chaque canal correspond à une des 16 sous-classes de *PizzaTopping*, excepté 1 canal destiné à recevoir les pixels qui ne correspondent à aucun topping.

La partie centrale de la Figure 4 montre comment une image fournie en entrée de l'U-Net est segmentée : pour représenter cette segmentation, nous avons ici superposé les différents canaux en leur attribuant chacun une couleur différente. Chaque couleur/canal correspond à une classe ontologique de topping (r ∈ R). Dans la suite du papier, cette représentation sera nommée *masque ontologique* dans le sens où les pixels de ce masque permettent (par projection) d'identifier la classe de topping à laquelle correspondent les pixels de l'image d'entrée.

4.2 Module Ontologique : OntoClassifier

La présence de pixels dans une couche de segmentation peut être interprétée comme la présence d'une feature ontologique (∃ hasTopping . topping), topping ∈ R, ce qui permet de déduire l'ensemble FI des assertions satisfaites pour chaque image traitée par le modèle. Il reste alors à raisonner à partir de FI en utilisant l'ensemble des définitions D pour en déduire les classes CI qui sont applicables à l'image.
Ce processus de raisonnement à partir de propriétés extraites de l'image est en partie similaire à celui qu'on peut trouver dans divers travaux mêlant AP et ontologies pour effectuer des interprétations à haut niveau d'abstraction. L'approche classique est de peupler l'ontologie avec des instances représentant les exemples à classifier, puis d'effectuer des déductions avec un raisonneur ontologique comme Jena, Hermit ou encore Pellet. Cependant, comme souligné dans [8], ce processus est coûteux du fait qu'il faille compléter le modèle d'AP par des outils externes, et que ces outils destinés à raisonner sur la globalité d'une ontologie sont bien plus lents que les pipelines d'AP utilisés pour créer des classifieurs. Dans la démarche que nous proposons, nous n'avons pas besoin de toute la puissance d'un raisonneur ontologique pour déduire CI à partir de FI et D. Nous avons donc créé le module OntoClassifier dont le constructeur génère un ensemble de tenseurs à partir de l'ontologie, en particulier de C, D et F.

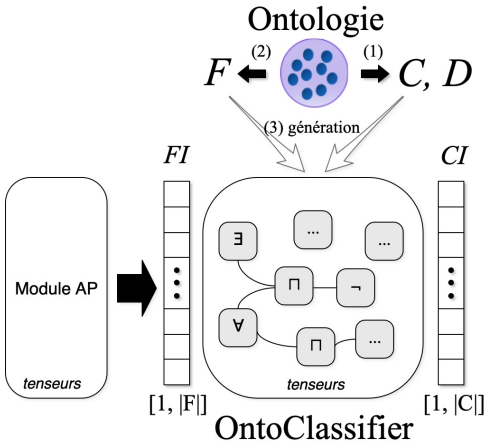


FIGURE 5 – Génération d'un OntoClassifier.

Ce processus est illustré dans la Figure 5 : après la sélection des classes et définitions visées pour construire C et D (1), et des features ontologiques qui constituent F (2),

un ensemble de tenseurs est automatiquement généré (3) : ces tenseurs sont typés et interconnectés grâce à la décomposition des expressions OWL contenues dans D. Les opérateurs de construction considérés sont la conjonction ($\sqcap$), la disjonction ($\sqcup$), la négation ($\neg$), les restrictions existentielles ($\exists r.c$), universelles ($\forall r.c$), et de cardinalité. L'OntoClassifier se base également sur l'hypothèse que les classes de R (range des features ontologiques) sont disjointes. Rappelons enfin que si dans l'exemple nous n'avons utilisé qu'une seule propriété ontologique (*hasTopping*), l'OntoClassifier est tout à fait capable de gérer un ensemble F contenant plusieurs propriétés (cf. 3.3).
L'OntoClassifier résultant est alors prêt à compléter le pipeline de classification en sortie du module d'AP (Figure 4, partie droite). Cet assemblage permet de calculer la satisfiabilité d'assertions ontologiques complexes comme la définition d'une *Napoletana* (cf. 3.1) ou encore des expressions impliquant des super-classes de toppings telles :

$$\text{CheesyPizza} \equiv \exists\ \text{hasTopping}\ .\ \text{CheeseTopping}$$

$$\text{VegetarianPizza} \equiv \neg\ (\exists\ \text{hasTopping}\ .\ \text{FishTopping}) \sqcap \neg\ (\exists\ \text{hasTopping}\ .\ \text{MeatTopping})$$

Enfin, l'OntoClassifier étant composé d'un graphe de tenseurs qui représente la décomposition des éléments de D, ce module permet de remonter le graphe des assertions pour identifier les éléments de FI – ou l'absence d'éléments – qui les ont satisfaites dans un exemple donné.

4.3 Résultats

Le pipeline de classification étant en place, il ne reste plus qu'à lui envoyer des images pour obtenir une classification. Pour commencer, nous aimerions souligner que la génération de l'OntoClassifier sous forme de tenseurs permet l'intégration directe de la dimension ontologique dans le pipeline de classification. Le modèle global résultant est alors bien plus rapide que dans le cas où le raisonnement ontologique est délégué à un moteur d'inférence externe. À titre d'exemple, en utilisant notre module AP de segmentation sémantique couplé à une instance de raisonneur Hermit sur nos machines (I9- 10850K à 3.6 GHz, 32 Go DDR4 3200MHz, GPU RTX 3080), il faut en moyenne 130s pour classifier 100 images de pizzas. Avec l'OntoClassifier, sur les mêmes machines, la classification des mêmes données prend en moyenne 1,6s. Il faut bien entendu relativiser cette différence car, comme nous l'avons souligné dans la partie 4.2, un module comme Hermit est destiné à raisonner sur une ontologie dans sa globalité en considérant de manière exhaustive l'ensemble des relations qui peuvent être inférées, alors que le raisonnement réalisé par un OntoClassifier focalise uniquement sur les relations ontologiques qui servent à calculer les classes de C, c'est à dire celles explicitement visées par le classifieur. Comme dans la partie 3.2, et sur le même jeu de données assez simples d'images synthétiques de pizzas, ce pipeline a pu être entraîné pour atteindre une précision de 100% sur un ensemble de test constitué de 20% des échantillons.
La Figure 6 montre l'exemple d'une image de *Fiorentina*. Le classifieur fournit la liste des classes qui ont été détectées (*Fiorentina*, *Cheesy*, *Vegetarian*). Le masque ontologique (résultant de la segmentation) fournit la liste des ingrédients. Ce masque peut être projeté sur l'image « à la Grad-CAM », mais nous avons choisi ici de l'afficher séparément pour plus de lisibilité. On peut noter que contrairement à ce que nous avions montré en 3.2, le niveau d'abstraction est ici en adéquation avec celui de l'ontologie : aucun topping n'est ignoré par le classifieur et dans le masque, les entités mises en valeur correspondent à la définition ontologique des classes, et chaque topping est différencié et identifiable grâce à un code couleur.

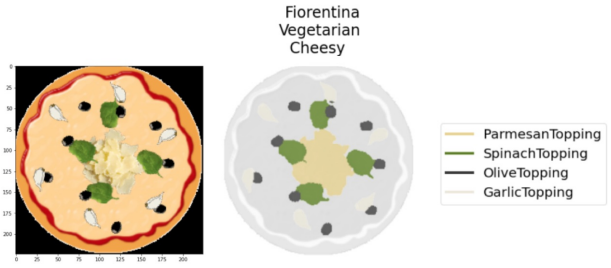


FIGURE 6 – Classification et segmentation ontologique.

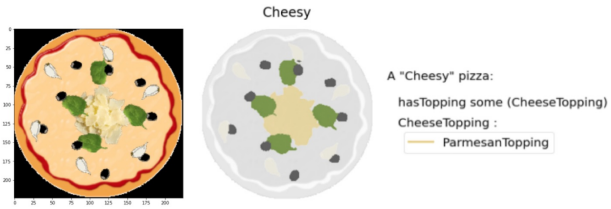


FIGURE 7 – Explications visuelles ontologiques.

Le système permet de plus de focaliser sur une des classes identifiées et d'utiliser l'introspection de l'OntoClassifier pour expliquer cette classification. Ainsi, la Figure 7 illustre une focalisation sur la classe *Cheesy* identifiée pour l'image de la Figure 6. Ce focus reprend le masque ontologique, et y ajoute (en partie droite) une explication qui met en correspondance la définition en OWL de la classe avec les pixels de l'image qui ont participé, en tant que features ontologiques, à la satisfiabilité des assertions qui la composent. Dans la même idée, la Figure 8 illustre le fait que l'OntoClassifier peut aussi expliquer le résultat d'une classification du fait de l'absence de features.

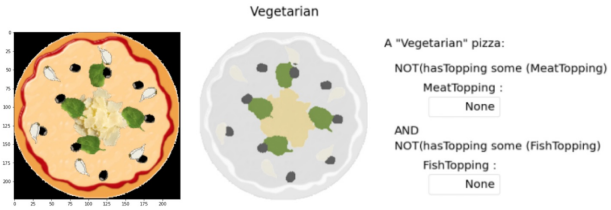


FIGURE 8 – Explications par des features absentes.

©AFIA2021

5 Discussion

Il est vrai que la démarche présentée ici demande un travail préparatoire supplémentaire autour de la création d'une ontologie pour réifier le niveau d'abstraction des utilisateurs, de la construction des ensembles C, D et F, ainsi que la mise en œuvre d'une technique d'AP plus complexe que pour une « simple » classification. On peut cependant aussi noter que cette approche, en plus de résulter en un classifieur ontologiquement explicable, possède d'autres avantages.
Tant que l'ensemble des features ontologiques (F) ne change pas, il est facilement possible d'ajouter de nouvelles classes dans C, d'en supprimer, ou de les modifier, et d'intégrer ces évolutions au pipeline de classification sans avoir à ré-entraîner le modèle. Il suffit de (re-)générer l'OntoClassifier pour que la nouvelle version intègre les nouvelles étiquettes, et soit capable d'expliquer pourquoi une image y correspond.
Comme le soulignent [29] et [4], la notion de point de vue est importante, y compris dans le domaine des ontologies : le sens des choses est pluriel, elles ont d'ailleurs souvent des définitions différentes selon les points de vue. La démarche et les outils que nous proposons peuvent apporter des éléments de réponse au besoin de multi points de vue puisqu'il est possible de générer plusieurs OntoClassifiers dédiés à des points de vue différents sur le même domaine. Pour ce faire, il est possible de composer différents ensembles C (un par point de vue), et de générer les différents OntoClassifiers qui viendront compléter le même module d'AP, proposant ainsi des pipelines de classification et d'explicabilité dédiés à chaque point de vue.
Enfin, notre démarche permet aussi d'introduire la notion de point de vue au niveau de l'explicabilité elle-même. En effet, pour un même ensemble de classes C, il est possible de créer différents ensembles de définitions D, et donc de générer des classifieurs explicables selon diverses définitions ontologiques. Dans l'ontologie des Pizzas, une *Vegetetarian* peut ainsi être définie de plusieurs manières :

(1) VegetarianPizza $\equiv \neg\ (\exists$ hasTopping . FishTopping) $\sqcup$ $\neg\ (\exists$ hasTopping . MeatTopping)

(2) VegetarianPizza $\equiv \forall$ hasTopping . VegetarianTopping

Si ces 2 définitions aboutissent à la même classification, elles permettent de créer des OntoClassifiers qui fourniront des explications visuelles avec des points de vue différents, focalisant sur (mettant en valeur) la présence ou l'absence soit (1) des toppings sous-classes de poissons et viandes (cf. Figure 8), soit (2) des toppings sous-classes d'ingrédients végétariens.

6 Conclusion

Répondant au besoin d'explicabilité des IA, nous avons exploré dans ce papier les apports et la faisabilité d'un processus de création de classifieurs ontologiquement explicables du point de vue des utilisateurs du domaine. Nous avons proposé une démarche générique inspirée de diverses approches de l'état de l'art qui permettent l'explicabilité, et qui résulte en une architecture basée sur 2 modules, l'un dédié à l'extraction de features ontologiques par des techniques d'AP, l'autre dédié au raisonnement ontologique et nommé OntoClassifier.
De manière à intégrer la dimension ontologique au cœur même du classifieur sans trop alourdir le pipeline de classification résultant, nous avons introduit un outil permettant la génération de l'OntoClassifier, ce module étant implémenté automatiquement sous la forme d'un graphe de tenseurs ontologiques construit directement à partir des définitions fournies par l'ontologie.
Nous avons exemplifié notre démarche par la création d'un classifieur d'images dédié au domaine de la fameuse ontologie des Pizzas, et illustré les possibilités offertes par l'OntoClassifier, aussi bien du point de vue de la classification, que de celui de l'explicabilité visuelle des prédictions en utilisant les définitions OWL de l'ontologie. Comme nous l'avons souligné, le jeu de données mis en oeuvre dans cet exemple était simple et totalement contrôlé, ceci dans le but d'aider à la formalisation et à l'illustration de la démarche que nous proposons. Nos travaux en cours impliquent d'ores et déjà cette démarche et ces outils dans un projet d'envergure dédié à un autre domaine, sur des données réelles, et pour une tâche de classification d'images à grain fin.
Les éléments que nous avons présentés restent cependant à être étoffés. Nous avons en particulier pour l'instant principalement focalisé sur les possibilités offertes par un classifieur ontologiquement explicable et n'avons pas encore travaillé sur l'ergonomie des interfaces homme-machine qui permettront aux utilisateurs finaux de manipuler et d'explorer les explications fournies par le système : ce point fera l'objet de futurs travaux. De plus, les explications visuelles proposées ici utilisent directement les expressions OWL pour les relier à l'image : cette représentation demande aussi à être améliorée, puis à être évaluée avec des utilisateurs.
Les éléments exposés dans ce papier fournissent néanmoins des bases solides nous permettant d'entamer de nouveaux projets ayant besoin de classifieurs explicables au niveau d'abstraction de leurs utilisateurs. Il permettent de plus d'imaginer de nouvelles fonctionnalités prometteuses, voire nécessaires dans le cadre de projets impliquant des acteurs aux cultures différentes, comme par exemple le fait d'envisager l'explicabilité des IA tout en considérant le besoin de multi points de vue.

Références

[1] P. Angelov and E. Soares. Towards explainable deep neural networks (xDNN). *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, 130 :185–194, 2020.

[2] A. Arrieta, N. Díaz-Rodríguez, J. Ser, Adrien Bennetot, S. Tabik, A. Barbado, S. García, S. Gil-López, D. Molina, R. Benjamins, R. Chatila, and F. Herrera. Explainable artificial intelligence (XAI) : Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *ArXiv*, abs/1910.10045, 2020.

[3] J. Atif, C. Hudelot, and I. Bloch. Explanatory reasoning for image understanding using formal concept analysis and description logics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems*, 44 :552–570, 2014.

[4] A. Bénel and C. Lejeune. Humanities 2.0 : documents, interpretation and intersubjectivity in the digital age. *Int. J. Web Based Communities*, 5 :562–576, 2009.

[5] R. Confalonieri and Tarek R. Besold. Trepan reloaded : A knowledge-driven approach to explaining black-box models. In *ECAI*, 2020.

[6] D. Conigliaro, R. Ferrario, C. Hudelot, and D. Porello. Integrating computer vision algorithms and ontologies for spectator crowd behavior analysis. In *Group and Crowd Behavior for Computer Vision*, 2017.

[7] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L. Li, K. Li, and L. Fei-Fei. ImageNet : A large-scale hierarchical image database. In *CVPR*, 2009.

[8] Z. Ding, L. Yao, B. Liu, and J. Wu. Review of the application of ontology in the field of image object recognition. In *ICCMS 2019*, 2019.

[9] F. K. Dosilovic, M. Brčič, and N. Hlupic. Explainable artificial intelligence : A survey. *41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, pages 0210–0215, 2018.

[10] A. Gonzalez-Garcia, D. Modolo, and V. Ferrari. Do semantic parts emerge in convolutional neural networks ? *International Journal of Computer Vision*, 126 :476–494, 2017.

[11] B. Goodman and S. Flaxman. European union regulations on algorithmic decision-making and a "right to explanation". *AI Mag.*, 38 :50–57, 2017.

[12] L. A. Hendricks, Z. Akata, M. Rohrbach, J. Donahue, B. Schiele, and T. Darrell. Generating visual explanations. In *ECCV*, 2016.

[13] Z. C. Lipton. The mythos of model interpretability. *Queue*, 16 :31 – 57, 2018.

[14] M. Losch, M. Fritz, and B. Schiele. Interpretability beyond classification output : Semantic bottleneck networks. *ArXiv*, abs/1907.10882, 2019.

[15] S. M. Lundberg and Su-In Lee. A unified approach to interpreting model predictions. In *NIPS*, 2017.

[16] D. Marcos, S. Lobry, and D. Tuia. Semantically interpretable activation maps : what-where-how explanations within CNNs. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW)*, pages 4207–4215, 2019.

[17] D. Martens and F. Provost. Explaining data-driven document classifications. *MIS Q.*, 38 :73–99, 2014.

[18] D. P. Papadopoulos, Y. Tamaazousti, F. Ofli, I. Weber, and A. Torralba. How to make a pizza : Learning a compositional layer-based gan model. *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 7994–8003, 2019.

[19] M. Tulio Ribeiro, S. Singh, and C. Guestrin. "why should i trust you ?" : Explaining the predictions of any classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016.

[20] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox. U-Net : Convolutional networks for biomedical image segmentation. *ArXiv*, abs/1505.04597, 2015.

[21] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L-C. Chen. MobileNetV2 : Inverted residuals and linear bottlenecks. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 4510–4520, 2018.

[22] Md. Kamruzzaman Sarker, N. Xie, D. Doran, M. Raymer, and P. Hitzler. Explaining trained neural networks with semantic web technologies : First steps. *ArXiv*, abs/1710.04324, 2017.

[23] R. R. Selvaraju, A. Das, R. Vedantam, M. Cogswell, D. Parikh, and D. Batra. Grad-CAM : Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *International Journal of Computer Vision*, 128 :336–359, 2019.

[24] K. Simonyan and A. Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *CoRR*, abs/1409.1556, 2015.

[25] W. Swartout, C. Paris, and J. Moore. Explanations in knowledge systems : design for explainable expert systems. *IEEE Expert*, 6 :58–64, 1991.

[26] D. West. The future of work : Robots, AI, and automation. 2018.

[27] M. D. Zeiler, G. W. Taylor, and R. Fergus. Adaptive deconvolutional networks for mid and high level feature learning. *2011 International Conference on Computer Vision*, pages 2018–2025, 2011.

[28] Q. Zhang, Y. Wu, and S. Zhu. Interpretable convolutional neural networks. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 8827–8836, 2018.

[29] M. Zhitomirsky-Geffet, E. S. Erez, and J. Bar-Ilan. Toward multiviewpoint ontology construction by collaboration of non-experts and crowdsourcing : The case of the effect of diet on health. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 68, 2017.

[30] J. Zhu, A. Liapis, S. Risi, R. Bidarra, and G. Youngblood. Explainable AI for designers : A human-centered perspective on mixed-initiative co-creation. *2018 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG)*, pages 1–8, 2018.

©AFIA2021

Réseaux de Neurones Convolutifs pour la Caractérisation d'Anomalies Magnétiques

J. Cárdenas Chapellín[1], C. Denis[2], H. Mousannif[3], C. Camerlynck[4], N. Florsch[1]

[1] Sorbonne Université, UMMISCO
[2] Sorbonne Université, LIP6
[3] Université Cadi Ayyad, LISI
[4] Sorbonne Université, METIS

julio.cardenas_chapellin@sorbonne-universite.fr

Résumé

Cette contribution présente l'utilisation des réseaux de neurones convolutifs pour la détection d'anomalies magnétiques. L'approche développée permet la localisation de dipôles magnétiques, avec le comptage du nombre de dipôles, leur position géographique et la prédiction de leurs paramètres (moment magnétique, profondeur et déclinaison). Elle sera ensuite testée sur des données réelles, dans le cadre par exemple, d'une détection pyrotechnique pour la prospection de munitions non explosées, avant d'envisager une application vers d'autres méthodes géophysiques.

Mots-clés

Apprentissage profond, réseaux de neurones convolutifs, géophysique, méthodes magnétiques

Abstract

This contribution introduces the use of convolutional neural networks for the characterization of magnetic anomalies. The developed approach allows the localization of magnetic dipoles, including counting the number of dipoles, their geographical position, and the prediction of their parameters (magnetic moment, depth, and declination). Subsequently, it will be tested on real data, for example, in the framework of pyrotechnic detection for unexploded ordnance prospection. Finally, an application to other geophysical methods will be considered.

Keywords

Deep learning, convolutional neural networks, geophysics, magnetic methods

1 Introduction

Les premiers réseaux de neurones ont été développés dans les années 1950. Cependant, jusque dans les années 1980, il n'existait pas à la fois une puissance de calcul et des algorithmes efficaces pour prendre en compte des topologies de réseaux de neurones plus complexes, permettant d'améliorer leurs capacités de prédiction. L'algorithme de rétropropagation du gradient couplé à une plus forte puissance de calcul a permis d'obtenir des résultats spectaculaires dans le domaine de la reconnaissance des formes et de la perception.

De nombreuses disciplines scientifiques orientent également leurs activités de recherche vers l'apprentissage machine profond. C'est aussi le cas de la géophysique pour faciliter le traitement automatisé des données géophysiques et la résolution des problèmes d'inversion : par exemple pour l'identification des trains d'ondes ou le filtrage du bruit sismique [12], ou pour obtenir une estimation de l'épaisseur globale de la croûte terrestre [11].

Pendant la dernière décennie, les méthodes d'apprentissage profond se sont révélées très prometteuses, notamment dans le domaine de l'interprétation sismique, ou en mettant en évidence des failles dans les sections sismiques par la génération d'un attribut de probabilité [10], ou encore avec la prédiction par un réseau neuronal convolutif d'un modèle élastique du sous-sol directement à partir des données sismiques enregistrées [3].

L'inversion des données magnétiques par apprentissage machine profond est un sujet qui n'a été abordé que très récemment. Des modèles d'apprentissage profond ont récemment été utilisés pour réaliser l'inversion de structures magnétiques 3D [6]. Pour cela, un jeu de données contenant des millions de modèles géologiques annotés pour chaque structure géologique a été généré pour alimenter les réseaux de neurones convolutifs. Leurs modèles de réseaux de neurones permettent de classifier et de prédire les paramètres d'une structure géologique présente dans les cartes magnétiques. Cependant, cette approche est limitée à l'analyse d'une seule configuration et, le fait d'analyser l'ensemble des anomalies plutôt que chacune d'entre elles séparément, multiplie le nombre de cas à traiter et donc le temps de prédiction.

Le projet du présent article vise à caractériser des données magnétiques en comptant le nombre d'anomalies magnétiques dipolaires puis de prédire leurs positions (x,y) respectives ainsi que les paramètres associés (moment magnétique, profondeur et déclinaison).

©AFIA2021

1.1 Dynamique traditionnelle dans les méthodes magnétiques en géophysique et perspectives sur l'application de l'apprentissage profond

Dans les méthodes magnétiques en géophysique, les propriétés physiques d'intérêt sont la susceptibilité magnétique (aimantation induite) et la densité d'aimantation (cas rémanent). On s'intéresse ici au cas induit, le plus fréquent. L'aimantation induite permet de caractériser la quantité de matériau magnétisé dans un champ magnétique primaire. Le matériau magnétisé crée un champ magnétique secondaire (souvent appelé champ induit –mais en toute rigueur il faut parler d'induction magnétique) et les données mesurées lors d'une prospection sont la superposition du champ terrestre primaire et des champs induits secondaires. Ces données sont parfois interprétées en termes d'unités ou structures géologiques réelles (comme les failles ou les intrusions magmatiques), ou inversées pour obtenir la distribution de moments magnétiques induits sous la surface (figure 1).

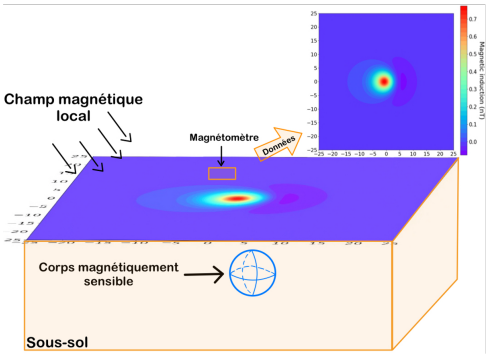


FIGURE 1 – Éléments d'une prospection magnétique : un champ magnétique local, un corps magnétisable enfoui dans le sous-sol, un instrument de mesure (magnétomètre) et des cartes générées après traitement de données.

Afin d'interpréter les données magnétiques, les géophysiciens effectuent des corrections, fournissant les données traitées comme produit final. Ces corrections, en partie réalisées par des logiciels d'inversion classiques, permettent d'isoler le champ anomal causé par des éléments d'intérêt enfouis dans le sous-sol afin d'interpréter les données magnétiques en termes de caractéristiques et de structures en profondeur (Figure 2). Parfois la situation se complique pour les cartes magnétiques où les corps responsables ont des formes compliquées et des dimensions variables. Il est classique que ce processus implique un certain degré de subjectivité et dépendra de l'expertise du géophysicien.
Notre approche de l'application de l'apprentissage profond (Figure 2) devrait d'une part pallier les faiblesses des algorithmes d'inversion, pour lesquels dans un problème multiparamétré à grand nombre d'inconnues, la fonction objectif est souvent très aplatie autour de son minimum global. D'autre part, les différents bruits affectant les données réclament souvent un ajustement fin des paramètres d'amortissement en privilégiant un compromis entre la variance de la solution et la variance des erreurs d'ajustements.

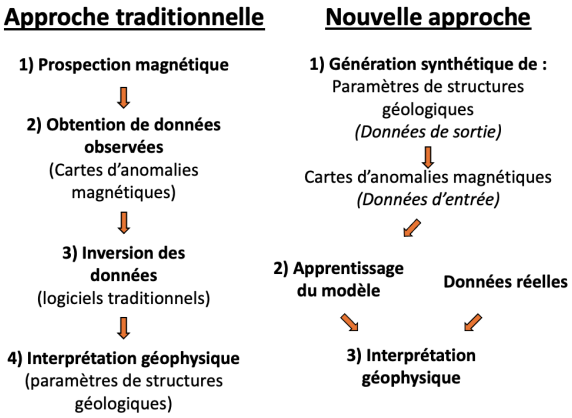


FIGURE 2 – Schéma de la dynamique traditionnelle suivie en géophysique (à gauche), et celui de la nouvelle approche proposée dans cette étude (à droite).

2 Méthodologie

Comme nous l'avons présenté précédemment, l'obtention d'une carte avec la distribution de la susceptibilité magnétique résulte d'une opération de prospection sur le terrain. Les cartes obtenues sont souvent imparfaites en raison de multiples facteurs, comme par exemple : le bruit instrumental, les conditions de régularité du terrain, les difficultés d'accès, etc. En conséquence, qualité et quantité des données géophysiques sont limitées.
Dans l'apprentissage profond, la précision des prédictions réalisées grâces aux réseaux de neurones dépend fortement de la complexité de l'architecture et de la quantité de données disponibles pour l'apprentissage. Contrairement à d'autres domaines dans lesquels les réseaux de neurones ont connu un énorme succès, comme pour la classification des images où le nombre de données disponibles est souvent supérieur à 1 million, la disponibilité de données géophysiques est un facteur limitant, car le nombre de cartes disponibles est faible (maximum d'un millier par exemple). Pour surmonter cette difficulté, on utilise des données simulées pour entraîner et valider le réseau neuronal convolutif. Par exemple, la figure 3 montre l'anomalie magnétique générée par une sphère de moment magnétique 52 $A.m^2$, qui se trouve à 1.4 m de profondeur et en présence d'un champ primaire horizontal.

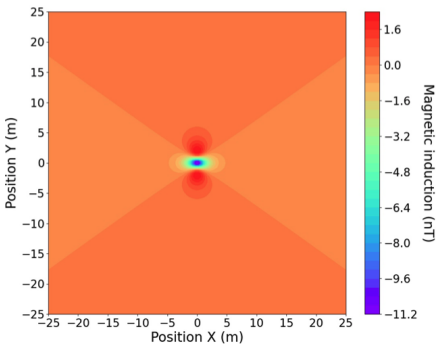


FIGURE 3 – Exemple d'une carte d'anomalie magnétique générée synthétiquement.

2.1 Génération des modèles synthétiques

En utilisant l'équation 8.16 proposée par [15] (cf. équation 1), nous avons pu générer des cartes d'anomalies magnétiques pour différentes configurations de corps magnétiques, qui sont ici assimilés à des dipôles magnétiques. Premièrement nous avons choisi une gamme de valeurs pour les paramètres de la profondeur et de l'amplitude magnétique. Ensuite, les dipôles ont été générés pour chaque combinaison de paramètres en faisant varier aléatoirement leurs positions (x,y). Pour finir et afin d'augmenter le nombre de dipôles, nous avons sommé les cartes générées avec la même distribution de paramètres, en respectant une distance minimum de 2 mètres entre les dipôles pour éviter toute coalescence des anomalies (figure 4a et 4b). Le choix d'utiliser les mêmes distributions pour sommer les cartes permet d'éviter l'occultation d'anomalies dont les amplitudes seraient trop différentes. Cette difficulté, qui est souvent observée dans les cas réels, fera l'objet d'une étude ultérieure.

$$\vec{B_a} = \frac{\mu_o}{4\pi}[\frac{3\hat{r}(\hat{m}\cdot\hat{r}) - \vec{m}}{r^3}] \cdot 10^9 \qquad (1)$$

Avec :
$\vec{B_a}$ = anomalie magnétique (en nT) ;
$\vec{m}$ = moment magnétique du dipôle induit (en $A.m^2$) ;
r = distance entre le dipôle magnétique et le point d'observation (en m) ;
$\hat{r}$ = vecteur unitaire en direction du dipôle magnétique ;
μ_o = perméabilité magnétique du vide (en H/m)

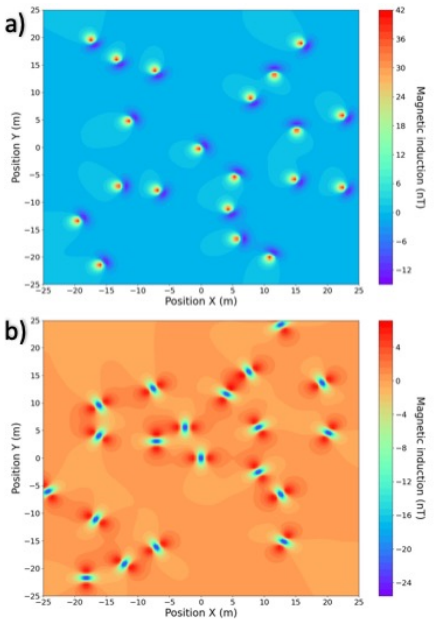


FIGURE 4 – Cartes d'anomalies magnétiques induites incluses dans le jeu de données synthétiques utilisés pour l'apprentissage. Les anomalies de type dipolaire correspondent à des valeurs de déclinaison variable et à une inclinaison de 30^o(a) et 0^o(b).

Les paramètres de chaque dipôle magnétique ont été utilisés comme données de labellisation de notre algorithme. Notre jeu de données, comportant environ 10^4 exemples, a été divisé comme suit : 60% apprentissage, 20% validation croisée et 20% test. Cette répartition est considérée comme optimale par Chollet F. [2], lorsque le jeu de données est limité (nombre d'exemples inférieur à 10^6). Pour choisir la taille de la base d'apprentissage, nous avons testé différents tailles de celle-ci. La meilleure stabilité du modèle a été observée à partir de 10^4 exemples. Les caractéristiques de ce jeu de données sont décrites dans le tableau 1.

Caractéristiques du jeu de données		
Cas magnétique	**Aimantation rémanente**	
Dipôles	Non	
Grille		
Taille	**Espacement**	
100 m	0.5 m	
Caractéristiques physiques		
Profondeur	**Rayon**	**Hauteur du capteur**
[1.0 – 1.4] m	[1.0 – 1.4] m	0.5 m
Caractéristiques magnétiques		
Champ local	**Inclinaison**	**Déclinaison**
47.000 nT	[0, 30, 60, 90] dégrées	[0-180] dégrées

TABLE 1 – Caractéristiques utilisées pour générer le jeu de données simulées.

2.2 Sélection d'architecture

Au début de notre recherche, en l'absence de bibliographie spécifique sur notre application magnétique, nous avons décidé d'utiliser les réseaux de neurones convolutifs (« CNNs ») en raison de la similitude entre la représentation classique de données magnétiques (sous forme de carte coloriée) et les images couleur ou noir/blanc. Nous considérons que les images contiennent dans chaque pixel une valeur d'induction magnétique similaire à l'information de l'un des canaux RVB d'une image couleur.
Cette hypothèse nous a permis de considérer et d'évaluer plusieurs combinaisons de modèles CNNs, souvent appliqués aux images, avant de trouver celle qui s'adapte le mieux à nos objectifs. Le tableau 2 montre un résumé des architectures utilisées par ordre avec des commentaires sur les avantages et les limitations observées.

Modèle (prédictions)	Retour d'expérience
1) VGG16 (Paramètres)	- Prédiction limitée à un objet. - Pas d'information sur localisation.
2) VGG16 multi-objets (paramètres)	- Ralentissement de l'apprentissage lié à l'augmentation du nombre de neurones en sortie. - Pas d'information sur localisation.
3) VGG16 multi-objets (paramètres + position)	- Ralentissement de l'apprentissage lié à l'augmentation du nombre de neurones en sortie. - Diminution de la précision dû à la complexité des prédictions.
4) VGG16 multi-objets (paramètres) + U-Net	- Information précise des positions (x, y) mais imprécise de la largeur et de la longueur des objets.
5) YOLO + DenseNet multi-objets (paramètres)	- Information précise sur la localisation et la classification des objets. - Amélioration du temps d'apprentissage et de la prédictions des paramètres.

TABLE 2 – Ordre de sélection des architectures et les retours d'expériences correspondants.

©AFIA2021

Après plusieurs expérimentations, nous avons observé que la combinaison de deux modèles, «YOLO» [13] et «DenseNet» [7] (figure 5), est la plus performante pour atteindre nos objectifs de classification et de régression. Nous avons premièrement utilisé l'architecture "YOLO" pour localiser et classer chaque dipôle. Pour effectuer la régression sur les paramètres, nous avons ensuite mis en œuvre l'architecture "DenseNet" afin de prédire individuellement les paramètres de chaque dipôle détecté par le modèle YOLO.

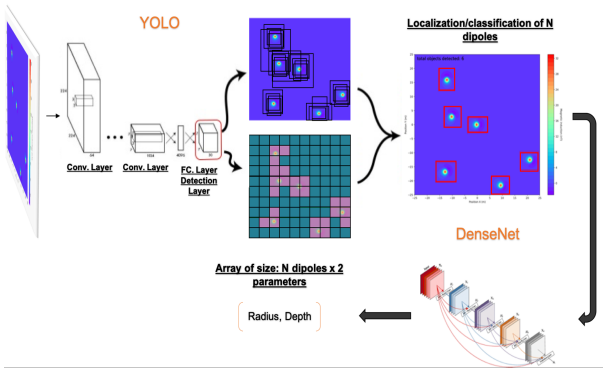


FIGURE 5 – Schéma de notre architecture CNN combinant deux méthodes distinctes (YOLO et DenseNet).

"YOLO" est une architecture efficace de reconnaissance d'objets capable d'identifier la présence d'objets dans les images. Elle divise l'image en régions et prédit les rectangles et les probabilités pour chacune. D'autre part, "DenseNet" est un type d'architecture CNN où chaque couche est connectée à toute les couches suivantes. Cette idée permet d'atténuer le problème de l'évanescence de gradient et d'encourager la réutilisation des caractéristiques lors de l'apprentissage.

Pour améliorer la performance de notre modèle de régression et ainsi déterminer un bon ensemble d'hyperparamètres, nous avons utilisé l'algorithme "hyperband" [9]. Il consiste à accélérer la recherche aléatoire d'hyperparamètres grâce à une allocation adaptative des ressources et à un "early-stopping", ce qui offre une accélération d'un ordre de grandeur supérieur à celle d'autres algorithmes d'exploration. Parmi les hyperparamètres, nous avons utilisé «dropout» pour la régularisation. De multiples fonctions d'optimisation ont été comparées et "AdaGrad" a été sélectionné pour sa stabilité et sa convergence rapide. La fonction d'activation "tanh" a été choisie en raison de valeurs négatives et positives dans les quantités d'entrée. Il est important de préciser que cette fonction a été appliquée à toutes les couches sauf à la couche de sortie car, pour un modèle de régression, nous avons besoin de valeurs continues à la fin. Finalement, nous avons utilisé le coefficient de détermination R^2 pour calculer la précision et la fonction d'erreur quadratique moyenne (MSE) en guise de fonction coût. Le tableau 3 montre le nom du modèle de régression, les valeurs des hyperparamètres et celles de sa performance.

Model	**Dropout**	**Learning rate**
DenseNet	0.1	0.0003
Fonction d'activation	**Précision**	**Perte**
tanh	0.9998	0.0005

TABLE 3 – Combinaison d'hyperparamètres.

2.3 Étiquetage des données.

Nous avons procédé à un processus d'étiquetage suite à la génération des modèles géologiques. Vu que deux modèles d'apprentissage profond seront utilisés, les formats adoptés pour les données de sortie sont : le format d'étiquetage "YOLO" pour le modèle de détection et classification, et les valeurs réelles magnétiques pour le modèle de régression.
Le format d'étiquetage "YOLO" consiste en la création d'un fichier.txt qui contient les annotations pour l'image correspondante, c'est-à-dire la classe et les valeurs du rectangle (« Bounding Box ») autour de chaque objet. "Bounding box" est un type d'annotation couramment utilisé en vision par ordinateur et il comporte les coordonnées, la hauteur et la largeur de l'objet.
Les CNNs sont particulièrement adaptés à l'analyse des données d'images. En plus de les utiliser pour la classification, on peut aussi les utiliser pour prédire des données continues. Dans notre recherche, ces données sont les paramètres des dipôles magnétiques (la déclinaison, la profondeur et l'amplitude du champ magnétique).

3 Explicabilité des algorithmes

L'utilisation de l'apprentissage machine engendre des interrogations de différentes nature concernant son fonctionnement. Dans le cadre de notre application en géophysique, il existe une pression forte sur l'explication des résultats produits par l'apprentissage machine. L'explication peut être destinée par exemple à des développeurs ou des ingénieurs en R&D qui utilisent le plus souvent l'apprentissage machine en mode "boite noire". L'explication peut être aussi destinée à des chercheurs académiques pour améliorer la connaissance scientifique en raison du caractère limité de la prédiction sans explication.
Dans le cadre de cette contribution, le besoin d'explication a été motivée pour sélectionner un modèle parmi d'autres ayant quasiment la même performance statistique. Nous avons utilisé les outils informatiques permettant d'obtenir des informations visuelles :

- La zone discriminatoire de notre réseau a été visualisé en utilisant l'outil Grad-Cam [14].
- L'outil t-SNE [8] a été utilisé pour réduire la dimensionnalité des données.

"Grad-Cam" est une technique permettant de produire des "explications visuelles" pour les décisions d'une grande classe de modèles basés sur CNN. Elle utilise les informations de gradient qui circulent dans la dernière couche convolutionnelle de la CNN pour comprendre chaque neurone en vue d'une décision d'intérêt. De l'autre côté, t-SNE est une autre technique de réduction de la dimensionnalité et est particulièrement bien adaptée à la visualisation d'un ensemble de données à haute dimension.

4 Résultats et Discussion

Nous avons mis en place plusieurs expériences pour tester la robustesse de notre modèle et évaluer sa capacité de généralisation prenant en compte la variation des caractéristiques physiques et magnétiques des dipôles (tableau 1), le niveau de bruit et le nombre de dipôles présents dans le modèle. Les résultats montrent que la méthode YOLO obtient de très bonnes performances. Bien que notre modèle ait été entraîné avec un nombre limité de dipôles (entre 1 et 8), sa capacité de généralisation lui permet d'identifier jusqu'à 20 dipôles (figure 6a et 6b) dipôles avec une confiance moyenne supérieure à 90%.

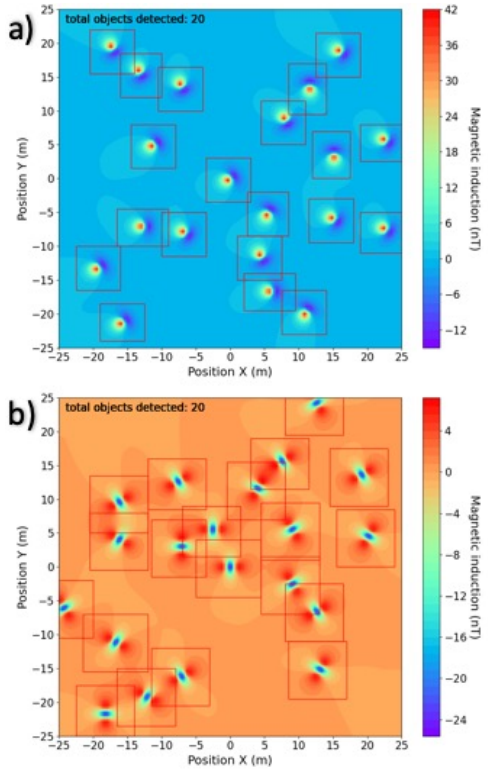


FIGURE 6 – Prédictions du modèle YOLO pour 2 inclinaisons magnétiques de 30° (a) et 0° (b). L'algorithme localise chaque anomalie en l'identifiant dans un rectangle. Le total des dipôles détectés est de 20 dans les deux cas ; ces valeurs sont inscrites en haut à gauche de chaque figure.

A propos de l'évaluation de la performance du réseau YOLO développé, chaque score de confiance reflète la probabilité qu'un rectangle contienne un objet *(Pr(objet))*, ainsi que la précision de ce rectangle en évaluant son chevauchement avec celui de la vérité de terrain mesurée par le score IoU (« Interception over Union »). Par conséquent, le score de confiance devient *Pr(objet) * IoU*. Dans cette étude, nous avons calculé la moyenne du score de confiance pour mesurer l'impact de l'augmentation des dipôles sur la précision de toutes les anomalies détectées. Concernant le réseau DenseNet, on remarque une performance élevée (score de R^2 supérieur à 95%) (Figure 7). Ce résultat s'explique par le fait que le réseau n'analyse que les zones contenant une anomalie d'intérêt, localisée précédemment par le réseau YOLO. Cependant, on observe que la performance des deux réseaux diminue à partir de la présence de 10 dipôles (Figure 7). Cette diminution se produit parce qu'un plus grand nombre de dipôles augmente la coalescence d'anomalies, ainsi que la probabilité d'avoir une anomalie proche des bords de la zone modélisée. Le réentraînement du modèle avec ces cas dans le jeu de données doit surmonter ces limitations.

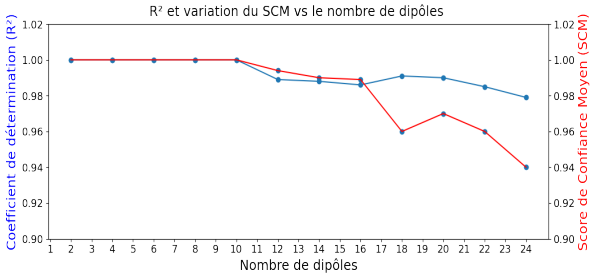


FIGURE 7 – Variation du coefficient de détermination R2 (DenseNet) à gauche et du score de confiance moyen (YOLO) en fonction du nombre de dipôles présents dans le modèle, à droite.

D'autre part, il est important de mentionner que les résultats obtenus correspondent à un jeu de données d'une certaine complexité et sans bruit. La prise en compte de la détectabilité d'une anomalie en présence d'un bruit fond magnétique est beaucoup plus complexe que le simple dépassement d'un seuil constant [4]. Par conséquent, nous avons ajouté un bruit gaussien à notre jeu de données dans une première tentative pour simuler un bruit magnétique naturel. Bien que ce bruit soit basique en comparaison, son étude est importante pour évaluer la capacité de nos modèles à s'adapter correctement à de nouvelles données, tirées de la même distribution que celle utilisée pour leur création.

Pour évaluer les nouveaux modèles magnétiques bruités, nous avons utilisé notre modèle préalablement entraîné. Nous observons une altération de la forme des dipôles lorsque le niveau de bruit augmente et une variation considérable des valeurs d'induction magnétique. Ces changements pourraient baisser la performance de notre modèle parce qu'il dépend initialement de sa capacité à détecter chaque objet. Cependant, pour la détection, le modèle arrive à prédire le nombre exact et les rectangles correspondants à chaque dipôle (figure 8) avec une confiance supérieure à 92%. D'autre part, le modèle prédit les paramètres de chaque dipôle avec un coefficient de détermination supérieur à 96%. Ces résultats nous permettent de déduire que notre modèle est robuste jusqu'à ce niveau de bruit.

Comme indiqué dans la section 4, en plus d'utiliser les mesures statiques pour évaluer la performance de notre modèle, l'application d'outils visuels est important pour comprendre son fonctionnement et expliquer son principe de fonctionnement, indispensable pour son acceptabilité opérationnelle.

©AFIA2021

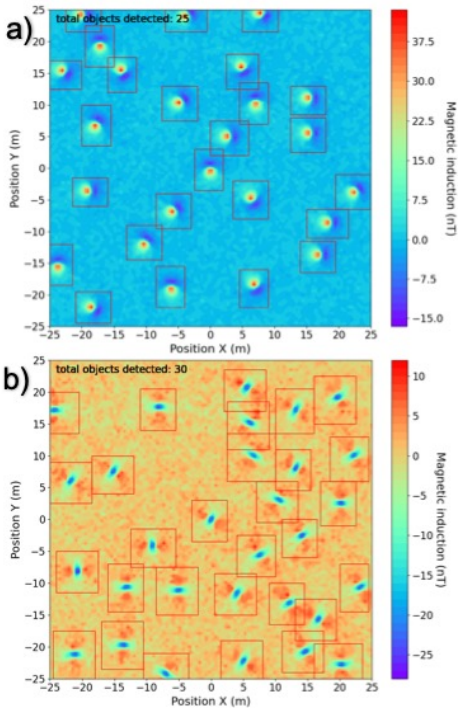


FIGURE 8 – Prédictions du modèle YOLO pour 2 inclinaisons magnétiques de 30°(a) et 0°(b) avec du bruit gaussien. Le total des dipôles détectés est a) 25 et b) 30.

Au début, l'application de l'outil Grad-Cam à la première version de notre modèle actuel nous a permis d'observer, dans la dernière couche de neurones, une carte de chaleur floue qui ne montrait pas la zone discriminatoire ciblée (Figure 9a). Cette carte nous a suggéré de supprimer plusieurs couches qui n'avaient probablement pas d'influence sur les prédictions. En suivant cette stratégie, nous avons trouvé une couche avec une zone discriminatoire cohérente (Figure 9b).

Ce changement a amélioré la stabilité de la courbe d'apprentissage, la performance des prédictions et a diminué considérablement le nombre de paramètres à entraîner du modèle, diminuant ainsi le temps de calcul de la phase d'apprentissage.

En plus de la capacité à discriminer, une autre caractéristique importante à évaluer est la capacité du modèle à différencier les paramètres utilisés pour créer le jeu de données. Pour cette évaluation, celui-ci était constitué par 16 combinaisons possibles entre les valeurs de profondeur et de rayon (tableau 1) et nous avons appliqué l'outil TSNE au jeu de données d'apprentissage (figure 10a), validation croisée (figure 10b) et test (figure 10c). Suite à cette application, nous observons que les prédictions de ces paramètres n'étaient pas aléatoires. Les graphiques générés confirment que le modèle parvient à différencier les 16 combinaisons. Bien que nous observons des petits clusters que le modèle n'arrive pas à rattacher à un groupe plus important (figure 10a) et des classifications ponctuelles erronées dans les données test (figure 10c), les résultats confirment la bonne capacité de notre modèle à différencier parmi les différentes combinaisons de paramètres.

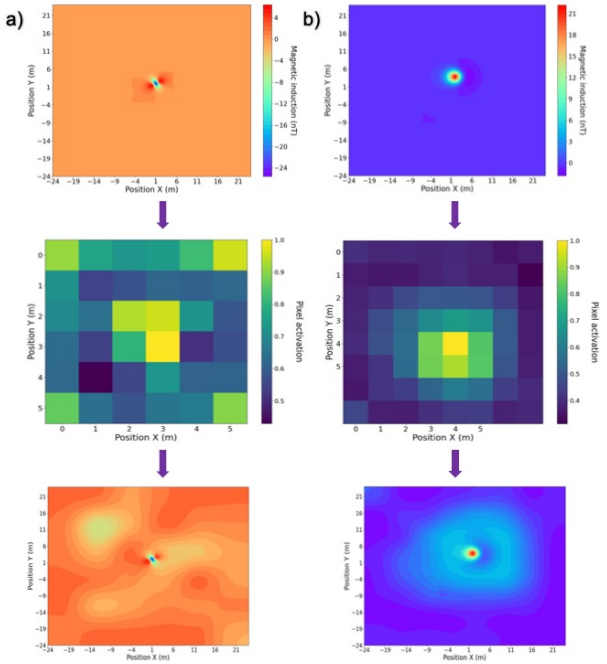


FIGURE 9 – Identification des zones discriminatoires pour a) une ancienne version et b) une actuelle version du même modèle. Du haut vers le bas, on trouve premièrement le modèle géophysique analysé, deuxièmement les pixels d'activations identifiés par Grad-Cam, et troisièmement la zone discriminatoire.

Finalement, le temps de prédiction de notre modèle est d'une vingtaine de secondes, ce qui le rendrait compatible avec une utilisation temps réel pendant une prospection.

5 Conclusions et Perspectives

Nous avons présenté dans cette contribution une stratégie pour détecter, à l'aide de l'apprentissage machine, l'ensemble des dipôles présents dans une carte magnétique. Nous prédisons ensuite les caractéristiques physiques et magnétiques de chaque dipôle détecté. Il a été généré par simulation un jeu de données synthétique, ne disposant pas de mesures géophysiques labellisés en quantité suffisante. Nos expérimentations ont montré que la combinaison des modèles, YOLO et DenseNet, fournit les meilleures performances : le modèle YOLO permet de détecter chaque dipôle tandis que le réseau DenseNet estime les paramètres de chaque dipôle identifié avec une précision supérieure à 90%.

Au-delà de la performance statistique, nous avons optimisé le modèle pour que la zone discriminatoire, visualisée par l'outil Grad-Cam, soit conforme aux résultats escomptés pour éviter la création d'artefacts statistiques. Il est à noter que cela permet de faciliter l'explication des résultats obtenus. En particulier, nous avons optimisé le nombre de paramètres du modèle pour augmenter sa stabilité. Il s'agit donc d'une première étape de vérification fonctionnelle de la boite noire de notre modèle.

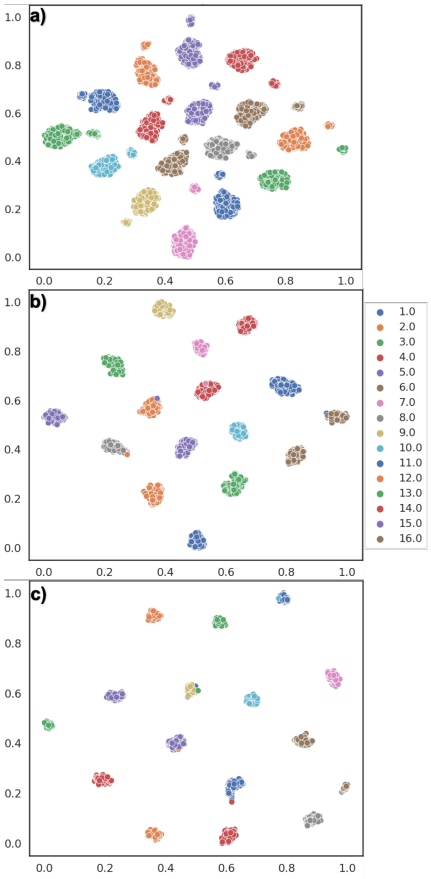


FIGURE 10 – Exemple de graphiques obtenus grâce à l'utilisation de l'outil TSNE sur le jeu de données de a) apprentissage, b) validation croisée et c) test. Les axes n'ont pas d'unité spécifique et les couleurs des clusters représentent les 16 combinaisons possibles parmi les paramètres utilisés pour créer le jeu de données.

Enfin, l'utilisation de l'outil TSNE a permis d'évaluer la capacité du modèle à différencier parmi toutes les combinaisons possibles de paramètres présentes dans le jeu de données. Ces résultats montrent que ces outils de visualisation sont des alliés incontournables pour étudier la robustesse et la stabilité d'un modèle d'apprentissage profond en allant au-delà de la mesure de la précision statistique.

Les perspectives de ce travail consistent à évaluer la robustesse de l'approche proposée en utilisant des données réelles. Un possible cas d'étude consiste à détecter des munitions non explosées enfouies dans le sous-sol (UXO) en présence un bruit de fond magnétique naturel, e.g. des sites peu ou intensément bruités ou présentant des anomalies géologiques importantes. Il sera nécessaire d'expliquer les prédictions prises par nos modèles en utilisant des techniques d'analyse post-hoc. Ces explications seront évaluées qualitativement par un panel d'expert en géophysique. Il sera aussi important de mettre en place des techniques d'adaptation de domaine, par exemple en utilisant une méthode d'apprentissage par transfert bien que les distributions statistiques des données synthétiques peuvent différer par rapport à celles des données réelles.

Références

[1] BERKLEY D. et al., Overcoming Algorithm Aversion : People Will Use Imperfect Algorithms If They Can (Even Slightly) Modify Them, *Management Science*, pp. 1155-1170, 2018.

[2] CHOLLET F., DEEP LEARNING with PYTHON *Manning Publications Co*, pp. 1941–1945, 2018.

[3] DAS V. et al., Convolutional neural network for seismic impedance inversion, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pp. 2071–2075, 2018.

[4] DWAIN K. Butler, Potential fields methods for location of unexploded ordnance, *The Leading Edge*, pp. 890-895, 2001.

[5] FLORSCH N., et al., Géophysique appliquée pour tous - Volume 2, Méthodes magnétiques et Slingram, *ISTE Editions*, 2019.

[6] GUO J. et al., 3D geological structure inversion from Noddy-generated magnetic data using deep learning methods, *Computers and Geosciences*, pp. 104701, 2021.

[7] HUANG G. et al., Densely Connected Convolutional Networks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2261-2269, 2017.

[8] LAURENS V. et GEOFREY H., Viualizing data using t-SNE. Journal of Machine Learning Research, *Journal of Machine Learning Research*, pp. 2579-2605, 2008.

[9] LISHA L. et al., Hyperband : A Novel Bandit-Based Approach to Hyperparameter Optimization, *Journal of Machine Learning Research*, pp. 1-52, 2018.

[10] MA Y. et al., A deep-learning method for automatic fault detection, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pp. 1941–1945, 2018.

[11] MEIER U. et al., Fully nonlinear inversion of fundamental mode surface waves for a global crustal model : GLOBAL CRUSTAL MODEL, *Geophysical Research Letters*, pp. 706–722, 2007.

[12] MIRKO V. et Christian J., Neural networks in geophysical applications, *GEOPHYSICS*, pp. 1032-1047, 2000.

[13] REDMON J. et al., You Only Look Once : Unified, Real-Time Object Detection, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 779–788, 2016.

[14] SALVARAJU R. et al., Grad-CAM : Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization, *Springer Science and Business Media LLC : International Journal of Computer Vision*, pp. 336–359, 2019.

[15] SCOLLAR I., Archaeological prospecting and remote sensing, *Cambridge University Press*, Cambridge University Press, 1990.

©AFIA2021

Approche multi-agent combinant raisonnement et apprentissage pour un comportement éthique

R. Chaput[1], J. Duval, O. Boissier[2], M. Guilermin[3], S. Hassas[1]

[1] Univ. Lyon, Université Lyon 1, LIRIS, UMR5205, F-69622, LYON, France
[2] Institut Henri Fayol, MINES Saint-Etienne, France
[3] Sciences and Humanities Confluence Research Center, Lyon Catholic University

{remy.chaput,salima.hassas}@univ-lyon1.fr, jeremy-duval1@hotmail.fr, Olivier.Boissier@emse.fr, mguillermin@univ-catholyon.fr

Résumé

Afin de répondre au besoin d'incorporer des considérations éthiques au sein d'algorithmes d'Intelligence Artificielle, cet article propose une méthode combinant raisonnement et apprentissage, où des agents juges évaluent l'éthique du comportement d'agents apprenants. Cette séparation offre plusieurs avantages : co-construction entre agents et humains ; juges plus accessibles pour des humains non-experts ; récompense plus riche par l'utilisation de multiple jugements. Les expérimentations sur la distribution de l'énergie dans un simulateur de Smart Grid montrent la capacité des agents apprenants à se conformer aux règles des agents juges, y compris lorsque les règles évoluent.

Mots-clés

Éthique, Machine Ethics, Apprentissage Multi-Agent, Apprentissage par Renforcement, Hybride Neural-Symbolique, Jugement Éthique

Abstract

To answer the need to imbue Artificial Intelligence algorithms with ethical considerations, this article propose a method combining reasoning and learning, where judging agents evaluate the ethics of learning agents' behavior. This separation offers several advantages : co-construction between agents and humans ; judges more accessible for non-experts humans ; richer feedback by using multiple judgments. Experiments on energy distribution inside a Smart Grid simulator show the learning agents' ability to comply with judging agents' rules, including when they evolve.

Keywords

Ethics, Machine Ethics, Multi-Agent Learning, Reinforcement Learning, Hybrid Neural-Symbolic Learning, Ethical Judgment

1 Introduction

Alors que le nombre d'applications utilisant des modèles d'Intelligence Artificielle (IA) augmente, il y a un débat de société et de recherche au sujet du moyen d'introduire des capacités éthiques dans ces modèles.

Le domaine des *Machine Ethics* s'intéresse à la conception d'"agents à impact éthique" [18] ayant un impact éthique sur des vies humaines ; en particulier, l'"éthique dans la conception" [15] vise à ce que ces agents prennent des décisions selon des considérations éthiques, ce que nous appellerons un "comportement éthique".

Cette demande de capacités éthiques pour des agents autonomes artificiels a été largement documentée [21]. Toutefois les moyens d'implémenter ces compétences ne sont pas clairs : certains travaux proposent des approches descendantes par raisonnement symbolique, tandis que d'autres préfèrent utiliser des approches ascendantes par apprentissage [1]. Les deux approches offrent différents avantages mais ont également des inconvénients ; ainsi, dans cet article, nous présentons une nouvelle approche, hybride [15], avec un apprentissage de comportements guidé par des récompenses issues de raisonnements symboliques.

Cet article est structuré comme suit : nous présentons d'abord la littérature sur laquelle nous appuyons notre approche hybride ; cette proposition est ensuite détaillée ; des expérimentations sur un cas d'application des *Smart Grids* et leurs résultats démontrent la faisabilité ; finalement, la dernière section compare l'approche à la littérature, examine les limitations actuelles et présente des perspectives.

2 Fondements

Afin d'identifier les principes de conception qui sous-tendent notre approche, nous explorons d'abord la littérature des *Machine Ethics*. Nous considérons ensuite le champ de l'IA hybride (Neural-Symbolique), qui combine les méthodes symboliques et d'apprentissage.

2.1 Éthique et IA

La plupart des travaux existants en *Machine Ethics* se focalisent sur un unique agent isolé dans son environnement [26]. Nous arguons qu'il est important de considérer plusieurs agents en interaction dans un environnement commun, comme il s'agit d'une situation plus réaliste, qui soulève le problème de la confrontation de plusieurs éthiques.

Comme en IA, les travaux en *Machine Ethics* sont divisés en trois catégories [1] : approches descendantes, ascen-

©AFIA2021

dantes et hybrides.

Les approches descendantes s'intéressent à la formalisation de principes éthiques, tel que l'Impératif Catégorique de Kant. En utilisant un raisonnement logique sur des représentations symboliques, de telles approches peuvent s'appuyer sur des connaissances expertes et offrir une meilleure lisibilité et explication des décisions prises. Par exemple, l'*Ethical Governor* [3] vérifie l'adéquation des actions avec des règles pré-établies comme les Règles d'Engagement ou le Droit de la guerre. Dans *Ethicaa* [13], des agents raisonnent sur plusieurs principes éthiques pour décider de leur comportement et juger les actions des autres agents. Cependant, ces approches descendantes, du fait de leur corpus de connaissances explicite mais figé, ne peuvent pas s'adapter, sans reconception, à des situations non prévues ou à une évolution de l'éthique.

Les approches ascendantes cherchent à apprendre un comportement à partir d'un jeu de données, e.g., des exemples étiquetés ou des expériences obtenues par interactions. Par exemple, *GenEth* [2] utilise des décisions d'éthicistes dans de multiples contextes pour apprendre un principe éthique ; une autre approche utilise l'apprentissage par renforcement (RL) en ajoutant à la récompense de la tâche une composante éthique sous forme de différence entre les comportements de l'agent et d'un humain moyen, supposé exhiber des considérations éthiques [25]. Ces approches, bien qu'utilisant de l'apprentissage, n'ont pas considéré la question de l'adaptation sur le long-terme en réponse à des situations pouvant évoluer. De plus, les approches ascendantes sont plus difficiles à interpréter que les approches descendantes.

Finalement, les approches hybrides couplent les approches descendantes et ascendantes, de telle sorte que les agents puissent apprendre des comportements éthiques par expérience tout en étant guidés par un cadre éthique existant afin de forcer des contraintes et les empêcher de diverger. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à [1, 15].

Nous discutons des différents moyens d'IA hybride Neural-Symbolique et comment les intégrer dans un agent éthique dans la prochaine section.

2.2 Approches hybrides

Les approches hybrides en IA visent à coupler le raisonnement symbolique avec l'apprentissage numérique pour bénéficier des avantages des deux approches en réduisant leurs inconvénients. Plusieurs manières pour les intégrer existent, voir par exemple [9]. Les auteurs avancent que les plans dans un agent BDI sont plus faciles à expliquer à un humain ; il est aussi admis qu'il est plus facile d'introduire des connaissances, par exemple d'un expert du domaine non-développeur, avec des règles symboliques. Des exemples d'approches hybrides incluent SOAR-RL [19] ou BDI-RL [10], qui intègrent des algorithmes d'apprentissage par renforcement avec du raisonnement. Plusieurs travaux ajoutent une couche de raisonnement symbolique, souvent BDI, par-dessus un agent artificiel [3, 11], et sont souvent qualifiés d'hybride.

Le projet Ethicaa propose un système multi-agent dans lequel les agents juges déterminent un jugement sur les actions d'autres agents, en utilisant des croyances sur une situation donnée [13]. À notre connaissance, l'intégration d'un jugement symbolique pour donner une récompense numérique aux agents apprenants n'a pas été étudié dans le domaine des Machine Ethics, mais nous pouvons appliquer les travaux d'Ethicaa au jugement d'agents utilisant de l'apprentissage numérique.

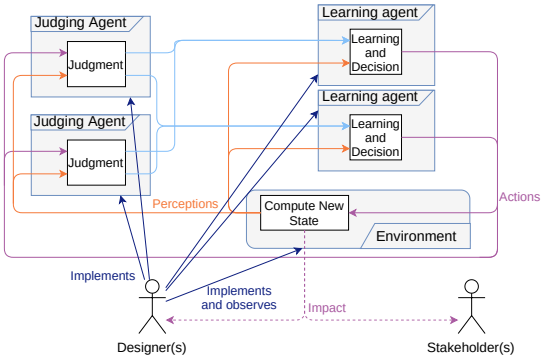


FIGURE 1 – Architecture de notre approche, comprenant des concepteurs humains implémentant des règles pour juger les agents apprenants. Les actions des apprenants modifient un environnement partagé, ce qui impacte les humains.

3 Modèle

Dans cette section, nous décrivons notre proposition, basée sur les principes de conception retenus de la littérature.

3.1 Architecture Abstraite

Considérons un système multi-agent comprenant des humains et des agents artificiels, représenté dans la Figure 1. Les concepteurs créent un environnement partagé et des agents autonomes afin qu'ils accomplissent des tâches ; les actions effectuées pour ce faire vont impacter l'environnement partagé et les humains. Le but des concepteurs est d'intégrer des *considérations éthiques* dans ces agents, afin de contraindre leur "impact éthique", en accord avec un ensemble de *valeurs morales* sélectionnées par les concepteurs.

Nous nous focalisons sur une approche hybride et plus particulièrement sur une séparation du jugement et de l'apprentissage, afin de permettre une co-construction. Pour cela, nous introduisons des agents juges et apprenants séparés, qui pourront évoluer indépendamment, par exemple pour mettre à jour les règles des juges par les concepteurs humains, tandis que les apprenants adaptent leur comportement en accord avec ces nouvelles règles.

De plus, nous proposons de rendre le jugement plus riche en confrontant plusieurs valeurs morales, que nous représentons par des agents juges séparés afin de clarifier le modèle ; cela ouvre également la voie à des interactions plus complexes entre juges tels que des processus d'argumentation, et offre un moyen simple de changer les règles en ajoutant ou supprimant des agents juges. Ces agents juges

sont basés sur les agents Ethicaa [13], manipulant un ensemble de règles morales pour raisonner et juger les actions des autres agents dans l'environnement. Les juges utilisent ces règles pour déterminer un jugement (e.g., "moral", "immoral"), qui sont transformés en récompenses pour les apprenants. Ceux-ci l'intègrent dans leur processus d'apprentissage pour apprendre à effectuer de meilleures actions. La pluralité d'apprenants permettra d'évaluer leur impact dans un environnement partagé, plutôt qu'un agent isolé.
Finalement, le comportement attendu peut évoluer au cours du temps, du fait des dynamiques de notre société, les agents devraient donc être capables de s'adapter à des règles changeantes. Les concepteurs humains observent les actions des agents apprenants dans l'environnement et rectifient ces comportements indirectement en ajustant les règles à la base du jugement des agents juges. Il est ainsi possible d'envisager une approche d'IA centrée sur l'humain, avec un contrôle humain dans la boucle, comme le préconise le rapport Européen HLEG AI [1].
Les valeurs et règles morales à la base des considérations éthiques sont clairement visibles dans ce modèle car choisies explicitement par les concepteurs. Nous faisons l'hypothèse que cela améliore l'intelligibilité du jugement et donc du comportement attendu, ce qui est reconnu comme important, notamment par le rapport du HLEG. Bien que ce point ne sera pas évalué dans les expérimentations, il sert en partie de motivation à notre approche ; les humains, y compris les utilisateurs, devraient pouvoir vérifier la compatibilité avec leurs propres principes éthiques.

3.2 Modèle Formel

Considérons l'ensemble J des agents *juges* : chaque agent $j \in J$ est associé à une seule valeur morale et un ensemble de règles morales permettant de décider si une action *supporte* ou *trahit* cette valeur morale (e.g., la Justice, l'Inclusivité, la Sécurité). Dans le second ensemble L d'agents *apprenants*, chaque agent $l \in L$ apprend un comportement et effectue des actions dans l'environnement, en se basant sur l'évaluation F_l, agrégation des jugements $Jugement_j(l)$ des $j \in J$ sur le comportement de l : $\forall l \in L : F_l = \{\forall j \in J : Jugement_j(l)\}$.
Ce modèle d'apprentissage correspond conceptuellement à un jeu Markovien (ou *Stochastic Game*), une extension du Processus de Décision Markovien (MDP) à plusieurs agents. Formellement, il s'agit d'un n-uplet $(S, P, A_0, ..., A_n, T, R_0, ..., R_n)$. S est l'ensemble de tous les états possibles, sous forme de vecteurs de nombres réels (états multi-dimensionnels et continus) pour permettre des cas d'applications riches. P, de taille n, est l'ensemble de tous les agents ; les agents juges n'agissant pas dans l'environnement, il correspond à L, l'ensemble des agents apprenants. A_l est l'ensemble des actions possibles pour l'agent l, également sous forme de vecteurs de nombres réels (actions paramétrées). L'ensemble des actions jointes $A = A_0 \times ... \times A_n$ regroupe la combinaison des actions possibles des différents agents. T est la fonction de probabilité de transition, définie par $T : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$, i.e., $T(s, a, s')$ est la probabilité de passer de l'état s à s' en effectuant l'action a. R_l est la fonction de récompense pour l'agent l, définie par $R_l : S \times A_l \times S \rightarrow \mathbb{R}$, i.e., $R_l(s, a_l, s')$ est la récompense de l'agent l pour avoir effectué l'action a_l dans l'état s, résultant en l'état s'.
Les MDPs et jeux Markovien peuvent être résolus avec de l'apprentissage par renforcement [22], une méthode pour apprendre la probabilité $\pi(s, a)$ de sélectionner chaque action a dans chaque état s. Pour chacun des agents apprenants, le but de l'algorithme d'apprentissage est d'apprendre la stratégie optimale, qui maximise l'espérance des récompenses reçues.
Traditionnellement, la fonction de récompense est une fonction mathématique qui indique si l'action exécutée était bonne, i.e. un objectif à optimiser. Nous voulons utiliser le jugement symbolique calculé par les agents juges ; pour cela, la fonction de récompense agrège et transforme ces jugements en une valeur numérique. Nous décrivons d'abord les agents apprenants et le processus par lequel ils apprennent une stratégie optimale π, en mettant de côté les détails de R que nous décrirons ensuite.

3.3 Agents Apprenants

Les agents apprenants doivent apprendre comment sélectionner une action dans un état donné, afin de maximiser la récompense reçue sur l'ensemble des pas de temps. Nous utilisons l'algorithme Q-DSOM pour sa capacité à manipuler des états et actions multi-dimensionnels et continus [12]. Cet algorithme utilise deux *Dynamic Self-Organizing Map* (DSOM) [20], inspiré des Cartes Auto-Organisatrices de Kohonen [17], afin d'apprendre les espaces d'états (State-DSOM) et d'actions (Action-DSOM).
Les neurones des deux DSOMs sont liés à une Q-Table [24], de telle sorte que chaque neurone corresponde à un état ou une action discrets, i.e., une ligne ou une colonne dans la Q-Table. La Q-Table permet d'apprendre l'intérêt, ou Q-Value, d'une paire état-action, afin que l'agent puisse choisir la meilleure action pour chaque état.
Les agents peuvent donc représenter n'importe quel état ou action multi-dimensionnel et continu comme un identifiant discret via les DSOMs et utilisent la Q-Table pour déterminer l'intérêt associé. Se reporter à l'article originel [12] pour une description détaillée de l'algorithme. Un exemple est présenté dans la Figure 2.

3.4 Agents Juges

L'architecture BDI des agents juges (cf. Figure 3) s'appuie sur [13] en simplifiant le mécanisme d'évaluation morale (des travaux futurs seront dédiés à enrichir cette composante).
À chaque pas de temps, les agents juges génèrent des croyances (B) à partir de leurs perceptions de l'environnement (les mêmes que les agents apprenants) et des actions effectuées par ces apprenants. Les agents juges traitent de manière séparée chacun des composants des vecteurs réels, correspondant aux paramètres des actions. En d'autres termes, les agents juges reçoivent un ensemble d'actions

1. https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/ethics-guidelines-trustworthy-ai

©AFIA2021

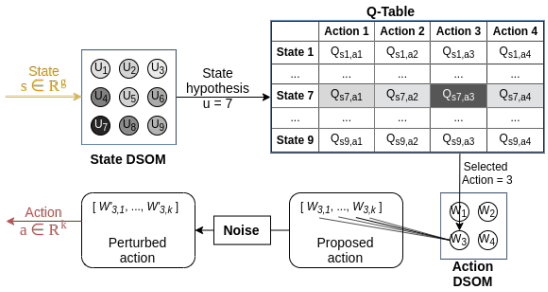


FIGURE 2 – Exemple de décision : l'agent reçoit un état, vecteur de réels, comparé à la State-DSOM. Le 7^{eme} neurone, qui a le vecteur prototype le plus proche, est choisi comme hypothèse d'état. À partir de la Q-Table et de ce 7^{eme} état, la 3^{eme} action est choisie. L'action obtenue est le résultat de la perturbation par un bruit aléatoire du vecteur associé au 3^{eme} neurone de l'Action-DSOM.

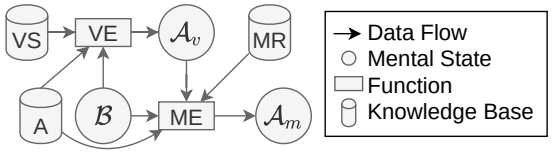


FIGURE 3 – Architecture des agents juges, adaptée d'Ethicaa [13].

$\{\forall i \in [[1,k]] : a_{l,i}\}$, tel que a_l est un vecteur de k composants et $a_{l,i}$ est le i-ème composant du vecteur, i.e., un nombre réel.

L'agent juge utilise un ensemble fixé de valeurs et des règles morales associées (VS et MR) pour déterminer si chaque composant de l'action trahit ou supporte la valeur. L'Évaluation Morale (ME) utilise les croyances générées (B) et les actions (A) pour produire une valuation morale (Am), parmi l'ensemble $V = \{moral, immoral, neutral\}$. À chaque pas de temps, le jugement par un agent juge j de l'action a_l d'un agent apprenant l est l'évaluation morale de chacun des k paramètres de cette action a_l : $Jugement_j(l) = \{i \in [[1,k]] : ME_j(B, a_{l,i})\}$. Chaque agent juge calcule un jugement différent pour chaque apprenant, de sorte que la fonction d'évaluation finale $F : L \to \left(V^k\right)^{|J|}$ retourne une liste de listes de valuations, soit $\forall l \in L : F_l = \{\forall j \in J : Jugement_j(l)\}$.

3.5 Jugement pour l'apprentissage

Dans cette section, nous faisons le lien entre les symboles (jugements et croyances) manipulés par les agents juges et les nombres réels (perceptions, actions, et récompenses) utilisés dans l'algorithme Q-DSOM.

À la fin de chaque étape de la simulation, après que les agents apprenants aient choisi leur action, les agents juges perçoivent plusieurs données et les transforment en croyances : liste des agents, les actions de chacun, les propriétés globales représentant l'état de l'environnement et les propriétés individuelles par agent.

Finalement, la fonction de récompense $R_l : S \times A_l \times S \to \mathbb{R}$ retourne un nombre réel. Plusieurs méthodes sont possibles pour transformer les valuations symboliques en une récompense numérique ; dans cette première étape, nous proposons la solution suivante. Nous transformons le jugement de chaque agent juge, i.e., une liste de valuations, en un nombre unique, en comptant le nombre de valuations *moral* et en divisant par le nombre de valuations *moral* et *immoral*, de telle sorte que les actions morales tendent vers 1, tandis que les actions immorales tendent vers 0. Comme cas spécial, si la liste ne consiste que de valuations *neutral*, nous considérons que l'action était ni bonne ni mauvaise, et nous la mettons à 0.5. La récompense finale est calculée comme la moyenne des récompenses de chaque agent juge.

On peut remarquer que cette méthode permet de résoudre de manière simple les conflits entre les agents juges ; par exemple, le premier agent juge peut juger que le premier composant de l'action est moral selon sa propre valeur morale, tandis qu'un second juge peut déterminer que ce même premier composant est immoral, en accord avec sa valeur morale (différente).

4 Expérimentations

Afin de tester la validité de notre approche, nous reprenons le cas d'application présenté dans [12] : il s'agit d'une micro-grille électrique hypothétique, dans laquelle la production d'énergie est décentralisée au lieu de reposer uniquement sur le réseau national. La grille possède une source d'électricité principale (e.g., une station hydro-électrique, ou une ferme à éoliennes) ; les utilisateurs, ou *prosumers* (producteurs-consommateurs), peuvent eux-mêmes produire une petite quantité d'énergie (e.g., via des panneaux photovoltaïques). Considérant la difficulté de stocker de grandes quantités d'énergie sur une longue période, et que la production et la demande peuvent fluctuer sur de courtes périodes, les *prosumers* peuvent échanger de l'énergie afin de ne pas la gaspiller. De tels échanges supposent une forme de coopération pour éviter les situations d'inégalité ; de manière similaire, quand la source principale est trop sollicitée, les *prosumers* doivent réduire leur consommation temporairement, et ainsi réduire leur confort, afin d'éviter des coupures.

Les simulations considèrent un ensemble de bâtiments (type habitations, bureaux et écoles ; voir la Figure 4) : la gestion de l'énergie de chaque bâtiment est prise en charge par un agent apprenant. Il doit apprendre à consommer et échanger de l'énergie pour satisfaire le besoin en confort de ses occupants, tout en considérant les intérêts des autres *prosumers* de la grille.

Nous considérons ce simulateur simplifié et l'opposition d'intérêts entre les différents participants comme étant suffisamment plausibles et un cadre intéressant pour des comportements éthiques.

4.1 Règles et Valeurs Morales

Nous avons choisi des valeurs morales à partir de la littérature des réseaux électriques intelligents [4] et traduit ces valeurs afin de refléter le point de vue de citoyens participant à un tel système, et prenant des décisions pour allouer

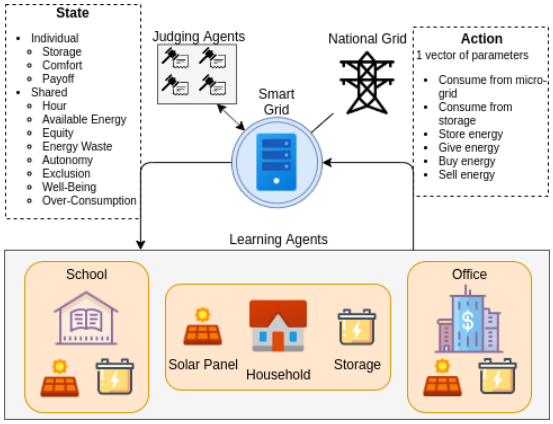


FIGURE 4 – Schéma du simulateur de *Smart Grid*. Une micro-grille, liée à la grille nationale, contient plusieurs agents représentant des bâtiments.

de l'énergie. En effet, les agents apprenants agissent en tant que mandataires pour ces *prosumers* et doivent donc soutenir les mêmes valeurs morales. Nous proposons quatre valeurs morales et les règles associées comme références communes pour tous les agents de la simulation : MR1 — Assurance de confort : une action permettant à un *prosumer* d'améliorer son confort est morale ; MR2 — Affordabilité : une action qui coûte trop cher à un *prosumer*, par rapport au budget configuré par l'utilisateur, est immorale ; MR3 — Inclusion sociale : une action qui améliore l'équité des conforts entre les *prosumers* est morale ; MR4 — Viabilité Environnementale : une action qui limite les échanges avec le réseau national est morale.

Ces règles sont partiellement en conflit : par exemple, les agents consomment de l'énergie pour satisfaire le confort des utilisateurs, en accord avec MR1, mais il n'y a pas assez d'énergie pour satisfaire tous les agents, ce qui trahit la valeur associée à MR3 ; acheter de l'énergie transgresserait MR4. En d'autres termes, chaque action implique une transgression d'au moins une règle morale, ce qui classe cette simulation comme un dilemme éthique selon la définition de Bonnemains [6].

Puisque les actions a_l sont des vecteurs de réels, le but des agents apprenants est de déterminer les bons paramètres, i.e., les composants du vecteur, afin de minimiser leur regret. En d'autres termes, la question pourrait être, par exemple, "Quelle quantité d'énergie devrais-je acheter afin de minimiser la transgression de MR4 tout en me permettant d'améliorer mon confort, en accord avec MR1 ?".

4.2 Simulateur

Le simulateur que nous utilisons est illustré dans la Figure 4 ; nous résumons ses composants ci-après.

4.2.1 Agents Apprenants

Trois profils d'agents ont été créés pour répondre aux types de bâtiment et introduire de la variété entre les agents : Habitation, Bureau et École. Chaque profil est constitué : d'un profil de consommation, i.e. la quantité d'énergie dont il a besoin à chaque heure ; d'une courbe de confort, i.e. la fonction qui calcule son confort pour une consommation et un besoin donnés ; d'une capacité d'action, e.g. la quantité maximale d'énergie qu'il peut consommer ; et d'une capacité de stockage personnelle.

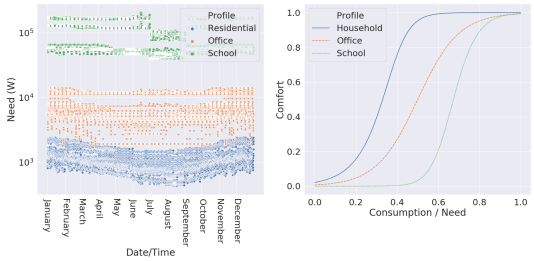


FIGURE 5 – Le besoin et le confort pour chaque profil d'agent.

Nous utilisons un jeu de données publiques de consommation d'énergie [2] comme source des profils de consommation. Trois bâtiments ont été sélectionnés : *Residential*, *Small Office* et *Primary School* ; chacun dans la même ville (Anchorage) afin de minimiser le risque de biais dans la consommation recensée, par exemple à cause d'une différence de température qui nécessiterait plus de chauffage dans une ville par rapport à une autre. Le jeu de données contient la charge horaire, i.e. la quantité d'énergie consommée par un bâtiment pour chaque heure sur une année ; tandis que le travail précédent utilisait un profil moyenné sur tous les jours de l'année (profil journalier), nous avons retenu le profil annuel complet. Les courbes de confort et le besoin en énergie par heure utilisés dans nos expérimentations sont visibles dans la Figure 5.

4.2.2 Actions

À chaque pas de temps, chaque agent apprenant effectue une action, vecteur de paramètres suivants : la quantité d'énergie consommée depuis la micro-grille, la quantité consommée depuis la batterie personnelle, l'énergie stockée dans sa batterie depuis la grille et inversement la quantité donnée de la batterie vers la micro-grille. Si la grille ne dispose pas d'assez d'énergie, l'excès est automatiquement acheté depuis la grille nationale pour éviter une coupure, mais dans ce cas l'excès est considéré comme surconsommé. L'agent peut également interagir avec la grille nationale en achetant ou vendant de l'énergie dans sa batterie personnelle.

4.2.3 Perceptions

Afin de prendre une décision, l'agent obtient l'état de l'environnement représenté par un vecteur de nombres réels. Ces perceptions incluent des données communes partagées par tous les agents : l'heure, l'énergie disponible, l'équité des conforts (calculée comme une dispersion statistique par l'index de Hoover), la quantité d'énergie non-utilisée et

2. https://openei.org/datasets/dataset/commercial-and-residential-hourly-load-profiles-for-all-tmy3-locations-in-the-united-states

©AFIA2021

donc perdue, l'autonomie (l'absence de transactions avec le réseau national), le bien-être (médiane des conforts), l'exclusion (la proportion d'agents dont le confort est inférieur à 50% du bien-être), la sur-consommation. Les agents perçoivent en plus des détails sur eux-mêmes, auxquels les autres agents n'ont pas accès : la quantité d'énergie disponible dans la batterie personnelle, le confort au pas de temps précédent, et le bénéfice obtenu en vendant et achetant de l'énergie.

4.2.4 Récompenses

Comme décrit dans notre modèle, les récompenses sont calculées à partir des jugements des agents juges. Ceux-ci sont implémentés en langage Jason [8] sur la plateforme JaCaMo [5], qui est implémentée en Java. Une API REST permet d'assurer la communication entre les agents apprenants, implémentés en Python, et les agents juges sur JaCaMo.

Nous avons implémenté quatre agents juges, un pour chacune des valeurs morales proposées, contenant des règles dans un langage pseudo-Prolog, par exemple `supporte(donne_energie(X)) :- X > 0`, qui signifie que l'action de donner une quantité X d'énergie supporte la valeur associée (dans ce cas, Viabilité Environnementale) si la quantité est positive. De manière similaire, des règles "trahit" déterminent si l'action trahit la valeur.

5 Résultats

Nous avons mené plusieurs simulations, en considérant différents paramètres. En variant le nombre d'agents apprenants, les simulations "Petit" (20 Habitations, 5 Bureaux, 1 École) et "Moyen" (80 Habitations, 19 Bureaux, 1 École) permettent d'évaluer le passage à l'échelle de notre approche. Les simulations "Journalier" utilisent le profil de consommation moyenné sur une seule journée, tandis que les simulations "Annuel" utilisent le jeu de données complet, introduisant ainsi des variations saisonnières et donc plus de difficultés pour l'apprentissage. Enfin, nous proposons sept scénarios pour la configuration des agents juges, dont quatre qui incluent un seul agent juge (nommés "mono-valeur"), un dans lequel les juges sont activés un par un à des pas de temps différents ("Incrémental"), un dans lequel les juges sont initialement tous actifs et désactivés un par un à des pas de temps différents ("Décremental") et un scénario "Défaut" dans lequel les quatre agents sont activés en permanence. Cette variété de scénarios permet de comparer la présence et l'absence de chaque règle morale, l'impact sur les autres règles, et la capacité des agents apprenants à s'adapter quand les règles évoluent au fil du temps, soit en les ajoutant soit en les enlevant. Chaque ensemble de simulations a été lancé 20 fois sur 10 000 pas de temps.

La comparaison entre les expérimentations "Petit" et "Moyen" n'a pas montré de réelle différence entre les moyennes (T-Test, p-value=0.83), ce qui indique que notre approche passe à l'échelle, bien que le temps d'exécution soit naturellement bien plus long.

Nous nous concentrons sur les scénarios "Défaut" et "Incrémental" car ils sont les plus pertinents ; les "mono-valeurs" sont utiles en tant que scénarios de contrôle pour comparer les effets d'une valeur morale sur le comportement des agents quand la valeur est isolée ou agrégée avec d'autres. Le scénario "Decrémental" montre la capacité de supprimer des règles mais n'est pas aussi intéressant que la capacité d'en ajouter (le scénario "Incrémental"). Nous nous concentrons également sur le profil "Annuel" comme il contient des variations de saisons et donc plus de difficultés.

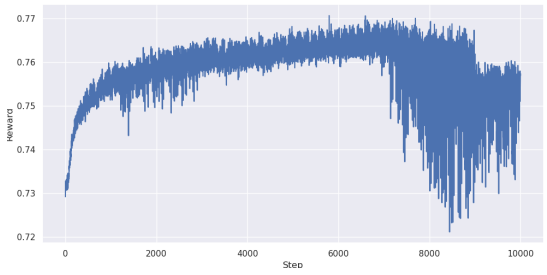


FIGURE 6 – Récompense moyenne pour tous les agents apprenants, sur chaque pas de temps, dans les simulations "Petit - Annuel - Défaut".

La figure 6 montre que la récompense moyenne augmente au fur et à mesure de la simulation, bien que l'augmentation pourrait être plus importante ; la méthode proposée est donc efficace et les agents apprenants sont capables de se conformer aux règles données. Toutefois, les récompenses chutent vers la fin de la simulation, en grande partie à cause de la récompense d'"Inclusion", qui semble plus difficile à apprendre. Il n'est pas clair s'il s'agit d'un problème lié à l'algorithme d'apprentissage ou à l'implémentation proposée des règles morales. Nous remarquons que la valeur d'"Inclusion" est celle avec le plus grand nombre de règles implémentées ; peut-être que cela est lié à son apparente difficulté d'apprentissage.

De plus, la Figure 7 montre que les agents ont été capables d'apprendre la valeur de "Viabilité Environnementale", et en particulier quand ils ne disposaient que de la récompense agrégée, bien que la variation n'était pas aussi importante que quand ils disposaient spécifiquement de cette valeur comme récompense. Il est intéressant de noter que la comparaison entre "Défaut" et "Incrémental" montre que l'addition un par un des Juges semble mitiger l'impact négatif d'"Inclusion". Les agents sont encore capables d'apprendre la "Viabilité Environnementale" et performent légèrement mieux sur l'"Inclusion".

Selon ces figures, les agents *Écoles* ont eu les plus grandes variations dans les récompenses, tandis que les *Habitations* et *Bureaux* avaient une augmentation plus stable. Ce n'est pas surprenant, car les agents *École* ont la plus grande capacité d'action et ont donc un impact plus important sur l'environnement.

6 Discussion

Pour rappel, notre contribution est une nouvelle méthode pour apprendre des "comportements éthiques", i.e. des

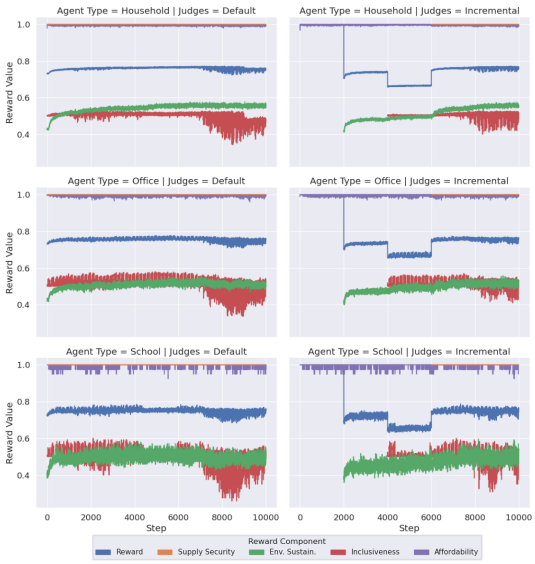


FIGURE 7 – Comparaison entre les récompenses individuelles de chaque agent apprenant, au fil des pas de temps, moyennées sur les simulations “Petit - Annuel - Défaut” et “Petit - Annuel - Incrémental”, et sur les agents de même profil. La courbe “Récompense” est la moyenne des quatre composantes.

comportements qui exhibent une ou plusieurs valeurs morales et qui seraient considérés comme éthiques d’un point de vue humain, en utilisant des jugements symboliques comme sources de récompenses pour les agents apprenants dans un système multi-agent. Nous avons évalué cette approche sur un problème de répartition d’énergie, dans un contexte de *Smart Grid* simulé. Les expérimentations menées et en cours servent de preuve de concept pour montrer l’intérêt de notre approche.

Par rapport à la littérature existante, cette approche offre plusieurs avantages. Tout d’abord, il est important de noter que l’acceptation courante de la société sur l’éthique peut évoluer au fil du temps ; ainsi, les approches qui visent l’“éthique par conception” doivent considérer la capacité du système à s’adapter à des règles changeantes. Cet aspect n’a pas été extensivement étudié, y compris parmi les travaux se focalisant sur l’apprentissage ; dans cet article, nous avons montré grâce aux scénarios “Incrémental” et “Décrémental” la capacité de nos agents à s’adapter à l’ajout ou la suppression de règles. Cela est particulièrement visible en se comparant au travail de *reward-shaping* discuté précédemment [25] : si le comportement exemple n’est plus en accord avec le comportement attendu, il leur serait probablement nécessaire de re-créer un nouveau jeu de données et d’entraîner l’agent depuis zéro. Dans notre cas, nous pouvons simplement ajouter ou supprimer les règles. Toutefois, un avantage de leur approche est qu’ils supposent une récompense éthique qui n’est pas spécifique à la tâche, tandis que nos règles morales sont spécifiques aux domaines. Il serait peut-être possible d’implémenter des règles morales plus génériques, toutefois cela requiert l’existence de telles règles ; une possible source d’inspiration peut être les nombreux principes directeurs proposés sur *Ethical AI* ou *Responsible AI* [21].

Les précédents cas d’applications pour des “agents éthiques” étaient limités à des actions discrètes (e.g., dilemmes tel que le Dilemme du Tramway [23], robot accompagnant, [2], soldats robots [3], gestion autonome d’actifs en bourse [14]). Ces travaux sont importants mais il existe de nombreuses situations requérant de plus fines actions ; il est ainsi importer de proposer et d’expérimenter sur des environnements avec actions continues tel que le simulateur utilisé ici.

Certains travaux proposent d’utiliser des méthodes de vérification formelle pour garantir la conformité aux règles morales dans n’importe quelle situation identifiée [11, 7]. Dans notre cas, l’introduction d’agents apprenants nuit à cette possibilité ; il existe toutefois des travaux qui tentent d’appliquer de la vérification formelle à des algorithmes d’apprentissage par renforcement [16].

Ce travail cible les considérations “par conception”, mais il y a également d’autres implications à l’éventuelle intégration d’un tel système dans la société. En effet, nous pouvons noter au moins un impact positif et un négatif : d’un côté, l’utilisation de règles symboliques est supposée plus facile à comprendre qu’une fonction mathématique. Toutefois, l’intelligibilité n’était pas l’objectif principal de ce travail et n’était pas évaluée par nos expérimentations. Nous pensons que l’intelligibilité du processus de récompense est cruciale, en particulier pour de la supervision humaine, que ce soit par les concepteurs du système ou des régulateurs externes. Il s’agit ainsi d’un point important à considérer et améliorer dans de futurs travaux.

D’un autre côté, les jugements nécessitent de nombreuses données sur les agents apprenants, e.g. leurs actions, leurs perceptions, ce qui entrave leur vie privée. Il pourrait être possible de limiter les données échangées en offrant des jugements limités, ou d’anonymiser les données pour que les juges ne puissent pas identifier les agents. Dans cet article, nous avons simplement considéré que les données étaient librement accessibles.

Notre approche a toutefois quelques limites. Premièrement, les règles morales utilisées servent de preuve de concept pour montrer l’intérêt de notre approche hybride, mais il serait intéressant d’étendre les agents juges et leurs règles afin de juger des situations plus complexes. Deuxièmement, la méthode utilisée pour transformer les jugements symboliques en récompense numérique par association des symboles à des nombres pour prendre la moyenne permet de facilement résoudre les conflits entre règles, mais d’autres méthodes sont possibles, en particulier un mécanisme d’argumentation entre juges de sorte à établir une priorité entre les règles selon le contexte. Par exemple, imaginons le cas où un hôpital est en manque crucial d’énergie, la règle interdisant l’achat d’énergie selon la valeur de Viabilité Environnementale pourrait être mise de côté dans ce cas précis.

©AFIA2021

Remerciements

Ce travail a été financé par la Région Auvergne Rhônes-Alpes (AURA), au sein du projet Ethics.AI (Pack Ambition Recherche). Les auteurs remercient leurs partenaires dans ce projet.

Références

[1] Colin Allen, Iva Smit, and Wendell Wallach. Artificial Morality : Top-down, Bottom-up, and Hybrid Approaches. *Ethics and Information Technology*, 7(3) :149–155, September 2005.

[2] Michael Anderson, Susan Leigh Anderson, and Vincent Berenz. A value-driven eldercare robot : Virtual and physical instantiations of a case-supported principle-based behavior paradigm. *Proc. IEEE*, 107(3) :526–540, 2019.

[3] Ronald C Arkin, Patrick D Ulam, and Brittany Duncan. An ethical governor for constraining lethal action in an autonomous system. Technical report, Georgia Institute of Technology, 2009.

[4] Anne Boijmans. The Acceptability of Decentralized Energy Systems. Master's thesis, Delft University of Technology, July 2019.

[5] Olivier Boissier, Rafael Bordini, Fred Hübner, Jomi, and Alessandro Ricci. *Multi-Agent Oriented Programming : Programming Multi-Agent Systems Using JaCaMo*. The MIT Press, 2020.

[6] Vincent Bonnemains. *Formal ethical reasoning and dilemma identification in a human-artificial agent system.* PhD thesis, Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse, France, 2019.

[7] Grégory Bonnet, Bruno Mermet, and Gaële Simon. Vérification formelle et éthique dans les sma. In *JFSMA*, pages 139–148, 2016.

[8] Rafael H Bordini, Jomi Fred Hübner, and Michael Wooldridge. *Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason*, volume 8. John Wiley & Sons, 2007.

[9] Rafael H Bordini, Amal El Fallah Seghrouchni, Koen Hindriks, Brian Logan, and Alessandro Ricci. Agent programming in the cognitive era. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 34, 2020.

[10] Michael Bosello and Alessandro Ricci. From programming agents to educating agents–a jason-based framework for integrating learning in the development of cognitive agents. In *International Workshop on Engineering Multi-Agent Systems*, pages 175–194. Springer, 2019.

[11] Paul Bremner, Louise A Dennis, Michael Fisher, and Alan F Winfield. On proactive, transparent, and verifiable ethical reasoning for robots. *Proceedings of the IEEE*, 107(3) :541–561, 2019.

[12] Rémy Chaput, Olivier Boissier, Mathieu Guillermin, and Salima Hassas. Apprentissage adaptatif de comportements éthiques. In *28e Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'2020)*. Cépaduès, 2020.

[13] Nicolas Cointe, Grégory Bonnet, and Olivier Boissier. Jugement éthique dans les systèmes multi-agents. In *JFSMA*, pages 149–158, 2016.

[14] Nicolas Cointe, Grégory Bonnet, and Olivier Boissier. Multi-agent based ethical asset management. In *1st Workshop on Ethics in the Design of Intelligent Agents*, pages 52–57, 2016.

[15] Virginia Dignum. *Responsible Artificial Intelligence : How to Develop and Use AI in a Responsible Way*. Springer Nature, 2019.

[16] Nathan Fulton and André Platzer. Safe reinforcement learning via formal methods : Toward safe control through proof and learning. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, volume 32, 2018.

[17] Teuvo Kohonen. Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks*, 37 :52–65, 2013.

[18] James H Moor. The nature, importance, and difficulty of machine ethics. *IEEE intelligent systems*, 21(4) :18–21, 2006.

[19] Shelley Nason and John E Laird. Soar-rl : Integrating reinforcement learning with soar. *Cognitive Systems Research*, 6(1) :51–59, 2005.

[20] Nicolas P. Rougier and Yann Boniface. Dynamic self-organising map. *Neurocomputing*, 74(11) :1840–1847, 2011.

[21] Daniel Schiff, Justin Biddle, Jason Borenstein, and Kelly Laas. What's next for ai ethics, policy, and governance ? a global overview. In *Proceedings of the AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society*, pages 153–158, 2020.

[22] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto. Reinforcement learning : An introduction. *IEEE Trans. Neural Networks*, 9(5) :1054–1054, 1998.

[23] Judith Jarvis Thomson. Killing, letting die, and the trolley problem. *The Monist*, 59(2) :204–217, 1976.

[24] Christopher J. C. H. Watkins and Peter Dayan. Q-learning. *Machine Learning*, 8(3) :279–292, May 1992.

[25] Yueh-Hua Wu and Shou-De Lin. A low-cost ethics shaping approach for designing reinforcement learning agents. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, volume 32, 2018.

[26] Han Yu, Zhiqi Shen, Chunyan Miao, Cyril Leung, Victor R. Lesser, and Qiang Yang. Building ethics into artificial intelligence. In *Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, IJCAI'18, pages 5527–5533, Stockholm, Sweden, July 2018. AAAI Press.

Systèmes de preuve pour les logiques de "Bringing-it-About" *

Tiziano Dalmonte[1,2], Charles Grellois[2], Nicola Olivetti[2]

[1] TU Wien, Autriche
[2] Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, LIS, Marseille, France

tiziano@logic.at
charles.grellois@lis-lab.fr
nicola.olivetti@lis-lab.fr

Résumé

La logique dite de Bringing-it-About ("faire en sorte que") a été introduite par Elgesem en 1997 pour modéliser ce qu'un agent fait (brings about) et ce qu'un agent peut faire (can bring about). La logique contient deux familles de modalités indexées par les agents. Nous introduisons une nouvelle sémantique de voisinages, particulièrement adaptée à la construction de contre-modèles. Nous définissons un calcul d'hyperséquents qui permet de donner une procédure de décision et permet la construction effective de contre-modèles.

Mots-clés

Logique de bringing-it-about, logique d'Elgesem, sémantique à voisinages doubles, calculs d'hyperséquents, extraction de contre-modèles

Abstract

The logic of Bringing-it-About was introduced by Elgesem to formalise the notions of agency and capability. It contains two families of modalities indexed by agents, the first one expressing what an agent brings about (does), and the second expressing what she can *bring about (can do). We introduce a new neighbourhood semantics, which is well-suited for countermodel construction. We introduce a hypersequent calculus for this logic, which leads to a decision procedure allowing for a practical countermodel extraction.*

Keywords

Bringing-it-About logic, Elgesem logic, bineighbourhood semantics, hypersequent calculi, countermodel construction

Note. *Cet article est une version abrégée, et traduite en français, d'un travail présenté à DEON 2020-2021 [3].*

1 Introduction

La logique de "Bringing-It-About" (*faire en sorte que*) a été définie par Elgesem [6]. Elle propose une modélisation des actions d'un ensemble d'agents : un agent effectue une action (il *fait en sorte que* cette action ait lieu), ou il peut être en capacité de la faire (il *peut faire en sorte que* cette action ait lieu). Le système logique introduit par Elgesem contient ainsi deux modalités [1] $\mathbb{E}_i$ et $\mathbb{C}_i$, indexées par un agent i. La première exprime l'*effectivité*, c'est-à-dire le fait qu'un agent fait en sorte qu'un évènement se produise : $\mathbb{E}_{Lucie}\ VirementBancaire$ signifie ainsi que Lucie fait un virement bancaire. La seconde exprime la *capacité* à agir : $\mathbb{C}_{Lucie}\ VirementBancaire$ modélise le fait que Lucie *peut* effectuer un virement bancaire.

La logique d'Elgesem vise ainsi à capturer les notions d'effectivité (un agent fait en sorte qu'une action se produise) et de capacité (un agent peut faire en sorte qu'une action ait lieu), sans utiliser de notion temporelle ou de modélisation par des jeux. Cette logique définit ainsi un cadre logique succint pour étudier les notions d'effectivité et de capacité, cadre qui est devenu une référence, notamment par sa simplicité relativement à d'autres logiques, telles que par exemple les logiques STIT [2, 8]. La logique d'Elgesem permet naturellement d'exprimer des notions de *responsabilité* et de formaliser les notions de contrôle, de pouvoir, et de délégation. La phrase "Sarah empêche Lucie de faire un virement bancaire" se représente ainsi, très simplement, par la formule $\mathbb{E}_{sarah}\neg\mathbb{E}_{lucie}\ VirementBancaire$. L'utilisation conjointe de modalités déontiques permet d'exprimer simplement, entre autres, la notion d'obligation (l'agent est obligé d'effectuer une action).

Elgesem a proposé une axiomatisation de sa logique et une sémantique (presque équivalente) basée sur des modèles de fonctions de sélection. Remarquons que la notion de capacité modélisée est assez faible, puisque ses seuls axiomes sont (i) que l'effectivité implique la capacité : $\mathbb{E}_i A \to \mathbb{C}_i A$ et (ii) $\neg\mathbb{C}_i\top$, ce qui exprime le fait qu'un agent i ne peut pas effectuer une action correspondant à une tautologie ; en miroir, Elgesem pose l'axiome $\neg\mathbb{E}_i\top$: un agent ne peut pas faire quelque chose qui se produira même sans lui, quel que soit son niveau d'investissement et de responsabilité relativement à cette action.

L'étude de la logique d'Elgesem a été poursuivie par Governatori et Rotolo [7]. Ils ont proposé une sémantique alterna-

*Ce travail a été partiellement financé par le projet ANR TICAMORE ANR-16-CE91-0002-01. La recherche de Dalmonte à TU Wien est financée par une bourse Ernst Mach gérée par OeAD et financée par BMBWF.

1. Ces notations ne sont pas celles utilisées originellement par Elgesem.

©AFIA2021

tive utilisant des modèles de voisinages. Dans leur sémantique, les modèles contiennent deux fonctions de voisinage, une pour chacun des opérateurs $\mathbb{E}_i$ et $\mathbb{C}_i$; ces fonctions donnent (pour chaque agent i) les propositions, identifiées à leurs ensembles de vérité, que les agents font (effectivité) ou peuvent faire (capacité). Governatori et Rotolo prouvent également que la sémantique d'Elgesem valide l'axiome additionnel $\neg\mathbb{C}_i\bot$, qui signifie qu'un agent ne peut pas être en mesure de réaliser une contradiction.

Là où la sémantique de la logique d'Elgesem a été étudiée en détails, la théorie de la preuve de cette logique n'a été que très peu explorée : le seul système de preuve connu pour la logique d'Elgesem a été proposé par Lellmann [9]. Il n'y a, en particulier, aucun système de preuve à ce jour qui relie la syntaxe à la sémantique : aucun système de preuves ne permet de construire de contre-modèles pour les formules invalides.

Le but de cet article est précisément de combler cette lacune. Dans ce but, nous proposons une sémantique alternative de la logique d'Elgesem : nous considérons des modèles à voisinages doubles, une variante des modèles de voisinages donnés par Governatori et Rotolo [7]. Comme les modèles de Governatori et Rotolo, nos modèles contiennent, pour chaque agent i, deux fonctions de voisinage correspondant aux opérateurs $\mathbb{E}_i$ et $\mathbb{C}_i$. Mais ces fonctions diffèrent par le fait qu'elles assignent à chaque monde un ensemble de *couples* de voisinages (α, β). Intuitivement, un couple (α, β) s'interprète comme suit : étant donné une proposition A représentant le résultat d'une action d'un agent i, les deux composantes de la paire représentent (de façon indépendante) un ensemble de situations α permettant à i d'effectuer A, et de situations β empêchant i de réaliser A. Les paires (α, β) peuvent être vues comme des bornes inférieures et supérieures approximant les propositions qu'un agent effectue ou est en capacité d'effectuer. Il est à noter qu'un modèle à voisinages doubles peut être transformé en un modèle de voisinages standard, et que la transformation inverse est également possible. L'avantage de la sémantique à voisinages doubles est qu'elle permet de calculer des contre-modèles des formules invalides bien plus aisément, et directement, que la sémantique à voisinages usuelle car elle permet d'éviter le calcul exact des ensembles de vérité des formules.

Nous passons ensuite à la théorie de la preuve en proposant un calcul d'hyperséquents. On peut voir un hyperséquent comme une disjonction de séquents usuels. La structure d'hyperséquent n'est pas strictement nécessaire à l'obtention d'un calcul complet (comme Lellmann le remarque dans [9]), mais elle permet la définition d'un calcul dans lequel les règles sont inversibles. Ceci n'est pas le cas dans le calcul de séquents de Lellmann [9]. Cette inversibilité des règles permet d'extraire d'*un seul* hyperséquent invalide, apparaissant comme feuille d'*un seul* arbre de dérivation, un contre-modèle de la formule considérée dans la sémantique à voisinages doubles. Cela implique que notre calcul d'hyperséquents ne donne pas seulement une procédure de décision pour la logique d'Elgesem : il offre également la première procédure pratique de construction de contre-modèles pour cette logique. Remarquons que la construction directe de contre-modèles à partir de séquents usuels est impossible : comme les règles ne sont pas inversibles, il ne suffit pas d'une dérivation qui échoue pour invalider la prouvabilité d'un séquent, mais il faut essayer et analyser toutes les dérivations possibles.

Le calcul d'hyperséquents a également de bonnes propriétés relativement à la théorie de la preuve. Une preuve syntaxique de l'élimination des coupures est possible, et implique la complétude vis-à-vis de l'axiomatisation.

2 Sémantique à voisinages doubles pour la logique d'Elgesem

Dans cette section, nous présentons tout d'abord la logique d'effectivité et de capacité d'Elgesem, que nous notons **ELG**. Nous définissons ensuite des modèles à voisinages doubles pour cette logique.

Soit $\mathcal{A} = \{a, b, c, ...\}$ un ensemble d'agents, la logique **ELG** est alors définie à partir d'un langage propositionnel $\mathcal{L}_{Elg}$ contenant, pour chaque $i \in \mathcal{A}$, deux modalités unaires $\mathbb{E}_i$ et $\mathbb{C}_i$, appelées respectivement modalité d'*effectivité* et de *capacité*. Les formules de $\mathcal{L}_{Elg}$ sont définies par la grammaire suivante :

$$A \quad := \quad p \mid \bot \mid \top \mid \neg A \mid A \wedge B \mid A \vee B \mid A \to B \\ \mid \mathbb{E}_i A \mid \mathbb{C}_i A$$

où $\mathbb{E}_i A$ et $\mathbb{C}_i A$ signifient respectivement que "l'agent i fait en sorte que A survienne", et "l'agent i est en capacité de réaliser l'action A".

La logique **ELG** est définie en étendant la logique classique propositionnelle (formulée dans le langage $\mathcal{L}_{Elg}$) avec les axiomes modaux et les règles donnés en Figure 1.[2] Remarquons que $\neg\mathbb{E}_i\bot$ et $\neg\mathbb{E}_i\top$ sont dérivables dans la logique **ELG**. En revanche, les axiomes C et T ne valent que pour la modalité $\mathbb{E}$. Ceci signifie, pour le premier axiome, que si un agent réalise deux actions, alors il peut réaliser les deux à la fois ; le second axiome exprime le fait que si un agent effectue A, alors A est vrai. Observons que la condition C ne s'applique pas à l'opérateur de capacité $\mathbb{C}$: en effet, si l'agent peut faire A et B, on ne peut en déduire qu'il peut faire à la fois A et B. Par exemple, avec 1€50, je suis en capacité d'acheter un café ou un croissant, mais pas les deux.

Des caractérisations sémantiques de la logique **ELG** existent. Elgesem [6] en donne une à l'aide de fonctions de sélection, et Governatori et Rotolo [7] utilisent pour leur part des modèles de voisinages, en utilisant deux fonctions de voisinages différentes pour les modalités $\mathbb{E}$ et $\mathbb{C}$. Nous proposons ici une sémantique alternative, utilisant les modèles à voisinages doubles [5]. Après avoir défini cette sémantique alternative, nous expliquerons ses avantages pour l'extraction de contre-modèles.

2. Une variante de la logique d'Elgesem ne contenant pas l'axiome $P_{\mathbb{C}}$ est étudiée dans [7, 9]. Tous les résultats présentés dans cet article peuvent être étendus à cette variante en ôtant la règle correspondant à cet axiome dans le calcul, et la condition sémantique correspondante dans les modèles à voisinages doubles.

$\mathrm{RE}_{\mathbb{E}}$	$\dfrac{A \leftrightarrow B}{\mathbb{E}_i A \leftrightarrow \mathbb{E}_i B}$	$\mathrm{RE}_{\mathbb{C}}$	$\dfrac{A \leftrightarrow B}{\mathbb{C}_i A \leftrightarrow \mathbb{C}_i B}$
$\mathrm{C}_{\mathbb{E}}$	$\mathbb{E}_i A \wedge \mathbb{E}_i B \rightarrow \mathbb{E}_i(A \wedge B)$	$\mathrm{Q}_{\mathbb{C}}$	$\neg\mathbb{C}_i \top$
$\mathrm{T}_{\mathbb{E}}$	$\mathbb{E}_i A \rightarrow A$	$\mathrm{P}_{\mathbb{C}}$	$\neg\mathbb{C}_i \bot$
$\mathrm{Int}_{\mathbb{EC}}$	$\mathbb{E}_i A \rightarrow \mathbb{C}_i A$		

FIGURE 1 – Axiomes modaux et règles de la logique d'Elgesem **ELG**.

Définition 1 *Un* modèle à voisinages doubles *pour* **ELG** *est un quadruplet* $\mathcal{M} = \langle \mathcal{W}, \mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}, \mathcal{N}_i^{\mathbb{C}}, \mathcal{V} \rangle$*, où* $\mathcal{W}$ *est un ensemble non vide,* $\mathcal{V}$ *est une fonction de valuation, et, pour chaque agent* i*,* $\mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}$ *et* $\mathcal{N}_i^{\mathbb{C}}$ *sont deux fonctions à voisinages doubles* $\mathcal{W} \longrightarrow \mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathcal{W}) \times \mathcal{P}(\mathcal{W}))$ *satisfaisant les conditions suivantes :*

($\mathrm{C}_{\mathbb{E}}$) *Si* $(\alpha, \beta), (\gamma, \delta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(w)$, *alors* $(\alpha \cap \gamma, \beta \cup \delta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(w)$.
($\mathrm{T}_{\mathbb{E}}$) *Si* $(\alpha, \beta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(w)$, *alors* $w \in \alpha$.
($\mathrm{Q}_{\mathbb{C}}$) *Si* $(\alpha, \beta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{C}}(w)$, *alors* $\beta \neq \emptyset$.
($\mathrm{P}_{\mathbb{C}}$) *Si* $(\alpha, \beta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{C}}(w)$, *alors* $\alpha \neq \emptyset$.
($\mathrm{Int}_{\mathbb{EC}}$) $\mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(w) \subseteq \mathcal{N}_i^{\mathbb{C}}(w)$.

La relation de forcing $\Vdash$ *est définie de la manière usuelle pour les formules atomiques et les connecteurs booléens. Pour les formules dont le connecteur principal est* $\mathbb{E}$ *ou* $\mathbb{C}$*, le forcing est définit comme suit :*

$$\mathcal{M}, w \Vdash \mathbb{E}_i A$$
ssi
il existe $(\alpha, \beta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(w)$ *tel que*
pour tout $v \in \alpha$, $\mathcal{M}, v \Vdash A$,
et pour tout $u \in \beta$, $\mathcal{M}, u \nVdash A$.

$$\mathcal{M}, w \Vdash \mathbb{C}_i A$$
ssi
il existe $(\alpha, \beta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{C}}(w)$ *tel que*
pour tout $v \in \alpha$, $\mathcal{M}, v \Vdash A$,
et pour tout $u \in \beta$, $\mathcal{M}, u \nVdash A$.

Notons $[\![A]\!]$ l'ensemble $\{v \mid \mathcal{M}, v \Vdash A\}$, alors les clauses ci-dessus peuvent être réécrites comme suit : $\mathcal{M}, w \Vdash \mathbb{E}_i A$ si et seulement s'il existe $(\alpha, \beta) \in \mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(w)$ tel que $\alpha \subseteq [\![A]\!]$ et $\beta \subseteq [\![\neg A]\!]$. De même pour les formules dont le connecteur principal est $\mathbb{C}$. Nous suivons la convention usuelle, et n'indiquons pas le modèle $\mathcal{M}$ lorsque le contexte suffit à le retrouver. Nous écrivons alors simplement $w \Vdash A$.
La principale raison d'être de la sémantique à voisinages doubles est la simplicité qu'elle offre pour extraire des contre-modèles à partir de preuves qui échouent. Dans la sémantique de voisinages usuelle, l'ensemble des mondes où A est vraie doit appartenir exactement à $\mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(w)$ pour que w satisfasse $\mathbb{E}_i A$. En revanche, dans la sémantique à voisinages doubles, il suffit de trouver un couple (α, β) tel que $\alpha \subseteq [\![A]\!]$ et que $\beta \subseteq [\![\neg A]\!]$. Le point crucial est donc le suivant : pour trouver des contre-modèles dans la sémantique à voisinages doubles, il n'est pas nécessaire de calculer exactement les ensembles de mondes où les formules sont vraies, ce qui est délicat si l'on s'appuie seulement sur l'information *partielle* que donne une preuve qui a échoué. De plus, la sémantique à voisinages doubles permet également d'expliquer l'effectivité et la capacité en termes de conditions permettant la réalisation d'actions, ou les empêchant. Ces conditions sont représentées respectivement par les éléments α et β des couples apparaissant dans la sémantique à voisinages doubles. Les conditions ($\mathrm{P}_{\mathbb{C}}$) et ($\mathrm{Q}_{\mathbb{C}}$), i.e. $\alpha \neq \emptyset$ et $\beta \neq \emptyset$, correspondent respectivement au fait qu'il n'est pas possible de réaliser une contradiction, ni une tautologie : il doit toujours y avoir un moyen de réaliser ou d'empêcher une action. Remarquons aussi que la validité de $\neg\mathbb{E}_i \top$ et de l'axiome $\mathrm{T}_{\mathbb{E}}$ impliquent que les formules de la forme $\mathbb{E}_i A$ ne sont jamais valides dans les modèles de la logique **ELG** : ceci caractérise sémantiquement le fait qu'une action doit toujours pouvoir être évitée.

Théorème 1 (Caractérisation) *A est dérivable dans* **ELG** *si et seulement si elle est valide dans tous les modèles à voisinages doubles de la logique* **ELG**.

Un modèle à voisinages doubles pour **ELG** peut être transformé en modèle de voisinages pour cette même logique en suivant la transformation décrite dans [4, 5].

Proposition 1 (Transformation de modèles) *Soit* $\mathcal{M}_{bi} = \langle \mathcal{W}, \mathcal{N}_{bi}, \mathcal{V} \rangle$ *un modèle à voisinages doubles de* **ELG**, *et* $\mathcal{M}_n = \langle \mathcal{W}, \mathcal{N}_n, \mathcal{V} \rangle$ *le modèle de voisinages défini en considérant les mêmes* $\mathcal{W}$ *et* $\mathcal{V}$ *et en posant, pour tout* $w \in \mathcal{W}$*,*

$$\mathcal{N}_n(w) = \{\gamma \subseteq \mathcal{W} \mid \text{il existe } (\alpha, \beta) \in \mathcal{N}_b(w) \text{ tel que } \alpha \subseteq \gamma \subseteq \mathcal{W} \setminus \beta\}.$$

Alors, pour tout $A \in \mathcal{L}$ *et tout* $w \in \mathcal{W}$, $\mathcal{M}_n, w \Vdash A$ *si et seulement si* $\mathcal{M}_{bi}, w \Vdash A$.

Ainsi que le montre la transformation ci-dessus, les modèles à voisinages doubles sont en général décrits par des fonctions plus petites que celles obtenues pour les modèles de voisinages correspondants. Cela provient du fait que toute paire de voisinages (α, β) – dont on peut considérer les éléments comme des bornes inférieures et supérieures de voisinages – peuvent valider plus d'une formule modale.

3 Calcul d'hyperséquents

Nous nous intéressons maintenant à la théorie de la preuve pour la logique **ELG**. A notre connaissance, la seule étude de la logique d'Elgesem considérant la théorie de la preuve a été menée par Lellman [9], qui définit un calcul de séquents sans coupures. Nous définissons ici un calcul d'hyperséquents [1] en suivant la méthodologie proposée dans

©AFIA2021

[4], qui permet la définition de calculs pour les logiques modales non-normales. Notre calcul contient, en plus de la structure d'hyperséquents, des *blocs* qui permettent de collecter les formules dont les connecteurs principaux sont $\mathbb{E}$ et $\mathbb{C}$.
L'utilisation combinée d'hyperséquents et de blocs est essentiellement motivée, comme nous allons le voir dans la suite, par le fait que cela permet de construire aisément des contre-modèles pour les formules non dérivables. Les blocs permettent également d'encoder simplement (et analytiquement) les relations entre les modalités $\mathbb{E}$ et $\mathbb{C}$. Commençons par quelques définitions.

Définition 2 ***(Bloc, séquent, hyperséquent)*** *Un* bloc *est une structure $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}}$ ou $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{C}}$, où i est un agent, et Σ un multiensemble de formules de $\mathcal{L}_{Elg}$. Un* séquent *est un couple $\Gamma \Rightarrow \Delta$, où Γ est un multiensemble de formules et de blocs, et Δ est un multiensemble de formules. Nous notons* $\mathsf{set}(\Gamma)$ *le* support *du multiensemble Γ, i.e. l'ensemble de ses éléments sans multiplicités. Un* hyperséquent *est un multiensemble de séquents $S_1, ..., S_n$, noté $S_1 \mid ... \mid S_n$: nous appelons $S_1, ..., S_n$ les* composants *de l'hyperséquent.*

Définition 3 ***(Interprétation des formules)*** *Les séquents sont interprétés comme des formules de la logique* $\mathbf{ELG}$ *comme suit :*

$$i(A_1, ..., A_n, \langle\Sigma_1\rangle_{a_1}^{\mathbb{E}}, ..., \langle\Sigma_m\rangle_{a_m}^{\mathbb{E}}, \langle\Pi_1\rangle_{b_1}^{\mathbb{C}}, ..., \langle\Pi_k\rangle_{b_k}^{\mathbb{C}} \Rightarrow B_1, ..., B_\ell)$$
$$=$$
$$\textstyle\bigwedge_{i\leq n} A_i \wedge \bigwedge_{j\leq m} \mathbb{E}_{a_j} \bigwedge \Sigma_j \wedge \bigwedge_{s\leq k} \mathbb{C}_{a_s} \bigwedge \Pi_s \rightarrow \bigvee_{t\leq \ell} B_t.$$

Définition 4 ***(Interprétation sémantique)*** *Un séquent S est* valide *dans un modèle à voisinages doubles $\mathcal{M}$, ce que l'on note $\mathcal{M} \models S$, si pour tout $w \in \mathcal{M}$, $\mathcal{M}, w \Vdash i(S)$. Un hyperséquent H est* valide *dans $\mathcal{M}$, ce que l'on note $\mathcal{M} \models H$, si $\mathcal{M} \models S$ pour un séquent $S \in H$.*

Les règles du calcul d'hyperséquents $\mathbf{HS_{ELG}}$ sont données Fig. 2. Nous les exprimons de façon cumulative : les formules principales ou les blocs sont recopiés dans les prémisses. On peut ainsi extraire un contre-modèle à partir d'un seul séquent saturé. Les règles propositionnelles sont simplement une traduction en hyperséquents des règles ordinaires du calcul des séquents. Nous omettons les règles pour $\neg$, $\vee$, et $\rightarrow$, qui sont définies de façon standard. Suivant la coutume, les séquents initiaux init sont restreints aux variables propositionnelles. On peut cependant aisément constater que $G \mid A, \Gamma \Rightarrow \Delta, A$ est dérivable pour tout A. Comme pour les connecteurs propositionnels, les formules dont le connecteur principal est $\mathbb{E}$ ou $\mathbb{C}$ sont introduites à gauche ou à droite par des règles différentes. Les règles $\mathsf{R}_{\mathbb{E}}$ et $\mathsf{R}_{\mathbb{C}}$ ont de multiples prémisses, mais leur nombre est contraint par la cardinalité des blocs principaux $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}}$ et $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{C}}$. Il y a dans le calcul, pour tout axiome de $\mathbf{ELG}$, une règle qui lui correspond. Les blocs ont un rôle crucial dans la définition des règles modales. Remarquons en particulier que les blocs pour $\mathbb{E}$ peuvent être fusionnés par la règle $\mathsf{C}_{\mathbb{E}}$, mais qu'il n'y a pas de règle similaire pour les blocs pour $\mathbb{C}$. Notons cependant qu'il est possible, après la création de blocs potentiellement complexes pour $\mathbb{E}$, de les convertir en blocs pour $\mathbb{C}$. Nous donnons un exemple de dérivation dans le calcul $\mathbf{HS_{ELG}}$ en Figure 3.

Proposition 2 (Adéquation) *Si H est dérivable dans le calcul $\mathbf{HS_{ELG}}$, alors il est valide dans tous les modèles à voisinages doubles de* $\mathbf{ELG}$.

Nous étudions maintenant les propriétés structurelles de notre calcul, et montrons en particulier qu'il est complet pour l'axiomatisation. Il est à remarquer que la preuve de complétude est purement syntaxique, et qu'elle est à ce titre indépendante du choix d'une sémantique spécifique. Cette preuve requiert, comme c'est usuellement le cas, l'admissibilité de la règle de coupure, que nous définissons ainsi :

$$\mathsf{cut}\ \frac{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta, A \qquad G \mid A, \Gamma \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta}$$

Ceci signifie que lorsque les prémisses de cut sont dérivables, sa conclusion l'est également. L'admissibilité de la coupure dépend à son tour de l'admissibilité des règles structurelles d'affaiblissement et de contraction. Pour ce calcul d'hyperséquents, on peut les formuler de façon interne ou externe, comme suit :

Proposition 3 (Règles structurelles) *Soit ϕ une formule A ou un bloc $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}}$ ou $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{C}}$. Alors les règles suivantes sont admissibles dans* $\mathbf{HS_{ELG}}$ *:*

$$\mathsf{Lwk}\ \frac{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta}{G \mid \phi, \Gamma \Rightarrow \Delta} \qquad \mathsf{Lctr}\ \frac{G \mid \phi, \phi, \Gamma \Rightarrow \Delta}{G \mid \phi, \Gamma \Rightarrow \Delta}$$

$$\mathsf{Bctr}\ \frac{G \mid \langle A, A, \Sigma\rangle, \Gamma \Rightarrow \Delta}{G \mid \langle A, \Sigma\rangle, \Gamma \Rightarrow \Delta}$$

$$\mathsf{Rwk}\ \frac{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta, A} \qquad \mathsf{Rctr}\ \frac{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta, A, A}{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta, A}$$

$$\mathsf{Ewk}\ \frac{G}{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta} \qquad \mathsf{Ectr}\ \frac{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta \mid \Gamma \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma \Rightarrow \Delta}$$

Remarquons qu'une conséquence immédiate de l'admissibilité de l'affaiblissement est que toutes les règles sont inversibles : dès que la conclusion d'une règle est dérivable ses prémisses le sont aussi. Ceci est crucial : lorsqu'une formule est dérivable, nous obtenons ainsi une dérivation dans laquelle l'ordre d'application des règles n'importe pas (voir Sec. 4).

Théorème 2 (Elimination des coupures) *La règle* cut *est admissible dans le calcul* $\mathbf{HS_{ELG}}$.

Ce théorème d'admissibilité des coupures a pour conséquence le théorème de complétude suivant :

Théorème 3 (Complétude axiomatique) *Si A est dérivable dans* $\mathbf{ELG}$*, alors $\Rightarrow A$ est dérivable dans* $\mathbf{HS_{ELG}}$.

$$\mathsf{init}\ \frac{}{G \mid \Gamma, p \Rightarrow p, \Delta} \qquad \mathsf{L}\bot\ \frac{}{G \mid \Gamma, \bot \Rightarrow \Delta} \qquad \mathsf{R}\top\ \frac{}{G \mid \Gamma \Rightarrow \top, \Delta}$$

$$\mathsf{L}\wedge\ \frac{G \mid \Gamma, A \wedge B, A, B \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma, A \wedge B \Rightarrow \Delta} \qquad \mathsf{R}\wedge\ \frac{G \mid \Gamma \Rightarrow A, A \wedge B, \Delta \qquad G \mid \Gamma \Rightarrow B, A \wedge B, \Delta}{G \mid \Gamma \Rightarrow A \wedge B, \Delta}$$

$$\mathsf{L}_{\mathbb{E}}\ \frac{G \mid \Gamma, \mathbb{E}_i A, \langle A \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma, \mathbb{E}_i A \Rightarrow \Delta} \qquad \mathsf{L}_{\mathbb{C}}\ \frac{G \mid \Gamma, \mathbb{C}_i A, \langle A \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma, \mathbb{C}_i A \Rightarrow \Delta}$$

$$\mathsf{Int}_{\mathbb{E}\mathbb{C}}\ \frac{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \Delta}$$

$$\mathsf{R}_{\mathbb{E}}\ \frac{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \mathbb{E}_i A, \Delta \mid \Sigma \Rightarrow A \qquad \{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \mathbb{E}_i A, \Delta \mid A \Rightarrow B\}_{B \in \Sigma}}{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \mathbb{E}_i A, \Delta}$$

$$\mathsf{R}_{\mathbb{C}}\ \frac{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \mathbb{C}_i A, \Delta \mid \Sigma \Rightarrow A \qquad \{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \mathbb{C}_i A, \Delta \mid A \Rightarrow B\}_{B \in \Sigma}}{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \mathbb{C}_i A, \Delta}$$

$$\mathsf{C}_{\mathbb{E}}\ \frac{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle \Pi \rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle \Sigma, \Pi \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle \Pi \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \Delta} \qquad \mathsf{T}_{\mathbb{E}}\ \frac{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}}, \Sigma \Rightarrow \Delta}{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \Delta}$$

$$\mathsf{Q}_{\mathbb{C}}\ \frac{\{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta \mid \Rightarrow B\}_{B \in \Sigma}}{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta} \qquad \mathsf{P}_{\mathbb{C}}\ \frac{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta \mid \Sigma \Rightarrow}{G \mid \Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta}$$

FIGURE 2 – Le calcul d'hyperséquents $\mathbf{HS_{ELG}}$.

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\mathbb{E}_i A, \langle A \rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle A \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \mathbb{C}_i A \mid A \Rightarrow A \qquad \mathbb{E}_i A, \langle A \rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle A \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \mathbb{C}_i A \mid A \Rightarrow A}{\mathbb{E}_i A, \langle A \rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle A \rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \mathbb{C}_i A}\,\mathsf{R}_{\mathbb{C}}}{\mathbb{E}_i A, \langle A \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \mathbb{C}_i A}\,\mathsf{Int}_{\mathbb{E}\mathbb{C}}}{\mathbb{E}_i A \Rightarrow \mathbb{C}_i A}\,\mathsf{L}_{\mathbb{E}}$$

FIGURE 3 – Un exemple de dérivation dans $\mathbf{HS_{ELG}}$.

Comme remarqué précédemment, les hyperséquents ne sont pas nécessaires dans les dérivations : on peut en particulier prouver qu'un hyperséquent est dérivable dans $\mathbf{HS_{ELG}}$ si et seulement si l'un des séquents qui le composent est dérivable. Cependant, cette utilisation des hyperséquents permet d'obtenir un calcul dans lequel toutes les règles sont inversibles, et donc dans lequel l'ordre d'application des règles n'importe pas : modulo l'ordre d'application des règles, chaque formule a une *unique* dérivation, ou une *unique* preuve qui échoue : il n'est pas nécessaire de faire du *backtracking*. De plus, les hyperséquents sont au cœur du calcul direct de contre-modèles, calcul que l'on peut ainsi effectuer à partir d'un unique hyperséquent non-prouvable apparaissant comme feuille dans une dérivation qui échoue. La prochaine section détaille ces considérations.

4 Recherche de preuves et extraction de contre-modèles

Nous définissons dans cette section une procédure vérifiant la validité (ou la dérivabilité) d'une formule dans la logique d'Elgesem en utilisant le calcul d'hyperséquents introduit dans la section précédente. La procédure utilise une stratégie de recherche de preuve simple, qui commence toujours par la racine. Nous montrons que la stratégie termine toujours, et construisons une dérivation pour toute formule valide. Pour toute formule faisant échouer le processus de recherche, nous montrons qu'il est possible d'extraire directement un contre-modèle pour celle-ci. La stratégie s'appuie sur la notion de saturation suivante. Intuitivement, un hyperséquent est saturé lorsque l'application "à rebours" de toute règle à celui-ci (c'est-à-dire dans laquelle il est en position de conclusion) n'ajoute pas d'information, au sens où l'une des prémisses de la règle est déjà incluse dans l'hyperséquent.

Définition 5 ***(Hyperséquent saturé)*** *Soit $H = \Gamma_1 \Rightarrow \Delta_1 \mid ... \mid \Gamma_k \Rightarrow \Delta_k$ un hyperséquent apparaissant dans une preuve de H'. Les conditions de saturation associées à chaque application d'une règle de $\mathbf{HS_{ELG}}$ sont les suivantes :*

- *Non-prouvabilité :* (init) $\Gamma_n \cap \Delta_n = \emptyset$. $(\bot_{\mathsf{L}})$ $\bot \notin \Gamma_n$. $(\top_{\mathsf{R}})$ $\top \notin \Delta_n$.
- *Règles propositionnelles :* $(\wedge_{\mathsf{L}})$ *Si $A \wedge B \in \Gamma_n$, alors $A \in \Gamma_n$ et $B \in \Gamma_n$.* $(\wedge_{\mathsf{R}})$ *Si $A \wedge B \in \Delta_n$, alors $A \in \Delta_n$ ou $B \in \Delta_n$. De même pour les règles pour $\neg$, $\vee$, $\rightarrow$.*
- *Règles modales :* $(\mathsf{L}_{\mathbb{E}})$ *Si $\mathbb{E}_i A \in \Gamma_n$, alors $\langle A \rangle_i^{\mathbb{E}} \in \Gamma_n$.* $(\mathsf{R}_{\mathbb{E}})$ *Si $\Gamma, \langle \Sigma \rangle_i^{\mathbb{E}} \Rightarrow \mathbb{E}_i B, \Delta$ est dans H, alors il y a $\Gamma', \Sigma \Rightarrow B, \Delta'$ dans H ou il y a $\Gamma', B \Rightarrow$*

©AFIA2021

A, Δ' dans H pour un $A \in \Sigma$. ($\mathsf{L}_{\mathbb{C}}$) *et* ($\mathsf{R}_{\mathbb{C}}$) *sont analogues.* ($\mathsf{C}_{\mathbb{E}}$) *Si* $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}}, \langle\Pi\rangle_i^{\mathbb{E}} \in \Gamma_n$*, alors il y a* $\langle\Omega\rangle_i^{\mathbb{E}} \in \Gamma_n$ *tel que* $\mathsf{set}(\Sigma, \Pi) = \mathsf{set}(\Omega)$. ($\mathsf{T}_{\mathbb{E}}$) *Si* $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}} \in \Gamma_n$*, alors* $\mathsf{set}(\Sigma) \subseteq \Gamma_n$. ($\mathsf{Q}_{\mathbb{C}}$) *Si* $\Gamma, \langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta$ *est dans H, alors il y a* $\Gamma' \Rightarrow B, \Delta'$ *dans H pour un* $B \in \Sigma$. ($\mathsf{P}_{\mathbb{C}}$) *Si* $\Gamma, \langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{C}} \Rightarrow \Delta$ *est dans H, alors il y a* $\Gamma' \Rightarrow \Delta'$ *dans H tel que* $\mathsf{set}(\Sigma) \subseteq \Gamma'$. *(*$\mathsf{Int}_{\mathbb{EC}}$*) Si* $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}} \in \Gamma_n$*, alors il y a* $\langle\Omega\rangle_i^{\mathbb{C}} \in \Gamma_n$ *tel que* $\mathsf{set}(\Sigma) = \mathsf{set}(\Omega)$.

Nous disons que H est saturé relativement à l'application d'une règle R s'il satisfait la condition de saturation (R) correspondant à l'application de cette règle. Un hyperséquent H est saturé relativement à $\mathbf{HS_{ELG}}$ *s'il est saturé relativement à toute application possible d'une règle du calcul* $\mathbf{HS_{ELG}}$.

La *stratégie de recherche de preuve* est simple : (i) n'appliquer aucune règle aux séquents initiaux, et (ii) ne pas appliquer une règle donnée à un hyperséquent qui est déjà saturé par rapport à l'application de cette règle.
Le coeur de la stratégie est le suivant : éviter les applications de règles qui n'apportent pas d'information additionnelle aux hyperséquents. Nous démontrons que cette stratégie donne un algorithme de recherche de preuve qui termine.

Proposition 4 (Terminaison de la stratégie) *Toute branche d'une preuve d'un hyperséquent H obtenue par application de la stratégie définie ci-dessus est finie. Il suit que la procédure de recherche de preuve pour H termine toujours. De plus, toute branche termine par un hyperséquent initial ou par un hyperséquent saturé.*

Les hyperséquents apparaissant dans une preuve de H peuvent être exponentiellement plus grands que H. Cela est dû à la présence de la règle $\mathsf{C}_{\mathbb{E}}$ qui, étant donné n formules $\mathbb{E}_i A_1, \ldots, \mathbb{E}_i A_n$, permet de construire un bloc pour chaque sous-ensemble de $\{A_1, ..., A_n\}$. Ainsi, notre procédure de décision n'atteint pas la borne de complexité PSPACE établie pour la logique d'Elgesem par Schröder et Pattinson [10] et Troquard [11].
Un calcul optimal pourrait être obtenu soit en considérant le calcul des séquents de [9], ou (dans l'esprit de [4]) en reformulant les règles de la figure 2 afin que les formules principales ne soient *pas recopiées* dans les prémisses. Ceci aboutirait cependant à la perte de l'inversibilité des règles, et donc à la perte de la possibilité d'extraire directement des contre-modèles à partir de preuves qui échouent. Cette situation est analogue à celle de la logique modale $\mathbf{K}$: pour cette logique, on peut obtenir une borne de complexité PSPACE via un calcul de séquents approprié, mais on ne peut pas respecter cette borne avec un calcul dont les règles sont inversibles et permettent à ce titre l'extraction directe et aisée de contre-modèles pour les formules qui ne sont pas valides. Comme pour $\mathbf{K}$, nous conjecturons que le calcul d'un contre-modèle peut avoir une complexité exponentielle, car un contre-modèle peut avoir lui-même une taille exponentielle (par rapport à la taille de la formule). Par conséquent, il faut choisir entre un calcul optimal qui vérifie la validité d'une formule et un calcul non-optimal qui permet la construction explicite de contre-modèles.
Nous montrons maintenant comment un contre-modèle peut être construit directement dans la sémantique à voisinages doubles à partir d'un hyperséquent saturé.

Définition 6 ***(Construction de contre-modèle)*** *Soit H un hyperséquent saturé apparaissant dans une preuve de H'. Fixons aussi une énumération $e : \mathbb{N} \longrightarrow H$ des composants de H. Pour e fixé, nous écrivons H sous la forme $\Gamma_1 \Rightarrow \Delta_1 \mid ... \mid \Gamma_k \Rightarrow \Delta_k$. Le modèle $\mathcal{M} = \langle \mathcal{W}, \mathcal{N}, \mathcal{V} \rangle$ est défini comme suit :*

- $\mathcal{W} = \{n \mid \Gamma_n \Rightarrow \Delta_n \in H\}$.
- $\mathcal{V}(p) = \{n \mid p \in \Gamma_n\}$.
- *Pour tout bloc $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}}$ ou $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{C}}$ apparaissant dans un composant $\Gamma_m \Rightarrow \Delta_m$ de H,*
  $\Sigma^+ = \{n \in \mathcal{W} \mid \mathsf{set}(\Sigma) \subseteq \Gamma_n\}$ *et* $\Sigma^- = \{n \in \mathcal{W} \mid \Sigma \cap \Delta_n \neq \emptyset\}$.
- *Pour tout $i \in \mathcal{A}$ et tout $n \in \mathcal{W}$,*
  $\mathcal{N}_i^{\mathbb{E}}(n) = \{(\Sigma^+, \Sigma^-) \mid \langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}} \in \Gamma_n\}$ *and* $\mathcal{N}_i^{\mathbb{C}}(n) = \{(\Sigma^+, \Sigma^-) \mid \langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{C}} \in \Gamma_n\}$.

Lemme 1 *Considérons le modèle $\mathcal{M}$ défini comme dans la définition 6. Alors pour tout A, $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}}$, $\langle\Pi\rangle_j^{\mathbb{C}}$ et tout $n \in \mathcal{W}$, nous avons : Si $A \in \Gamma_n$, alors $n \Vdash A$; si $\langle\Sigma\rangle_i^{\mathbb{E}} \in \Gamma_n$, alors $n \Vdash \mathbb{E}_i \bigwedge \Sigma$; si $\langle\Pi\rangle_j^{\mathbb{C}} \in \Gamma_n$, alors $n \Vdash \mathbb{C}_j \bigwedge \Pi$; et si $A \in \Delta_n$, alors $n \nVdash A$. De plus, $\mathcal{M}$ est un modèle à voisinages doubles de* $\mathbf{ELG}$.

Remarquons que, puisque toutes les règles sont cumulatives, le contre-modèle $\mathcal{M}$ de H est également un contre-modèle de l'hyperséquent H' apparaissant à la racine. Alors, pour tout hyperséquent, nous obtenons soit une dérivation (si l'hyperséquent est valide), soit un contre-modèle. Ceci implique le théorème suivant :

Théorème 4 (Complétude sémantique) *Si H est valide dans tous les modèles à voisinages doubles de* $\mathbf{ELG}$*, alors il est dérivable dans* $\mathbf{HS_{ELG}}$.

La procédure de recherche de preuve pour le calcul $\mathbf{HS_{ELG}}$ peut être employée pour vérifier automatiquement, et constructivement, la validité (ou la dérivabilité) des formules de la logique d'Elgesem. Pour toute formule, cette procédure de recherche de preuve donne soit une dérivation, soit un contre-modèle, selon que la formule est valide ou non.

Exemple 1 ***(Échec de la délégation)*** *Le traitement de la notion de délégation marque une différence majeure entre la modélisation de l'effectivité dans la logique d'Elgesem et d'autres modélisations, telles que celles données par les logiques dites STIT. Elle est explicitement rejetée par Elgesem [6], pour qui un agent n'est pas considéré comme effectuant une action si celle-ci met en jeu l'intervention d'un autre agent. Par exemple, on peut dire que faire réparer une voiture n'est pas équivalent à réparer cette voiture soi-même. Représentons Anna par la*

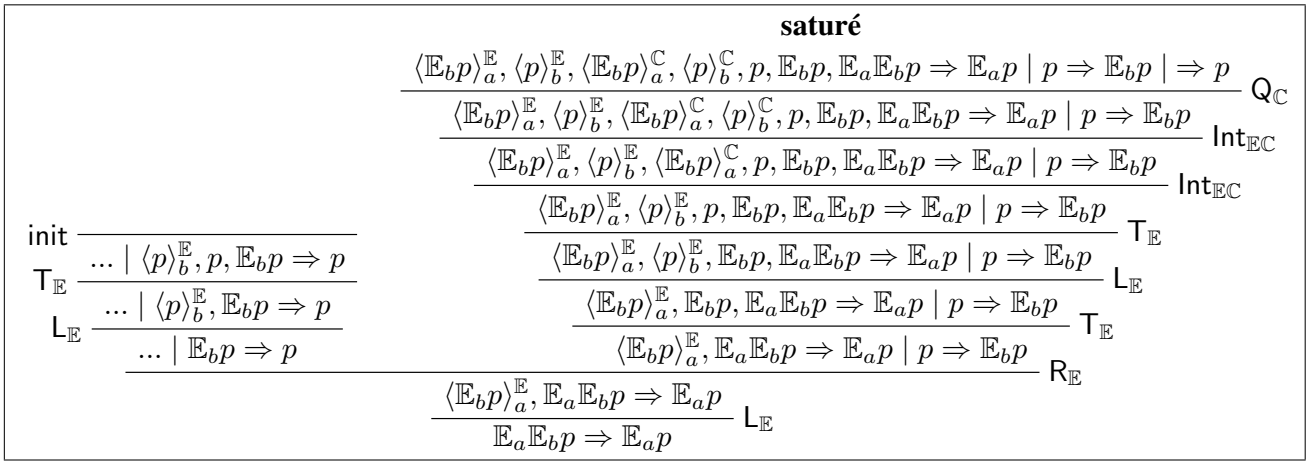


FIGURE 4 – Preuve qui échoue dans $\mathbf{HS_{ELG}}$.

lettre a, Béatrice par b, et "réparer la voiture" par p. Alors $\mathbb{E}_a\mathbb{E}_b p \rightarrow \mathbb{E}_a p$ modélise la phrase : "Si Anna fait réparer sa voiture par Béatrice, alors Anna répare la voiture." Notre calcul donne automatiquement un contre-modèle de $\mathbb{E}_a\mathbb{E}_b p \rightarrow \mathbb{E}_a p$. Tout d'abord, en figure 4 nous donnons une preuve qui échoue de $\mathbb{E}_a\mathbb{E}_b p \rightarrow \mathbb{E}_a p$ dans $\mathbf{HS_{ELG}}$. Nous considérons ensuite l'énumération suivante des composants de l'hyperséquent saturé suivant : $1 \mapsto \langle\mathbb{E}_b p\rangle^{\mathbb{E}}_a, \langle p\rangle^{\mathbb{E}}_b, \langle\mathbb{E}_b p\rangle^{\mathbb{C}}_a, \langle p\rangle^{\mathbb{C}}_b, p, \mathbb{E}_b p, \mathbb{E}_a\mathbb{E}_b p \Rightarrow \mathbb{E}_a p$; $2 \mapsto p \Rightarrow \mathbb{E}_b p$; et $3 \mapsto \Rightarrow p$.

Nous obtenons les contre-modèles suivants : Contre-modèles à voisinages doubles : En appliquant la construction de la définition 6 nous obtenons le contre-modèle à voisinages doubles $\mathcal{M} = \langle \mathcal{W}, \mathcal{N}^{\mathbb{E}}_i, \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_i, \mathcal{V}\rangle$, où $\mathcal{W} = \{1,2,3\}$; $\mathcal{V}(p) = \{1,2\}$; $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_a(1) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_a(1) = \{(\{1\},\{2\})\}$ – puisque $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_a(1) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_a(1) = \{(\mathbb{E}_b p^+, \mathbb{E}_b p^-)\}$, $\mathbb{E}_b p^+ = \{1\}$, et $\mathbb{E}_b p^- = \{2\}$ –; $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_b(1) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_b(1) = \{(\{1,2\},\{3\})\}$ – puisque $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_b(1) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_b(1) = \{(p^+, p^-)\}$, $p^+ = \{1,2\}$, et $p^- = \{3\}$ –; $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_i(n) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_i(n) = \emptyset$ pour $i = a, b$ et $n = 2, 3$.

Contre-modèle à voisinages simples : La transformation de la proposition 1 donne le contre-modèle à voisinages simples $\mathcal{M} = \langle \mathcal{W}, \mathcal{N}^{\mathbb{E}}_i, \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_i, \mathcal{V}\rangle$, où $\mathcal{W} = \{1,2,3\}$; $\mathcal{V}(p) = \{1,2\}$; $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_a(1) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_a(1) = \{\{1\},\{1,3\}\}$; $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_b(1) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_b(1) = \{\{1,2\}\}$; et $\mathcal{N}^{\mathbb{E}}_i(n) = \mathcal{N}^{\mathbb{C}}_i(n) = \emptyset$ pour $i = a, b$ et $n = 2, 3$.

5 Conclusion

Nous avons présenté un calcul d'hyperséquents pour la logique d'effectivité et de capacité d'Elgesem. Ce calcul présente de bonnes propriétés structurelles, parmi lesquelles l'admissibilité syntaxique de la coupure. De plus, nous avons défini une stratégie terminante de recherche de preuve, qui assure le calcul d'une dérivation ou d'un contre-modèle suivant la validité de la formule en entrée. En particulier, on peut extraire directement d'une preuve qui échoue un contre-modèle de la formule considérée dans la sémantique à voisinages doubles, qui peut ensuite aisément être transformé en contre-modèle dans la sémantique de voisinages usuelle.

Le calcul d'hyperséquents présenté dans ce travail se prête bien à l'automatisation, et nous prévoyons de l'implémenter afin d'obtenir le premier prouveur automatique pour la logique d'effectivité et de capacité.

Par ailleurs, la logique d'Elgesem modélise les actions d'un unique agent, qu'il soit un individu ou une institution, ou un groupe pensé comme entité indivisible. Une extension naturelle, proposée par Troquard [11], permet de modéliser des *coalitions*, c'est-à-dire des groupes (divisibles en individus) d'agents. Le travail présenté dans cet article s'étend naturellement à l'extension de Troquard, ceci est présenté par les auteurs de cet article dans [3].

Références

[1] Arnon Avron. *The Method of Hypersequents in the Proof Theory of Propositional Non-Classical Logics*, page 1–32. Clarendon Press, USA, 1996.

[2] Nuel D Belnap, Michael Perloff, and Ming Xu. *Facing the future : agents and choices in our indeterminist world*. Oxford University Press on Demand, 2001.

[3] Tiziano Dalmonte, Charles Grellois, and Nicola Olivetti. Proof systems for the logics of bringing-it-about. In *DEON 2020/2021, the 15th International Conference on Deontic Logic and Normative Systems*, 2021.

[4] Tiziano Dalmonte, Björn Lellmann, Nicola Olivetti, and Elaine Pimentel. Countermodel construction via optimal hypersequent calculi for non-normal modal logics. In Sergei N. Artëmov and Anil Nerode, editors, *Logical Foundations of Computer Science - International Symposium, LFCS 2020*, volume 11972 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 27–46. Springer, 2020.

[5] Tiziano Dalmonte, Nicola Olivetti, and Sara Negri. Non-normal modal logics : Bi-neighbourhood semantics and its labelled calculi. In *Advances in Modal*

©AFIA2021

Logic 12, proceedings of the 12th conference on "Advances in Modal Logic", pages 159–178. College Publications, 2018.

[6] Dag Elgesem. The modal logic of agency. *Nordic Journal of Philosophical Logic*, 2 :1–46, 1997.

[7] Guido Governatori and Antonino Rotolo. On the axiomatisation of elgesem's logic of agency and ability. *J. Philosophical Logic*, 34(4) :403–431, 2005.

[8] John F Horty. *Agency and deontic logic*. Oxford University Press, 2001.

[9] Bjoern Lellmann. *Sequent Calculi with Context Restrictions and Applications to Conditional Logic*. PhD thesis, Imperial College London, 2013.

[10] Lutz Schröder and Dirk Pattinson. Shallow models for non-iterative modal logics. In Andreas Dengel, Karsten Berns, Thomas M. Breuel, Frank Bomarius, and Thomas Roth-Berghofer, editors, *KI 2008 : Advances in Artificial Intelligence, 31st Annual German Conference on AI, KI 2008*, volume 5243 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 324–331. Springer, 2008.

[11] Nicolas Troquard. Reasoning about coalitional agency and ability in the logics of "bringing-it-about". *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 28(3) :381–407, 2014.

Attracteurs étranges au dilemme itéré du prisonnier

Jean-Paul Delahaye[1], Philippe Mathieu[1]

[1] Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 CRIStAL, F-59000 Lille, France

prenom.nom@univ-lille.fr

Résumé

Pour comparer des ensembles de stratégies il existe un grand nombre de méthodes. Parmi celles-ci les modèles évolutionnaires offrent une pertinence et une robustesse remarquable. Nous étudions dans cet article deux modèles évolutionnaires parmi les plus simples et naturels possibles au dilemme itéré du prisonnier : le modèle individualiste dans lequel un individu se confronte à tout le monde et le modèle communautaire dans lequel un individu ne se confronte pas aux membres de sa propre famille. À l'aide de simulations massives utilisant des classes complètes de stratégies nous mettons en évidence des évolutions typiques. Pour le modèle individualiste, nous observons avec une grande fréquence une convergence vers un état de coopération généralisée. Pour le modèle communautaire, dont nous défendons la pertinence, nous montrons qu'il se produit de manière quasi-systématique un phénomène de convergence vers un attracteur unique et indépendant de la distribution initiale des effectifs. Des résultats statistiques sur la fréquence de ces attracteurs sont calculés et analysés.

Mots-clés

Théorie des jeux, Dilemme du prisonnier, stratégies d'agents, évolution

Abstract

To compare sets of strategies, there are a large number of different methods. Among these, evolutionary models offer a relevance and remarkable robustness. We study in this article two of the simplest and most advanced evolutionary models : the individualistic model in which an individual meets himself with everyone else and the community model in which an individual does not meet members of his own family. With the help of simulations using complete classes of strategies, we highlight two typical evolutions. For the individualistic model, we observe with great frequency a convergence towards a state of widespread cooperation. For the community model, for which we defend relevance, we highlight a convergence phenomenon towards a unique attractor and independent of the initial distribution of population. Statistical results on the frequency of these attractors are calculated and analyzed.

Keywords

Game Theory, Iterated prisoner's Dilemma, Agent's Strategy,Behaviour

1 Introduction

La théorie des jeux computationnelle ou théorie algorithmique des jeux est une discipline qui permet d'étudier formellement le comportement d'agents qui entrent en interaction. Contrairement aux applications SMA pratiques, il est dans ce cadre formel, beaucoup plus facile de concevoir des stratégies comportementales et de fournir des outils permettant de les évaluer. Il s'agit donc d'un domaine de recherche très utile pour la communauté SMA puisqu'il permet de concevoir des outils adaptables aux situations pratiques. Dans ce cadre, le dilemme itéré du prisonnier (IPD) fait référence. Depuis sa description par Axelrod et Hamilton en 1981 [5] ce modèle a fait l'objet d'un grand nombre d'études et de travaux de recherche ([2, 3, 4, 7, 13, 14, 18, 23, 26, 31]). Un renouveau des recherches s'est produit à partir de l'article de Press et Dyson de 2012 [30] qui a provoqué une large discussion ([1, 15, 16, 19, 24, 32, 33], etc).

Plusieurs stratégies de jeu ont été identifiées comme réussissant de manière robuste dans des rencontres où s'affrontent une multitude de stratégies. Les principales stratégies connues sont `tft`, `spiteful`, `pavlov`, `gradual` ([5, 6, 14, 18, 21, 23, 26]. D'autres stratégies ont été mises en évidence plus récemment [14, 30, 21, 23]. La stratégie `tit_for_tat`, notée ici `tft` et appelée `donnant_donnant` en français, consiste à toujours coopérer (noté `c`) sauf à répliquer pour chaque trahison de l'adversaire notée `d` (donne "Defect") par une trahison. Lors d'une rencontre entre 2 stratégies, à chaque coup joué des points sont distribués aux joueurs. Lorsque les coups joués sont `[c c]` les joueurs reçoivent chacun 3 points ; pour `[d d]` chacun reçoit 1 point et pour `[c d]` les points distribués sont 0 et 5.

Le problème principal pour l'évaluation et la comparaison des stratégies est celui du mode de confrontation utilisé. Le tournoi fournit des résultats dont la pertinence a été discutée dès les premiers travaux de Axelrod car il donne un poids équivalent à toutes les stratégies mises dans l'arène initiale de jeu, y compris à celles peu robustes qui disparaissent dès qu'on envisage des opérations de sélection naturelle. Bien plus intéressantes sont les compétitions évolutionnaires, parfois appelées compétitions écologiques ([5, 3, 4, 6, 8, 9, 34, 18, 20, 23, 26, 27]), où les effectifs initiaux des stratégies mises dans l'arène évoluent de

©AFIA2021

génération en génération en fonction de leur réussite dans des tournois instantanés (complets ou partiels, aléatoires ou non, soumis à du bruit ou non, avec possibilité de mutations ou non) qui se déroulent de manière répétée faisant émerger les stratégies les plus robustes et éliminant à la fois les stratégies faibles et celles qui les exploitent.

Cette "compétition écologique" qui est le modèle de la compétition évolutionnaire le plus simple, est utilisé dès les premiers travaux sur le dilemme itéré du prisonnier par Axelrod et Hamilton [5]. D'une génération à la suivante les résultats d'un tournoi général entre tous les individus présents dans l'arène déterminent les effectifs de la génération suivante. Sa version de base est déterministe, sans bruit, sans localisation dans un espace géométrique, et sans mutation. C'est le modèle évolutionnaire le plus fondamental. Nous l'appellerons le "modèle évolutionnaire individualiste" car chaque stratégie est évaluée à la génération n en fonction de son propre comportement face à tous les autres individus de l'arène, y compris ceux appartenant à la même catégorie que lui (c'est-à-dire jouant la même stratégie). Le second modèle évolutionnaire fondamental est lui aussi déterministe, sans bruit, sans localisation et sans mutation. Il fonctionne comme le premier mais cette fois en supposant qu'un individu appartenant à une communauté — par exemple celle des individus jouant `tft` — a une attitude neutre vis à vis des individus de sa communauté et est donc évalué en considérant un tournoi dans l'arène de la génération n où il ne les rencontre pas. L'étude et la comparaison de ces deux modèles évolutionnaires fondamentaux semblent n'avoir jamais été réalisées dans la littérature. C'est le sujet de cet article. Cette étude nous semble importante car il est nécessaire d'avoir une compréhension aussi fine et complète que possible de ces modèles basiques avant d'envisager des modèles évolutionnaires plus complexes ([4, 34, 18] etc.). Les deux modèles évolutionnaires fondamentaux retenus engendrent des dynamiques sensiblement différentes, ce qui n'avait pas été noté jusqu'à présent. Le classique phénomène de convergence vers un état stable de coopération généralisée ([3, 7, 8, 9, 10, 20, 21, 23]) pour le modèle évolutionnaire individualiste ("écologique") est étudié section 2. L'élimination presque systématique des stratégies agressives (prenant l'initiative de trahir) est intéressante à remarquer mais n'est pas satisfaisante pour la modélisation des écosystèmes réels, où on observe au contraire la survie à l'équilibre d'un grand nombre d'organismes variés dont certains sont agressifs. Nous fournissons des précisions statistiques sur les dynamiques qu'engendre ce modèle. L'étude menée section 3, du modèle évolutionnaire communautaire montre qu'on observe beaucoup plus rarement dans ce cas la convergence vers un état général de coopération. En revanche la compétition évolutionnaire communautaire engendre fréquemment des dynamiques d'attracteurs qui ne sont que rarement observées dans le cas individualiste. Nous étudions ce modèle à nouveau en menant des expériences massives. Ce phénomène est remarquable et a été sous-estimé alors qu'il correspond à une modélisation des mécanismes évolutionnaires parfaitement naturelle et que ces attracteurs sont des points d'équilibre autorisant la survie d'une grande variété de stratégies, y compris agressives. La diversité des stratégies présentes dans ces points attracteurs correspond mieux à la grande variété d'organismes vivants présents simultanément dans les systèmes écologiques réels. Le modèle communautaire apparait donc comme un intéressant outil de modélisation, et il est plus fidèle à la réalité du monde vivant que le modèle individualiste.

2 Le modèle individualiste

2.1 Les limites des classements par tournoi

Dans le dilemme itéré du prisonnier (voir [5, 4]) une infinité de stratégies est possible et aucune stratégie n'est meilleure que toutes les autres dans l'absolu. Certaines stratégies, les `allD` ou les Extorqueurs [30, 12] notamment, ne perdent jamais contre personne, mais cela a pour conséquence qu'elles gagnent peu de points et se comportent donc très mal dans une compétition où se rencontrent de nombreuses stratégies.

L'évaluation d'un ensemble de stratégies mises en compétition les unes avec les autres pour déterminer un classement entre elles est un problème délicat. Même s'il est évident que le classement trouvé dans un ensemble donné de stratégies est toujours dépendant de cet ensemble, il est essentiel pour un ensemble fixé E de disposer de moyens de comparaison réalistes et robustes aboutissant à des classements reproductibles. La méthode du tournoi (chaque stratégie rencontre toutes les autres, et le cumul des points qu'elle obtient fixe sa valeur et sert de base au classement) est la première à laquelle on pense. Elle possède un défaut grave. Si une stratégie s exploite certaines stratégies au comportement déraisonnable — par exemple celles non réactives, se laissant systématiquement exploiter comme la stratégie `allC` — et que s est bien classée dans un tournoi, ce bon résultat est illusoire, car dans un monde plus réaliste où les comportements déraisonnables disparaissent, s serait moins bien classée et peut-être très mal. C'est pourquoi Axelrod a envisagé une méthode de classement simulant la sélection naturelle.

2.2 Mise en équations vectorielles

Le modèle le plus simple dont il faut avoir une compréhension aussi précise que possible avant d'envisager des méthodes plus complexes est le suivant. Ce modèle a été appelé compétition écologique ([5, 3, 4, 6, 6, 8, 9, 34, 18, 20, 23, 25, 27]), certain auteurs parlent de PFR pour "*proportional fitness rule*" ([8, 9, 17, 28, 29]). Nous utiliserons le terme de "*compétition évolutionnaire déterministe individualiste*" pour le désigner, ou plus simplement de "*modèle individualiste*". L'adjectif individualiste sera opposé à communautaire (voir section 3) car dans ce modèle chaque individu joue pour lui-même et gagne des points en rencontrant tous les individus présents dans l'arène de jeu, alors que dans le modèle communautaire un individu ne gagne de points que face aux individus n'appartenant pas à sa communauté.

Pour classer les stratégies d'un ensemble `E` de stratégies,

dans le modèle individualiste on procède en faisant évoluer une arène d'individus, chacun jouant une stratégie de l'ensemble E et rencontrant tous les autres individus présents de l'arène.

a) Pour chaque stratégie s de E, on place dans l'arène plusieurs individus jouant s, ce qui constitue la génération 0. Les effectifs d'individus associés à chaque stratégie en ce point de départ peuvent être choisis égaux, mais il est intéressant d'envisager des effectifs inégaux afin de comparer les dynamiques qui en résultent.

b) On calcule le résultat d'un tournoi entre tous les individus de cette génération 0.

c) Pour chaque stratégie s de E, on évalue le total des points gagnés par les individus jouant s. Ce total est le score de s. Les stratégies qui obtiennent les meilleurs scores auront dans la composition de la génération 1 des effectifs d'individus plus importants que celles ayant obtenu de moins bons scores.

d) Le calcul de la génération 2 se fera à partir de la génération 1, selon la même idée. Etc.

La façon la plus simple et la plus naturelle de fixer précisément les effectifs de la génération $k+1$ à partir de ceux de la génération k est de les prendre proportionnels pour la stratégie s aux nombres de points obtenus par les individus jouant s dans le tournoi entre individus de la génération k. L'idée est que la descendance d'un individu est directement proportionnelle pour la génération $k+1$ au nombre de points qu'il tire de ses interactions avec les autres individus présents dans l'arène à la génération k. Pour rendre plus facile la comparaison des résultats d'une génération à la suivante, on suppose que l'effectif total reste constant. Si ce n'était pas le cas, en multipliant tous les effectifs par une constante à chaque génération on pourrait se ramener à ce cas. Le choix de fixer un même effectif total à chaque génération ne fait donc perdre aucune généralité au modèle. Dans les simulations numériques [1], on peut mener les calculs avec des nombres réels indiquant par exemple pour chaque stratégie s le pourcentage d'individus jouant s dans l'arène. Écrivons les équations en utilisant un système de notation vectoriel et matriciel.

Soit P_k le vecteur donnant les effectifs des n stratégies qu'on cherche à classer pour la génération k : $P_k(s_i)$ = nombre d'individus jouant la stratégie s_i dans la génération k. Soit $Scores$ la matrice $n \times n$ des scores des rencontres deux à deux : $Scores(s_i, s_j)$ = score obtenu par la stratégie s_i quand elle rencontre s_j.

Le vecteur $fitInd_k$ de taille n indiquant le nombre de points gagnés par un individu jouant la stratégie s_i lors d'un tournoi entre les individus de la génération k est donné par le produit de la matrice $Scores(s_i, s_j)$ par le vecteur P_k :

$$fitInd_k = Scores.P_k$$

où la notation $M.V$ désigne le produit usuel d'une matrice M par un vecteur V. Dans ce calcul des points gagnés pour le tournoi de la génération k, un individu joue contre lui-même. Si on mène le calcul avec un vecteur P_k qui correspond à des effectifs d'individus (et non pas à des pourcentages) on peut éviter cela en soustrayant à chaque composante du vecteur $fitInd_k$ la quantité $Scores(s_i, s_i)$. Lorsque nous prendrons en compte cette remarque nous parlerons de modèle strict. Le vecteur $fitStr_k$ de taille n indiquant pour chaque stratégie le nombre de points gagnés par l'ensemble des individus jouant la stratégie s_i est donné par la formule :

$$fitStr_k = P_k \bullet fitInd_k$$

où $\bullet$ désigne le produit terme à terme entre deux vecteurs de taille n. Si on considère que le total des effectifs reste constant et égal au nombre $base$ (si on calcule avec des pourcentages on a $base = 1$), alors les nouveaux effectifs sont donnés par l'équation :

$$P_{k+1} = (base/\Sigma_k(fitStr_k)) * fitStr_k$$

où $\Sigma_k(fitStr_k)$ est la somme des composantes du vecteur $fitStr_k$ et où $r * V$ désigne le vecteur V dont chaque composante a été multipliée par le nombre réel r. Tous les calculs permettant de passer du vecteur des effectifs à la génération k au vecteur des effectifs à la génération $k+1$ se résument donc en :

$$\begin{aligned} fitInd_k &= Scores.P_k \\ fitStr_k &= P_k \bullet fitInd_k \\ P_{k+1} &= (base/\Sigma_k(fitStr_k)) * fitStr_k \end{aligned}$$

Si le vecteur P_k est exprimé en pourcentage, on fera les calculs avec des nombres réels. Si P_k est exprimé avec des entiers et qu'on souhaite à chaque étape avoir une vecteur d'entiers, on prendra en compte la remarque pour éviter de faire jouer une stratégie contre elle-même dans le tournoi opéré à la génération k (modèle strict). Dans le cas de calculs avec des entiers, l'opération de normalisation pour maintenir constant le nombre total des individus présents à chaque génération devra être suivie d'un calcul d'arrondi (par exemple à l'entier inférieur) ce qui aura pour effet que la somme des effectifs pourra parfois être légèrement et temporairement inférieure à la base. Ces variations du total ne changent pas fondamentalement les dynamiques observées, sauf sur un point : le modèle avec des nombres entiers arrive plus rapidement à un état stable que le modèle avec des nombres réels. Nous avons mené les deux types de calcul pour nous assurer de la cohérence et de l'universalité des résultats observés.

2.3 Convergence vers la coopération généralisée

Nous appellerons stratégies bienveillantes (*nice* en anglais) les stratégies qui lors d'une rencontre ne jouent jamais d en premier, et agressives les stratégies qui, à l'opposé, prennent l'initiative de trahir même si l'adversaire a toujours joué c dans le passé. Un phénomène remarquable

1. https://github.com/cristal-smac/ipd

©AFIA2021

noté par Robert Axelrod dès ses premières simulations évolutionnaires utilisant le modèle individualiste (pour lui : *ecological evolution*) est que les stratégies agressives sont toutes repoussées à la fin des classements, y compris celles qui avaient d'assez bons résultats au tournoi. Le plus souvent, elles sont même totalement éliminées ce qui conduit donc à un ensemble de stratégies qui coopèrent toutes les unes avec les autres. Un tel état de l'arène de jeu est nommé état de "coopération généralisée". Il a été souvent mentionné dans la littérature en particulier par [5, 3, 6, 7, 8, 9, 20, 21, 23] mais aucune étude générale ne semble avoir été menée à son sujet. Le phénomène n'est pas absolument général et on trouve facilement des exceptions (voir plus loin). On ne peut donc pas énoncer et démontrer un théorème qui établirait qu'il se produit systématiquement. En revanche, on peut mener des expériences pour en évaluer la fréquence. C'est ce que nous avons fait à l'aide de plusieurs calculs massifs que nous décrivons maintenant. Partant d'une famille de stratégies `F`, mille fois de suite, nous prenons k stratégies au hasard dans `F` avec $k = 4, 5, ..., 10$. Pour la génération 0 l'arène comporte 100 individus jouant chacune une des k stratégies. La simulation évolutionnaire individualiste est effectuée (calcul avec des entiers, modèle strict, rencontres de 100 coups, points 3,1,0,5 pour la matrice des scores [3, 12]). Le nombre de simulations évolutionnaires individualistes menant à la coopération généralisée est calculé, ce qui donne un résultat entre 0 et 1000 que nous convertissons en pourcentage. Les familles `F` que nous avons considérées sont les suivantes :

— La famille `bag20` de 20 stratégies simples et classiques (même famille que dans [12, 11, 22] sauf la stratégie `mem2` qui est sujette à des interprétations contradictoires.)

— Le même ensemble `bag20` auquel sont ajoutées 5 stratégies probabilistes de type égalisateur et extorqueur selon les définitions de [30]. Cet ensemble est noté `bag25`.

— Les ensembles `Mem(1,1)`, `Mem(1,2)` et `Mem(2,1)` issus de [7] et comportant respectivement 32, 1024 et 1024 stratégies.

Par définition chaque stratégie de `Mem(n,m)` mémorise les `n` derniers coups qu'elle a joués et les `m` derniers coups joués par l'adversaire et prend une décision — toujours la même — en fonction de cette information. Nous avons aussi repris la même expérience pour `Mem(1,1)`, `Mem(1,2)`, `Mem(2,1)` en ajoutant à chaque sous-ensemble de k stratégies les trois stratégies `tft`, `spiteful`, et `gradual` dont on sait qu'elles favorisent la coopération. Nous avons noté `Mem11+`, `Mem12+`, `Mem21+` les lignes donnant les résultats pour ces familles. Au total nous avons donc calculé 56000 simulations évolutionnaires individualistes.
Les points suivants apparaissent.

— La convergence vers la coopération généralisée est un phénomène général qui se produit fréquemment dans une grande variété de contextes.

k	4	5	6	7	8	9	10	Avg
bag20	67.0	69.0	74.5	76.9	78.9	84.2	83.1	76.2
bag25	67.4	71.9	74.2	72.7	76.3	81.7	82.9	75.3
Mem11	25.9	29.1	33.7	39.6	43.9	52.0	53.7	39.7
Mem12	14.9	15.8	14.8	16.2	15.5	16.5	18.0	16.0
Mem21	8.8	7.9	9.7	7.8	8.4	10.0	9.5	8.9
Mem11+	100	100	100	100	100	100	100	100
Mem12+	99.6	99.6	99.9	99.6	99.2	99.0	99.2	99.4
Mem21+	99.7	100.0	99.9	99.4	99.7	99.7	99.3	99.7
Avg	60.4	61.7	63.3	64	65.2	67.9	68.2	**64.4**

TABLE 1 – Probabilité de convergence vers la coopération généralisée lors d'une simulation évolutionnaire individualiste.

— Plus grand est le nombre de stratégies mises en compétition plus la probabilité de converger vers la coopération généralisée est grande.

— Globalement, la convergence vers la coopération généralisée se produit dans plus de 64,4% des cas.

— Pour les stratégies des classes complètes `Mem(1,1)`, `Mem(1,2)`, `Mem(2,1)` la coopération généralisée est fréquente mais plus rare pour les classes de stratégies plus complexes. L'explication provient en partie de ce que la proportion de stratégies agressives augmente de `Mem(1,1)` où elle est de 75% à `Mem(1,2)` et `Mem(2,1)` où elle est de 87,5%. Il est en effet évident que si dans l'ensemble des k stratégies choisies au départ, il n'y a que des stratégies agressives, alors il est impossible que se produise une convergence vers la coopération généralisée.

— Les trois dernières lignes de la table 1 montrent que l'ajout de trois stratégies bienveillantes et réactives (`tft`, `spiteful`, `gradual`) provoque avec une forte probabilité une situation où la coopération généralisée s'imposera, et cela même quand c'était une éventualité rare avant l'ajout. Il est remarquable que l'ajout des trois stratégies `tft`, `spiteful` et `gradual` à des ensembles pris au hasard de 10 stratégies de `Mem(2,1)` fait passer la probabilité de convergence vers la coopération généralisée de 9,5% à 99,3% (avant-dernière colonne des lignes 5 et 8 de la table 1). Les stratégies bienveillantes et réactives sont des catalyseurs efficaces de pacification.

La figure 1 montre un exemple typique de convergence vers la coopération généralisée. Les stratégies prises pour cet exemple sont `prober`, `gradual`, `tft`, `mistrust`, `allC` et `allD`. Les points de départ sont : effectif 1000 pour une stratégie et 20 pour les autres (6 trajectoires), puis 1000 pour une stratégie et 50 pour les autres (6 trajectoires), puis 1000 pour une stratégie et 100 pour les autres (6 trajectoires). Cela donne 18 trajectoires évolutives correspondant à 18 distributions initiales différentes des effectifs des 6 stratégies. Les 18 trajectoires sont dessinées sur la même figure par la méthode barycentrique dont voici le principe. Pour k stratégies, nous plaçons k points sur un cercle aux sommets d'un polygone régulier à k sommets. Chaque sommet représente une stratégie. La répartition des effectifs d'une génération détermine un point à l'intérieur

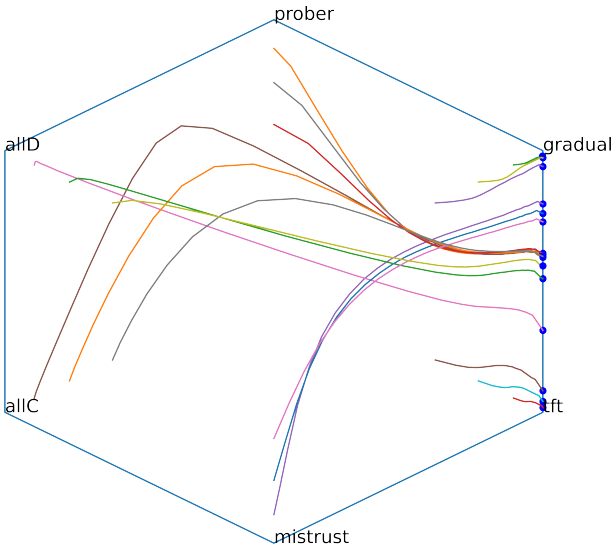
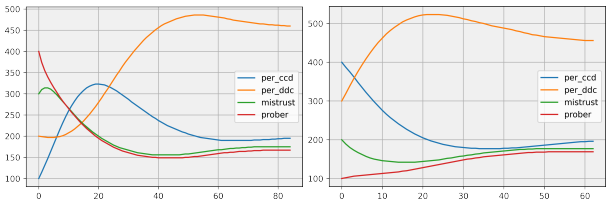


FIGURE 1 – Convergence vers la coopération généralisée. Dix-huit trajectoires évolutives du modèle individualiste conduisant à dix-huit états de coopération généralisée presque tous différents.

du polygone qui est le barycentre des k sommets affectés des effectifs respectifs des stratégies. En joignant les points successifs obtenus lors d'une simulation évolutionnaire, la variation des effectifs de l'arène produit une courbe à l'intérieur du polygone. Il s'agit d'une projection en dimension 2 d'une courbe dans un espace de dimension k. S'il y a stabilisation la courbe s'arrête en un point intérieur au polygone ou à sa frontière, qui est marqué par un rond. Dans un tel schéma, on peut dessiner plusieurs trajectoires évolutives correspondant à plusieurs distributions initiales différentes des effectifs. On voit alors en observant les trajectoires dessinées et leurs points d'arrivée, si l'état stabilisé est unique, ou s'il y en a plusieurs. La position des points d'arrêt des courbes donne des informations sur les états stables finaux. Dans la figure 1 on observe que toutes les trajectoires évolutives aboutissent sur le segment reliant `tft` et `gradual`, ce qui signifie qu'il ne reste dans l'état final stabilisé qu'un mélange de ces deux stratégies dans des proportions dépendant de la composition initiale de l'arène. À chaque fois il s'agit d'un état de coopération généralisée. Ce type de situations est fréquent comme le montre la table 1. Il est remarquable que même quand on part d'un point comme celui tout près de `allC` (qui correspond à une distribution des effectifs de 1000 pour `allC` et 20 pour les autres) la courbe d'évolution des effectifs se précipite sur la barre verticale à droite où `allC` a disparu et où ne subsistent que `tft` et `gradual`.

2.4 Attracteurs du modèle individualiste

Un phénomène plus rare que la convergence vers la coopération généralisée doit être remarqué : l'existence d'un état attracteur. Pour une large zone de points de départ, les trajectoires évolutives aboutissent exactement au même point d'équilibre.



(a) pop croissante (b) pop décroissante

FIGURE 2 – Pour un ensemble de 4 stratégies agressives, on calcule la simulation évolutionnaire individualiste en partant de 2 répartitions initiales différentes des effectifs. Ces deux évolutions conduisent au même état stabilisé (même proportion de chacune des stratégies) qui est donc un attracteur.

Comme pour la table 1, nous avons mené des expériences massives avec une large variété de familles de stratégies pour évaluer la fréquence de ce phénomène. La table 2 donne les résultats. Précisons que nous parlons d'état attracteur dans le sens précis suivant : on opère la simulation avec des nombres réels pendant 100 itérations, en partant d'effectifs de départ de 1000 pour une stratégie et 100 pour les autres ce qui fait k points de départ différents s'il y a k stratégies. Pour chacune des stratégies, on calcule l'écart-type de l'effectif final (mesurée en pourcentage). Si cet écart-type est pour chaque stratégie inférieur à 1/1000, on considère qu'il y a attracteur. Le calcul avec des nombres entiers donnerait un résultat équivalent.

k	4	5	6	7	8	9	10	Avg
bag20	4.6	1.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
bag25	6.9	2.4	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	1.5
Mem11	37.9	27.0	19.1	12.0	9.5	5.2	4.6	16.5
Mem12	39.6	27.9	19.9	13.8	12.6	9.2	6.4	18.5
Mem21	39.7	27.6	23.3	20.0	15.5	12.1	8.8	21.0
Avg	25.7	17.2	12.6	9.2	7.5	5.3	4.0	**11.7**

TABLE 2 – Probabilité d'existence d'un attracteur pour le modèle individualiste.

On note les points suivants.

— Avec les stratégies les plus simples et les plus performantes mises dans `bag20` et `bag25` la présence d'un attracteur est assez rare et décroissante quand on considère des familles de stratégies de taille croissante.

— La présence d'attracteurs devient plus importante quand la proportion de stratégies agressives devient importante et quand un faible nombre de stratégies est mis dans l'arène.

Un exemple de cette situation est donné aux figures 2 et 3. Cette fois toutes les trajectoires aboutissent au même point qui est donc un attracteur pour un large bassin d'attraction. Le point attracteur n'est pas un point de coopération généralisée mais un point où s'établit un équilibre entre chacune des quatre stratégies.

©AFIA2021

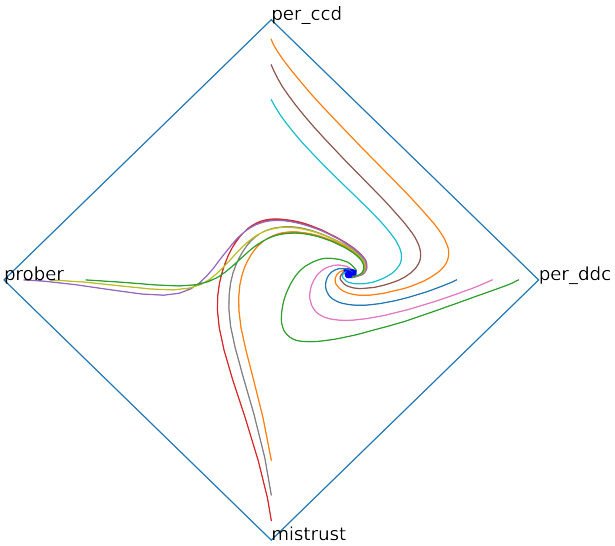


FIGURE 3 – Nous avons repris les 4 stratégies de la figure 2 et nous avons dessiné par la méthode de représentation barycentrique 12 trajectoires évolutives de la simulation évolutionnaire individualiste selon un schéma analogue à celui utilisé pour la figure 1.

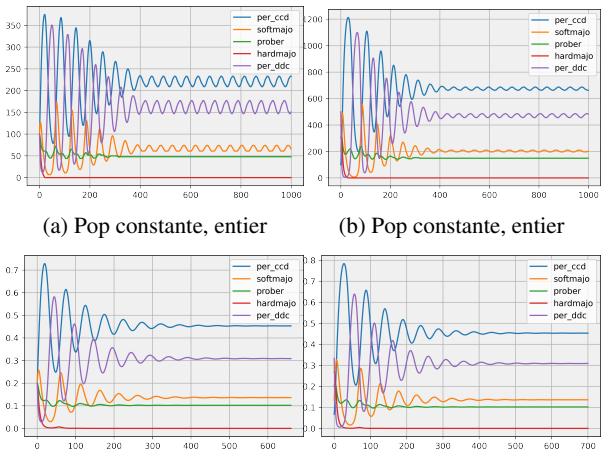
2.5 Non convergence et oscillations

Pour certaines distributions initiales des stratégies dans l'arène la dynamique évolutive est chaotique avant d'aboutir à un schéma périodique. Les figures 4 et 5 donnent un exemple de cette situation délicate où le calcul avec des entiers produit une dynamique non convergente périodique alors que les calculs avec des réels donnent une dynamique d'oscillations amorties. Le calcul avec des entiers conduit à une situation périodique qui comme on le voit dépend des effectifs initiaux pour la forme exacte des oscillations, mais ne dépend pas des effectifs initiaux pour le niveau moyen auquel arrivent chaque effectif de stratégie. Le même calcul avec des nombres réels conduit à des oscillations amorties où on retrouve les niveaux moyens des cas périodiques. On peut parler d'un attracteur qui ne se manifeste pleinement qu'avec le calcul avec des nombres réels, et que les problèmes d'arrondi dans le cas des calculs avec des nombres entiers transforme en ce qu'on pourrait appeler un attracteur périodique.

3 Le modèle communautaire

3.1 Communautés solidaires

Le modèle déterministe évolutionnaire communautaire (ou modèle communautaire) prend en compte l'idée que les individus qui dans l'arène de rencontre jouent la même stratégie peuvent être considérés comme appartenant à un même groupe (ou communauté) et qu'en conséquence ils ne s'affrontent pas entre eux. Chaque membre de la communauté des individus qui par exemple jouent `tft` rencontrera tous les individus jouant d'autres stratégies (c'est-à-dire appartenant à d'autres communautés) mais ne rencontrera pas les individus jouant `tft`.



(a) Pop constante, entier (b) Pop constante, entier

(c) Pop constante, réel (d) Pop croissante, réel

FIGURE 4 – Le modèle individualiste donne un état limite différent selon qu'on opère le calcul avec des entiers ou des réels.

Pour les équations décrivant le modèle, le calcul de l'évolution se fait avec les mêmes méthodes que précédemment sauf qu'au lieu de prendre la matrice des rencontres $Scores$ comme base des calculs, on procède à la mise à 0 de la diagonale, ce qui a pour effet d'annuler les gains en points qu'un individu jouant une stratégie s obtient en rencontrant les membres de sa communauté (les autres individus jouant s). Cette annulation de la diagonale revient au même que de ne pas faire se rencontrer entre eux les membres d'une même communauté. Comme précédemment le calcul peut se faire avec des nombres réels ou avec des nombres entiers.

3.2 Justification du modèle communautaire

Le modèle communautaire représente d'une façon plus satisfaisante les situations rencontrées dans le monde vivant que le modèle individualiste. En effet, dans le monde vivant les individus d'une même espèce savent se reconnaître et composer des groupes solidaires, et c'est bien évidemment encore plus vrai des membres d'un même troupeau, d'une même famille, etc. Dans le monde des sociétés humaines, le même type de remarques s'applique. Les individus humains s'opposent et sont en compétition entre eux, mais les membres d'une même communauté (tribu, armée, nation, etc.) sont solidaires et ne combattent que les individus des autres communautés. Les dynamiques observées avec les simulations évolutionnaires communautaires sont assez différentes de celles observées dans le cas individualiste. On rencontre beaucoup moins souvent la convergence vers la coopérations généralisée (voir le table 3), et bien plus fréquemment la présence d'un attracteur avec un vaste bassin d'attraction (voir la table 4).

Alors que dans le cas individualiste on a une convergence vers la coopération généralisée dans plus de 76% des cas sur les 7000 simulations effectuées avec `bag20` et de 64% pour les 56.000 simulations effectuées au total, ces pour-

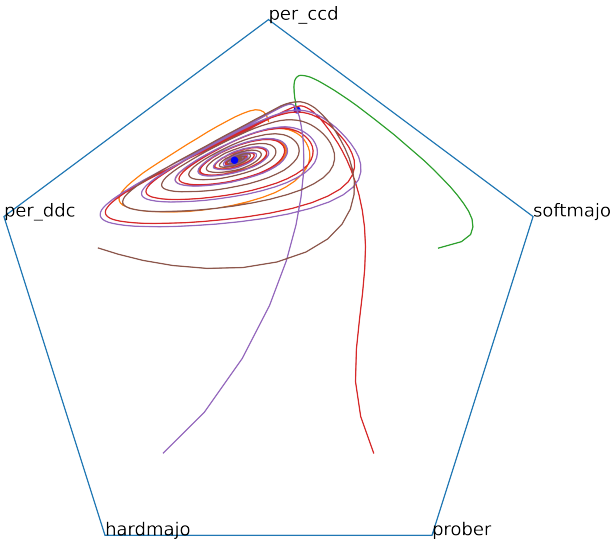


FIGURE 5 – À partir des mêmes stratégies que la figure précédente, représentation barycentrique avec un calcul utilisant des entiers. Avec des réels, l'image est quasiment identique.

centages sont maintenant seulement de 22% et de 21.3%. L'inverse se produit concernant l'existence d'attracteurs. Alors que dans le cas individualiste on ne trouve d'attracteur que dans 0.8% des cas sur les 7000 simulations effectuées avec `bag20` et dans 11.7% pour les 56000 simulations, ces pourcentages sont maintenant de 81.4% et 90.8%

k	4	5	6	7	8	9	10	Avg
bag20	25.8	24.1	23.3	20.3	19.4	19.9	21.5	22.0
bag25	21.8	22.3	23.5	21.2	23.6	24.2	24.1	23.0
Mem11	1.0	1.2	0.9	0.3	0.6	1.0	0.6	0.8
Mem12	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
Mem21	0.3	0.1	0.0	0.3	0.1	0.4	0.1	0.2
Mem11+	56.9	52.1	50.3	46.7	43.3	42.5	40.7	47.5
Mem12+	54.4	47.9	41.5	38.3	35.7	33.4	29.6	40.1
Mem21+	52.3	45.5	38.3	36.1	30.8	28.2	25.6	36.7
Avg	26.6	24.2	22.3	20.4	19.2	18.7	17.8	**21.3**

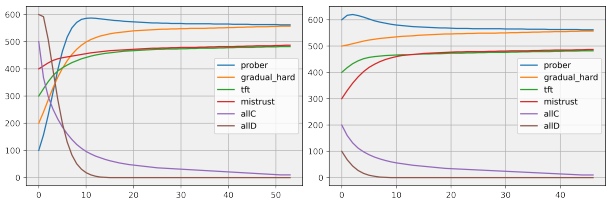
TABLE 3 – Probabilité de la convergence vers la coopération généralisée pour le modèle communautaire

k	4	5	6	7	8	9	10	Avg
bag20	99.3	98.1	92.0	86.8	76.3	62.5	55.0	81.4
bag25	99.4	96.2	92.2	88.4	81.8	76.2	68.4	86.1
Mem11	99.7	99.5	98.6	96.8	95.4	92.8	90.6	96.2
Mem12	99.6	98.9	96.4	96.5	92.9	88.9	82.2	93.6
Mem21	99.9	99.8	99.0	97.8	96.3	93.9	90.6	96.8
Avg	99.6	98.5	95.6	93.3	88.5	82.9	77.4	**90.8**

TABLE 4 – Probabilité d'existence d'un attracteur pour le modèle communautaire

4 Conclusion

Les simulations évolutionnaires déterministes individualistes (où chaque individu rencontre tous les individus, même ceux jouant la même stratégie que lui) et les simulations déterministes évolutionnaires communautaires (où les individus ne rencontrent pas les individus jouant la même



(a) Pop croissante (b) Pop décroissante

FIGURE 6 – Un exemple d'attracteur pour le cas communautaire.

stratégie qu'eux-mêmes) donnent des dynamiques sensiblement différentes.
Il y a très fréquemment convergence vers la coopération généralisée pour le modèle individualiste et nettement moins souvent pour le modèle communautaire. Le modèle individualiste est en quelque sorte intransigeant : les individus qui persistent à avoir une attitude agressive n'ont, dans la majorité des cas, pas leur place dans l'état final stabilisé. Le modèle communautaire permet lui plus facilement la mise en place d'états stabilisés où les groupes qui s'opposent ont les uns contre les autres des attitudes non totalement pacifiées. Le modèle communautaire apparaît donc plus proche à la fois dans sa définition et pour les états stables qu'il induit de la réalité du monde biologique où la persistance indéfinie de comportements agressifs des diverses espèces (identifiables à nos communautés) semble la règle. Cette observation peut sembler paradoxale puisque l'individualisme conduit avec une sévérité extrême à l'élimination de ceux qui n'acceptent pas de renoncer aux comportements agressifs. On peut au contraire la trouver naturelle : l'existence de communautés permet à des dynamiques plus subtiles de se mettre en place autorisant la survie d'une variété plus grande de comportements et des équilibres plus complexes comme on les observe dans la nature.
Avec le modèle communautaire, l'existence fréquente d'attracteurs est inattendue. Il y a un équilibre prédéterminé entre les différentes communautés, et quels que soient les effectifs initiaux (ou en tout cas pour un large ensemble de distributions de départ) l'arène évolue vers cet équilibre prédéterminé. Cette observation est importante et avec la première observation sur la fréquence de la convergence vers la coopération généralisée, elle renforce l'idée que le modèle communautaire devrait être pris plus au sérieux qu'il ne l'a été jusqu'à présent. Les états stables vers lesquels tendent les simulations communautaires se reconstituent quand une force (aléatoire ou autre) les en écarte. Ces états stables sont donc bien plus résistants et robustes aux perturbations que ceux atteints par les simulations individualistes qui eux peuvent dériver si on les soumet à des perturbations mêmes légères.

Références

[1] Christoph Adami and Arend Hintze. Evolutionary instability of zero-determinant strategies demonstrates that winning is

©AFIA2021

not everything. *Nature communications*, 4(2193), 2013.

[2] Ethan Akin. The iterated prisoner's dilemma : good strategies and their dynamics. *Ergodic Theory, Advances in Dynamical Systems*, pages 77–107, 2016.

[3] Robert Axelrod. *The evolution of cooperation : revised edition*. Basic books, 1984 , 2006.

[4] Robert Axelrod. *The complexity of cooperation : Agent-based models of competition and collaboration*, volume 3. Princeton University Press, 1997.

[5] Robert Axelrod and William Donald Hamilton. The evolution of cooperation. *science*, 211(4489) :1390–1396, 1981.

[6] Bruno Beaufils, Jean-Paul Delahaye, and Philippe Mathieu. Our meeting with gradual, a good strategy for the iterated prisoner's dilemma. In *ALIFE'5*, pages 202–209. The MIT Press/Bradford Books, 1996.

[7] Bruno Beaufils, Jean-Paul Delahaye, and Philippe Mathieu. Complete classes of strategies for the classical iterated prisoner's dilemma. In *EP'7 proc.*, volume 1447 of *LNCS*, pages 33–41. Springer, 1998.

[8] Jonathan Bendor and Piotr Swistak. Types of evolutionary stability and the problem of cooperation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(8) :3596–3600, 1995.

[9] Jonathan Bendor and Piotr Swistak. The evolutionary stability of cooperation. *American Political Science Review*, 91(2) :290–307, 1997.

[10] Jean-Paul Delahaye and Philippe Mathieu. Random strategies in a two levels iterated prisoner's dilemma : How to avoid conflicts. In *ECAI proc.*, volume 96, pages 68–72, 1996.

[11] Jean-Paul Delahaye and Philippe Mathieu. Méta-stratégies pour le dilemme itéré du prisonnier. In *JFSMA*, pages 13–22. Cépaduès, 2016.

[12] Jean-Paul Delahaye and Philippe Mathieu. Que valent les stratégies probabilistes au dilemme itéré des prisonniers ? In *JFSMA*, pages 41–51. Cépaduès, 2017.

[13] Jeffrey A Fletcher and Martin Zwick. Unifying the theories of inclusive fitness and reciprocal altruism. *The American Naturalist*, 168(2) :252–262, 2006.

[14] Nikoleta E Glynatsi and Vincent A Knight. A meta analysis of tournaments and an evaluation of performance in the iterated prisoner's dilemma. *arXiv*, 2020.

[15] Christian Hilbe, Torsten Röhl, and Manfred Milinski. Extortion subdues human players but is finally punished in the prisoner's dilemma. *Nature communications*, 5(1) :1–6, 2014.

[16] Christian Hilbe, Arne Traulsen, and Karl Sigmund. Partners or rivals ? strategies for the iterated prisoner's dilemma. *Games and economic behavior*, 92 :41–52, 2015.

[17] Luis R Izquierdo, Segismundo S Izquierdo, and J Gary Polhill. Evo-2x2 : a modelling framework to study the evolution of strategies in 2x2 symmetric games under various competing assumptions. 2008.

[18] Graham Kendall, Xin Yao, and Siang Yew Chong. *The Iterated Prisoners' Dilemma : 20 Years on*. World Scientific Publishing Co., Inc., 2007.

[19] Jie Liu, Y Li, C Xu, and PM Hui. Evolutionary behavior of generalized zero-determinant strategies in iterated prisoner's dilemma. *Physica A*, 430 :81–92, 2015.

[20] Philippe Mathieu, Bruno Beaufils, and Jean-Paul Delahaye. Studies on dynamics in the classical iterated prisoner's dilemma with few strategies : Is there any chaos in the pure dilemma ? In *AE proc.*, volume 1829 of *LNCS*, pages 177–190. Springer, 1999.

[21] Philippe Mathieu and Jean-Paul Delahaye. Winning strategies for the iterated prisoner's dilemma. In *AAMAS proc.*, pages 1665–1666, 2015.

[22] Philippe Mathieu and Jean-Paul Delahaye. New winning strategies for the iterated prisoner's dilemma. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, 20(4) :12, 2017.

[23] Philippe Mathieu and Jean-Paul Delahaye. Experimental criteria to identify efficient probabilistic memory-one strategies for the ipd. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 97 :101946, 2019.

[24] Manfred Milinski, Christian Hilbe, Dirk Semmann, Ralf Sommerfeld, and Jochem Marotzke. Humans choose representatives who enforce cooperation in social dilemmas through extortion. *Nature communications*, 7(1) :1–9, 2016.

[25] Martin Nowak and Karl Sigmund. Chaos and the evolution of cooperation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(11) :5091–5094, 1993.

[26] Martin Nowak and Karl Sigmund. A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the prisoner's dilemma game. *Nature*, 364(6432) :56–58, 1993.

[27] Martin A Nowak. *Evolutionary dynamics : exploring the equations of life*. Harvard university press, 2006.

[28] Brendan O'Connor, Noah Mark, and James Fearon. The social evolution of human cooperation via group competition and conflict. 2006.

[29] Tadeusz PŁatkowski. Cooperation in two-person evolutionary games with complex personality profiles. *Journal of theoretical biology*, 266(4) :522–528, 2010.

[30] William H. Press and Freeman J. Dyson. Iterated prisoner's dilemma contains strategies that dominate any evolutionary opponent. *PNAS*, 109(26) :10409–10413, 2012.

[31] Karl Sigmund. *The calculus of selfishness*. Princeton University Press, 2016.

[32] Alexander J Stewart and Joshua B Plotkin. From extortion to generosity, evolution in the iterated prisoner's dilemma. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(38) :15348–15353, 2013.

[33] Attila Szolnoki and Matjaž Perc. Evolution of extortion in structured populations. *Physical Review E*, 89(2) :022804, 2014.

[34] Jianzhong Wu and Robert Axelrod. How to cope with noise in the iterated prisoner's dilemma. *Journal of Conflict resolution*, 39(1) :183–189, 1995.

Trouver un équilibre de Nash mixte algébrique dans les jeux sous forme normale et succincts

H. Fargier[1], P. Jourdan[1,2], R. Sabbadin[2]

[1] IRIT, Université de Toulouse, Toulouse, France
[2] INRAE, Université de Toulouse, UR MIAT, Castanet-Tolosan, France

helene.fargier@irit.fr, {paul.jourdan, regis.sabbadin}@inrae.fr

Résumé

Cet article présente une approche combinatoire pour le calcul exact d'équilibres de Nash dans les jeux à N joueurs, basée sur l'utilisation de nombres algébriques. Cette nouvelle approche est une version algébrique et combinatoire de l'algorithme géométrique proposé par Wilson. Nous fournissons des preuves modernes et "constructives" des résultats de Wilson, permettant d'exploiter des outils logiciels de calcul de bases de Gröbner et de variétés algébriques, disponibles dans des librairies mathématiques efficaces. Nous montrons que notre méthode s'applique également aux jeux hypergraphiques. De plus, le gain en taille de représentation permet une limitation de la complexité au pire cas de l'algorithme.

Mots-clés

Théorie des jeux, Équilibres de Nash, Systèmes polynomiaux

Abstract

This paper presents a combinatorial approach to compute algebraic number representations of exact mixed Nash equilibria in N-person games. This approach is an algebraic, combinatorial version of Wilson's geometric algorithm. The modern and constructive proofs of Wilson's results we provide allow one to exploit algebraic tools, available in efficient mathematic librairies, for computing Groebner bases and varieties. Applying this method to hypergraphical games, we show that the decrease of the size of the representation comes along with a limitation of the worst-case complexity of the algorithm.

Keywords

Game theory, Nash equilibria, polynomial systems

1 Introduction

La méthode géométrique de parcours de chemin proposée par Wilson [20], qui étend l'algorithme de résolution de jeux à deux joueurs de Lemke-Howson [15], permet théoriquement de calculer un équilibre de Nash mixte pour un jeu à N joueurs. Cependant, bien que des implémentations de l'algorithme de Lemke-Howson existent pour les jeux bimatriciels et polymatriciels [13], l'approche de Wilson n'a pas encore mené à un algorithme implémentable pour les jeux à N joueurs. Wilson a montré que trouver un équilibre de Nash mixte revient à trouver une solution à un *Problème de Complémentarité Polynomiale (PCP)* et a suggéré une description mathématique de la résolution des PCP *non dégénérés*. La description de Wilson [20] est informelle et quelques étapes ne sont pas définies. Comme indiqué par l'auteur, dès qu'il y a plus de 2 joueurs, l'étape principale de l'algorithme (le parcours d'arc) : *"requires the solution of a set of simultaneous multi-linear equations (...) which is by no means a trivial presumption"*.

Dans cet article, nous proposons une approche combinatoire, basée sur des principes de géométrie algébrique, pour calculer un équilibre de Nash mixte exact, sous la forme d'un nombre algébrique, dans un jeu à N joueurs sous forme normale [17]. Pour ceci, nous transformons la méthode de parcours de chemin géométrique de Wilson en un algorithme algébrique et combinatoire, et nous proposons une présentation moderne et constructive des résultats de correction de la méthode de Wilson. Dans la procédure de parcours de chemin que nous proposons, les coordonnées des nœuds sont des nombres algébriques, c'est-à-dire sont représentées implicitement par des racines d'un polynôme univarié à coefficients rationnels (ou algébriques eux-mêmes). Ceci permet d'exploiter des logiciels de géométrie algébrique (SINGULAR) pour effectuer les étapes les plus difficiles de l'algorithme.

Dans la section 2, nous présentons la formulation, de Wilson [20] du problème de recherche d'équilibre de Nash en un *Problème de Complémentarité Polynomiale (PCP)*. La section 3 présente un algorithme original de parcours de chemin permettant de résoudre le PCP obtenu. La section 4 illustre cette méthode sur un jeu à trois joueurs. Finalement, la section 5, présente une extension de notre algorithme aux jeux graphiques [14] et hypergraphiques [18].

2 Jeux à N joueurs et problèmes de complémentarité polynomiale

Considérons un jeu à N joueurs $\Gamma^N = (P, \pi, a)$. $P = \{1, \ldots, N\}$ est l'ensemble des joueurs, $\pi = S_1 \times \ldots \times S_N$ est l'ensemble des stratégies jointes pures du jeu (S_n est l'ensemble des stratégies pures du joueur $n \in P$). a^n_ω est la

©AFIA2021

désutilité, strictement positive [1], reçue par le joueur n quand la stratégie jointe pure est $\omega \in \pi$. $a = (a^n_\omega)_{\omega\in\pi,n\in P}$ est la matrice de désutilités, ayant $|\pi| = \prod_{i=1..N} |S_i|$ lignes et N colonnes.
Une stratégie mixte du joueur n, $\xi^n = (\xi^n_i)_{i\in S_n}$, est une distribution de probabilité sur les stratégies pures de n. Une stratégie mixte jointe est un N-uplet $\xi = (\xi^n)_{n\in P}$ de stratégies mixtes.
Un équilibre de Nash mixte d'un jeu Γ^N est défini par :

Definition 1 (Équilibre de Nash) *Pour un jeu $\Gamma^N = (P, \pi, a)$. Une stratégie jointe mixte $\xi = (\xi^n_i)_{n\in P,i\in S_n}$ est un équilibre de Nash mixte de Γ^N si et seulement si :*

$$ED_n[\xi] \leq ED_n[(\bar{\xi}^n, \xi^{-n})], \forall \bar{\xi}^n \neq \xi^n, \forall n = 1, \ldots, N,$$

$$\text{où } ED_n[\xi] =_{def} \sum_{\omega=(\omega_1,\ldots,\omega_n)\in\pi} a^n_\omega \prod_{i=1}^{N} \xi^i_{\omega_i},$$

et $(\bar{\xi}^n, \xi^{-n})$ est la stratégie jointe mixte où la stratégie mixte ξ^n a été remplacée par la stratégie mixte $\bar{\xi}^n$.

$ED_n[\xi]$ est l'espérance mathématique de la désutilité obtenue par le joueur n lorsque la stratégie jointe mixte ξ est adoptée. En d'autres mots, un équilibre de Nash mixte est une stratégie jointe mixte pour laquelle aucun joueur ne peut diminuer sa désutilité espérée en changeant unilatéralement sa propre stratégie mixte.
Wilson [20] montre qu'il est possible de calculer un équilibre de Nash en résolvant un *Problème de Complémentarité polynomiale (PCP)*, que nous allons décrire. Dans ce PCP, une stratégie mixte du joueur n est indirectement représentée par un vecteur de réels non-négatifs, $x^n = \{x^n_i, i \in S_n\}$. $x = (x^n_i)_{n\in P,i\in S_n}$ représente indirectement une stratégie jointe mixte. x^n n'est pas une distribution de probabilité, mais nous construirons une distribution de probabilité associée en normalisant x^n.
Définissons les polynômes multilinéaires suivants :

$$A^n_i(x^{-n}) = \sum_{\substack{\omega\in\pi \\ \omega_n=i}} a^n_\omega \prod_{\nu\neq n} x^\nu_{\omega_\nu}, \forall n \in P, i \in S_n \quad (1)$$

$$A^n(x) = \sum_{i\in S_n} A^n_i(x^{-n}) x^n_i, \forall n \in P, \quad (2)$$

où, par définition, $x^{-n} = (x^\nu_i)_{\nu\in P\setminus\{n\},i\in S_\nu}$.
Quand x^n est normalisé, c.à.d quand $x^n = \xi^n$ est une stratégie mixte, $A^n(\xi)$ est la désutilité espérée obtenue par le joueur n sous la stratégie jointe ξ et $A^n_i(\xi^{-n})$ est celle obtenue quand seul n dévie de sa stratégie mixte ξ^n en choisissant la stratégie pure $i \in S_n$.

Definition 2 (Problème de complémentarité polynomiale) *Soit $\Gamma^N = (P, \pi, a)$ un jeu sous forme normale. Le problème de complémentarité polynomiale correspondant est le système d'équations/inéquations suivant, pour les variables réelles $(x^n_i)_{n\in P,i\in S_n}$:*

$$\forall (n,i) \in I_N, \begin{cases} x^n_i & \geq & 0 \\ A^n_i(x^{-n}) & \geq & 1 \\ x^n_i \cdot (A^n_i(x^{-n}) - 1) & = & 0 \end{cases} \quad (\mathcal{S}^N)$$

où $I_N =_{def} \{(n,i), 1 \leq n \leq N, i \in S_n\}$.

$D = |I_N|$ est le nombre de variables x^n_i. Le problème $(\mathcal{S}^N)$ est appelé *problème de complémentarité polynomiale* [10] car nous cherchons une solution non négative x satisfaisant, pour tout $(n,i) \in I_N$, soit $x^n_i = 0$, soit $A^n_i(x^{-n}) = 1$ (complémentarité) et les $A^n_i(x^{-n})$ sont des polynômes multivariés de variables $(x^n_i)_{n\in P,i\in S_n}$.
Dans un jeu à deux joueurs ($N = 2$), on peut vérifier que $A^n_i(x^{-n})$ est une fonction linéaire pour tout (n,i). Le problème $(\mathcal{S}^2)$ est alors un *Problème de Complémentarité Linéaire* [15].
Une solution $x = (x^n_i)$ du PCP peut être normalisée afin d'obtenir un ensemble de distributions de probabilité $\xi = (\xi^n_i)$. Wilson [20] montre l'équivalence entre les équilibres de Nash d'un jeu et les solutions du PCP correspondant :

Proposition 1 (Équivalence NE/PCP [20]) *Soit Γ^N un jeu à N joueurs et $(\mathcal{S}^N)$ sa transformation en PCP. Les équilibres de Nash de Γ et les solutions de $(\mathcal{S}^N)$ sont en bijection :*

1. *Soit x, solution de $(\mathcal{S}^N)$. ξ définie par, $\forall (n,i) \in I_N$ $\xi^n_i = \frac{x^n_i}{\sum_{j\in S_n} x^n_j}$, est un équilibre de Nash de Γ^N.*
2. *Soit ξ, un équilibre de Nash mixte de Γ^N et*

$$x^n_i = \left(\frac{\prod_{\nu\neq n} A^\nu(\xi)}{A^n(\xi)^{N-2}}\right)^{\frac{-1}{N-1}} \xi^n_i, \forall (n,i) \in I_N.$$

$x = (x^n_i)_{n\in P,i\in S_n}$ est une solution de $(\mathcal{S}^N)$.

Une solution x d'un PCP est appelée un *nœud complémentaire*. Un point x est appelé *nœud (n,i)-presque complémentaire* s'il satisfait toutes les contraintes de $(\mathcal{S}^N)$, *à la possible exception* [2] d'une unique équation $x^n_i = 0 \cdot (A^n_i(x^{-n}) - 1) = 0$.
Chercher un équilibre de Nash mixte dans un jeu Γ^N revient donc à chercher une solution du PCP $(\mathcal{S}^N)$. Wilson [20] a proposé une approche géométrique de *parcours de chemin* pour résoudre un PCP *non dégénéré*, étendant celle de Lemke-Howson [15]. La description de Wilson laisse quelques étapes de l'algorithme non définies. De plus, comme pointé par l'auteur, la principale étape de l'algorithme (le parcours d'arc) n'était pas implémentable à l'époque. Dans la section suivante, nous proposons une réécriture originale et opérationnelle de l'approche de Wilson.

1. Nous conservons la formulation proposée par Wilson, qui considère que les joueurs minimisent leur désutilité. Tout jeu de maximisation d'utilité peut être représenté par un jeu équivalent de minimisation de désutilité.

2. Ainsi, un nœud complémentaire est (n,i)-presque complémentaire pour toute paire (n,i).

3 Un algorithme combinatoire de résolution de PCP

La version revisitée que nous proposons (incluant le parcours d'arcs, bloc manquant de l'algorithme de Wilson) est basée sur une définition des nœuds, arcs et chemins presque-complémentaires en termes d'ensembles d'équations multilinéaires. Nous détaillons ces définitions ci dessous (Section 3.1). Puis, nous montrons comment ces chemins peuvent être étendus à travers plusieurs niveaux de sous-PCP (Sections 3.2 et 3.3). La section 3.4 est dédiée au problème du parcours d'arc et l'algorithme de résolution du PCP complet est décrit dans la section 3.5.

3.1 Nœuds, arcs, chemins presque-complémentaires

Considérons un PCP $(\mathcal{S}^N)$. $\mathcal{D}^N$ est l'ensemble des points x satisfaisant l'ensemble des inéquations du PCP :

$$\mathcal{D}^N = \left\{ x = (x_i^n)_{(n,i)\in I_N}, x_i^n \geq 0,\ A_i^n(x^{-n}) \geq 1, \forall (n,i) \right\}.$$

Une solution x du PCP est un nœud *complémentaire* de $\mathcal{D}^N$. Donc, pour toute paire $(n,i) \in I_N$, nous avons soit $x_i^n = 0$, soit $A_i^n(x^{-n}) = 1$. Pour tout point $x \in \mathcal{D}^N$, nous écrivons $Z(x) = \{(n,i) \in I_N, x_i^n = 0\}$ et $W(x) = \{(n,i) \in I_N, A_i^n(x^{-n}) = 1\}$. Par définition, $x \in \mathcal{D}^N$ est une solution de $(\mathcal{S}^N)$ si et seulement si $Z(x) \cup W(x) = I_N$. Un *PCP non dégénéré au niveau* N est défini par :

Definition 3 (PCP non-dégénéré) *Le PCP $(\mathcal{S}^N)$ est non dégénéré au niveau N si et seulement si :*

1. *Aucun point de $\mathcal{D}^N$ ne satisfait plus de $|I_N|$ équations.*
2. *Aucune paire de points distincts de $\mathcal{D}^N$ ne satisfait le même ensemble de $|I_N|$ équations.*

En termes mathématiques, la condition 1 est équivalente à

$$\forall x \in \mathcal{D}^N, |Z(x)| + |W(x)| \leq D = |I_N|$$

et la condition 2 est équivalente à : $\forall x, y \in \mathcal{D}^N$,

$$\left.\begin{array}{rcl} Z(x) = Z(y) & = & Z \\ W(x) = W(y) & = & W \\ |Z| + |W| & = & |I_N| \end{array}\right\} \Rightarrow x = y. \qquad (3)$$

Intuitivement, un PCP est non-dégénéré lorsqu'aucune de ses contraintes polynomiales n'est redondante. A partir de maintenant, nous supposons la non dégénérescence du PCP. Nous définissons également la notion de *nœud presque-complémentaire* :

Definition 4 (Nœud presque-complémentaire) *$x \in \mathcal{D}^N$ est un nœud presque-complémentaire de $(\mathcal{S}^N)$, si et seulement si : $|Z(x)| + |W(x)| = |I_N|$ et $|Z(x) \cap W(x)| \leq 1$.*

En particulier, un nœud presque-complémentaire est complémentaire si $Z(x) \cup W(x) = I_N$ et (n,i)-presque complémentaire si $(n,i) \notin Z(x) \cup W(x)$. Si $(\mathcal{S}^N)$ est non dégénéré, un nœud presque-complémentaire de $\mathcal{D}^N$ est représentable par une unique paire $Z, W \subseteq I_N$ vérifiant $|Z| + |W| = |I_N|$ et $|Z \cap W| \leq 1$ et telle que x satisfait le système :

$$\left\{ \begin{array}{rl} & x \in \mathcal{D}^N, \\ x_i^n = 0, & \forall (n,i) \in Z, \\ A_i^n(x^{-n}) = 1, & \forall (n,i) \in W. \end{array} \right. \qquad (\mathcal{S}^{Z,W})$$

Pour toute paire $(Z,W) \subseteq I_N$ telle que le système $(\mathcal{S}^{Z,W})$ admet une solution, nous notons $\rho(Z,W)$ cette solution (unique puisque le PCP est non-dégénéré). Définissons également un arc (n,i)-presque complémentaire :

Definition 5 (Arc presque complémentaire) *Considérons un PCP $(\mathcal{S}^N)$ non dégénéré. Pour toute paire $(Z,W) \subseteq I_N$ telle que $Z \cap W = \emptyset$ et $Z \cup W = I_N \setminus \{(n,i)\}$, notons $\gamma(Z,W)$, l'ensemble des points satisfaisant le système d'équation $(\mathcal{S}^{Z,W})$. Si il est non-vide, $\gamma(Z,W)$ est appelé* arc (n,i)-presque complémentaire *du PCP $(\mathcal{S}^N)$.*

Si le PCP est non-dégénéré et si $\gamma(Z,W)$ n'est pas vide, $\gamma(Z,W)$ est inclus dans l'ensemble des solutions d'un système de $D-1$ équations à D variables. La non dégénérescence implique que cet ensemble est de dimension 1 et qu'il peut être paramétré par un unique paramètre réel.
Remarque : Les points extrêmes de $\gamma(Z,W)$ appartiennent à la frontière de $\mathcal{D}^N$ et sont donc des nœuds presque-complémentaires. Un arc presque-complémentaire possède au maximum deux points extrêmes.
L'approche de [20] consiste intuitivement à suivre un chemin unidimensionnel dans $\mathcal{D}^N$, constitué d'arcs et nœuds presque-complémentaires partant d'un nœud initial (décrit plus loin) jusqu'à atteindre un nœud complémentaire, solution du PCP. Cette approche est fondée sur la proposition suivante :

Proposition 2 (Arcs voisins d'un nœud) [3] *Soit $(\mathcal{S}^N)$ un PCP non dégénéré et $\rho(Z,W)$ un nœud presque complémentaire. $\rho(Z,W)$ possède deux arcs voisins : $\gamma(Z \setminus W, W)$ et $\gamma(Z, W \setminus Z)$. Si $\rho(Z,W)$ est complémentaire, un seul de ces deux arcs est borné, alors que les deux sont bornés si il n'est pas complémentaire.*
Un arc est non borné lorsqu'il n'est voisin que d'un nœud.

La proposition 2 implique la proposition suivante :

Proposition 3 (Chemin fini) *Soit $(\mathcal{S}^N)$, un PCP non dégénéré et $\rho(Z,W)$, un nœud complémentaire de $(\mathcal{S}^N)$. Soit également $i \in S_N$. Il existe un unique chemin, constitué d'un nombre fini de nœuds et arcs (N,i)-presque complémentaires, dont une extrémité est $\rho(Z,W)$.*

La proposition 3 ne nous dit rien a propos de l'autre extrémité du chemin. Celui-ci peut aussi bien se terminer par un autre nœud complémentaire que par un arc (N,i)-presque complémentaire non borné.
Dans la suite, nous allons voir comment cet unique chemin peut être étendu à travers plusieurs "niveaux" de PCP dérivés du PCP initial, jusqu'à ce qu'il atteigne un nœud *originel*, facile à calculer.

3. Nos preuves sont disponibles (en Anglais) ici : https://figshare.com/s/230ec6a0a3c4a869db8f.

©AFIA2021

3.2 Séquence de PCP sur différents niveaux

Considérons un PCP $\left(\mathcal{S}^N\right)$ obtenu à partir d'un jeu Γ^N, une stratégie jointe arbitraire $\omega^0 = (\omega_1^0, \ldots, \omega_N^0)$ de Γ^N, deux entiers $1 \leq n \leq k \leq N$ et une stratégie pure $i \in S_n$. Nous écrivons $A_i^{n,k}\left(x^{\{1,..,k\}\setminus\{n\}}\right)$ le polynôme multivarié obtenu à partir $A_i^n(x^{-n})$ en fixant toute les valeurs x_j^ν à 0 lorsque $\nu > k$ et $j \neq \omega_\nu^0$ et à 1 lorsque $\nu > k$ et $j = \omega_\nu^0$:

$$A_i^{n,k}\left(x^{\{1,..,k\}\setminus\{n\}}\right) = \sum_{\substack{\omega\in\pi,\omega_n=i \\ \omega_m=\omega_m^0,\forall m>k}} a_\omega^n \prod_{\substack{\nu\leq k, \\ \nu\neq n}} x_{\omega_\nu}^\nu. \quad (4)$$

$A_i^{n,k}$ est un polynôme multilinéaire de degré $k-1$. Notons que si ξ est une stratégie jointe mixte de Γ^N, $A_i^{n,k}\left(\xi^{\{1,..,k\}\setminus\{n\}}\right)$ est la désutilité espérée du joueur n jouant l'action $i \in S_n$ quand les joueurs $1, \ldots, k$, à l'exception de n, jouent leur stratégie mixte dans ξ et les joueurs $j \in \{k+1, \ldots, N\}$ jouent leur stratégie pure ω_j^0.
Alors, à partir du PCP $\left(\mathcal{S}^N\right)$, nous pouvons définir la séquence suivante de sous-PCP $\left(\mathcal{S}^k\right)$, pour $k = 1, \ldots, N-1$:

Definition 6 (Sous-PCP) *Soit $\left(\mathcal{S}^N\right)$ un PCP donné. Pour tout $1 \leq k \leq N$, $I_k = \{(n,i), 1 \leq n \leq k, i \in S_n\}$ et $D_k = |I_k|$ (ainsi $D = D_N$). Nous définissons le sous-PCP $\left(\mathcal{S}^k\right)$ comme le système d'équations/inéquations polynomiales multilinéaires, de variables $(x_i^n)_{(n,i)\in I_k}$:*

$$\forall (n,i) \in I_k, \begin{cases} x_i^n & \geq & 0 \\ A_i^{n,k}\left(x^{\{1,..,k\}\setminus\{n\}}\right) & \geq & 1 \\ x_i^n \cdot \left(A_i^{n,k}\left(x^{\{1,..,k\}\setminus\{n\}}\right) - 1\right) & = & 0 \end{cases}$$

Pour $n = 1$, le PCP $(\mathcal{S}^1)$ est légèrement différent :

$$\begin{cases} x_i^1 & \geq & 0, \forall i \in S_1 \\ x_i^1 \cdot \left(\frac{a^1_{(i,\omega_{-1}^0)}}{\min_{j\in S_1} a^1_{(j,\omega_{-1}^0)}} - 1\right) & = & 0, \forall i \in S_1 \\ \sum_{i\in S_1} x_i^1 & = & 1 \end{cases}$$

Le sous-PCP $\left(\mathcal{S}^k\right)$ est construit à partir de $\Gamma^k(\omega^0)$, un jeu joué par les k premiers joueurs de Γ^N tandis que les autres joueurs jouent selon ω^0, de la même manière que $\left(\mathcal{S}^N\right)$ est construit à partir de Γ^N. Nous supposons que tous les sous-PCP $\left(\mathcal{S}^k\right)$ sont non-dégénérés. En particulier, supposer que $(\mathcal{S}^1)$ est non-dégénéré sous-entend que le minimum $\min_{j\in S_1} a^1_{(j,\omega_{-1}^0)}$ est atteint pour un seul indice j^*. Ainsi, nous obtenons facilement le nœud complémentaire au niveau 1, décrit par $Z^1 = S_1 \setminus \{j^*\}$ et $W^1 = \{j^*\}$. Au niveau $k \geq 2$, nous pouvons définir un système polynomial $\left(\mathcal{S}_k^{Z,W}\right)$ correspondant à $Z, W \subseteq I_k$:

$$\begin{cases} & x \in \mathcal{D}^k, \\ x_i^n = 0, & \forall (n,i) \in Z, \\ A_i^{n,k}(x^{\{1..k\}-\{n\}}) - 1 = 0, & \forall (n,i) \in W, \end{cases} \quad (\mathcal{S}_k^{Z,W})$$

où $\mathcal{D}^k$ est défini par les inéquations de la définition 6.

3.3 Nœuds complémentaires et initiaux

Nous pouvons exploiter le point de vue combinatoire de la séquence de systèmes d'équations présentée ci dessus pour concevoir un algorithme calculant une séquence de nœuds presque complémentaires jusqu'à ce qu'un nœud complémentaire soit atteint au niveau N.

Proposition 4 (Montée de niveau) *Soit $\left(\mathcal{S}^k\right)$ un sous-PCP de $\left(\mathcal{S}^N\right)$ au niveau $1 \leq k < N$ et une stratégie jointe pure arbitraire ω^0.*
On suppose que, pour $Z, W \subseteq I_k$, $\left(\mathcal{S}_k^{Z,W}\right)$ définit un nœud complémentaire de $\left(\mathcal{S}^k\right)$.
Alors, si $Z' = Z \cup \left\{(k+1, j), j \neq \omega_{k+1}^0\right\}$, $\left(\mathcal{S}_{k+1}^{Z',W}\right)$ définit un arc $(k+1, \omega_{k+1}^0)$-presque complémentaire du sous-PCP $\left(\mathcal{S}^{k+1}\right)$. De plus, cet arc est non borné et ne voisine qu'un seul nœud $(k+1, \omega_{k+1}^0)$-presque complémentaire au niveau $k+1$.

Ce nœud $(k+1, \omega_{k+1}^0)$-presque complémentaire au niveau $k+1$ peut être calculé en essayant de résoudre tous les systèmes $\left(\mathcal{S}_{k+1}^{Z'\cup\{(\nu,j)\},W}\right)$ avec $(\nu, j) \in I_{k+1} \setminus Z'$ et $\left(\mathcal{S}_{k+1}^{Z',W\cup\{(\nu,j)\}}\right)$ avec $(\nu, j) \in I_{k+1} \setminus W$ jusqu'à en trouver un possédant une solution. Un tel système possédant une solution existe (c'est une conséquence du lemme 2 de [20]). De plus, il est unique pour une séquence fixée de PCP non dégénérés. Cette solution est appelée *nœud initial* au niveau $k+1$:

Definition 7 (Nœud initial) *Un nœud initial au niveau $k+1$ est un nœud $(k+1, \omega_{k+1}^0)$-presque complémentaire solution de $\left(\mathcal{S}_{k+1}^{Z,W}\right)$, avec $Z, W \subseteq I_{k+1}$ et tel que seul l'un de ses arcs voisins est borné. Il satisfait aussi :*

$$(k+1, \omega_{k+1}^0) \notin Z \text{ et } (k+1, j) \in Z, \forall j \neq \omega_{k+1}^0.$$

Avec cette définition en tête, la proposition 3 peut être réinterprétée. Elle précise qu'à partir de tout nœud complémentaire au niveau N et pour $i \in S_N$, un chemin unique constitué de nœuds et arcs (N,i)-presque complémentaires conduit soit à un autre nœud complémentaire, soit à un *nœud initial* au niveau N. C'est évidemment également vrai pour tous les niveaux $k \in \{2, \ldots, N\}$: Ces nœuds complémentaires sont à une extrémité d'un chemin (k, ω_k^0)-presque complémentaire pour lequel l'autre extrémité est soit un nœud complémentaire, soit un nœud initial. L'ensemble des nœuds et arcs presque-complémentaires satisfaisant $\mathcal{S}^k$ constitue un ensemble de chemins disjoints dont les formes possibles sont illustrées dans la figure 1.
La procédure de *descente de niveau*, depuis un nœud initial au niveau k vers un nœud complémentaire au niveau $k-1$, peut être définie réciproquement à la procédure de montée.

Proposition 5 (Descente de niveau) *Soit $\left(\mathcal{S}_k^{Z,W}\right)$ définissant un nœud initial au niveau k. Posons $Z' = Z \cap I_{k-1}$ et $W' = W \cap I_{k-1}$.*
Alors, soit $Z' \cap W' = \{(\nu, j)\} \subseteq I_{k-1}$, soit $Z' \cap W' = \emptyset$. Dans le premier cas, l'un des deux systèmes $\left(\mathcal{S}_{k-1}^{Z'\setminus\{(\nu,j)\},W'}\right)$ ou $\left(\mathcal{S}_{k-1}^{Z',W'\setminus\{(\nu,j)\}}\right)$ définit un nœud

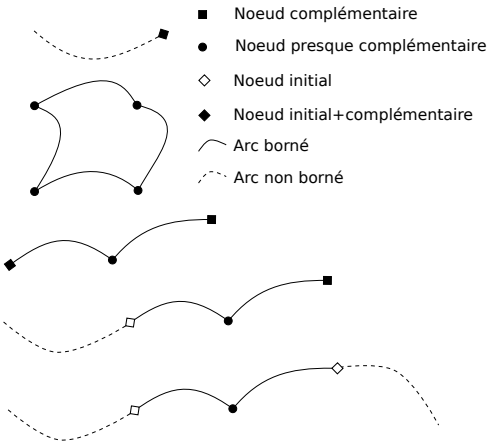


FIGURE 1 – Différentes catégories de chemin presque complémentaire à un niveau donné.

complémentaire au niveau $k-1$. *Dans le second cas,* $\left(\mathcal{S}_{k-1}^{Z',W'}\right)$ *définit un nœud complémentaire au niveau* $k-1$.

3.4 Parcours d'arc algébrique

La brique de base de notre algorithme de parcours de chemin est le *parcours* d'un arc (k,ω_k^0)-presque complémentaire [4] $\gamma^k(Z,W)$, au niveau k ($Z,W \subseteq I_k$), quittant un nœud presque-complémentaire $\rho^k(Z',W')$ avec soit (i) $Z = Z' \setminus W'$ et $W = W'$ soit (ii) $Z = Z'$ et $W = W' \setminus Z'$. Ce problème de traversée d'arc s'exprime en termes algébriques. En effet, par définition :

$$\begin{aligned}\gamma^k(Z,W) &=_{def} \mathcal{V}\left(\mathcal{S}_k^{Z,W}\right) \cap \mathcal{D}^k,\\ \rho^k(Z',W') &=_{def} \mathcal{V}\left(\mathcal{S}_k^{Z',W'}\right) \cap \mathcal{D}^k,\end{aligned}$$

où $\mathcal{V}(\mathcal{S})$ désigne l'ensemble des solutions de $(\mathcal{S})$, en ignorant la contrainte de domaine. $\mathcal{V}(\mathcal{S})$ est appelée une *varieté algebrique affine* [4]. Quand le système $(\mathcal{S})$ est non-dégénéré, la variété est finie (elle est de dimension 0) pour un nœud et est de dimension 1 pour un arc.

En pratique, le calcul d'une variété $\mathcal{V}\left(\mathcal{S}_k^{Z,W}\right)$ ou de sa dimension requiert de calculer une *base de Groebner réduite* pour l'ordre lexicographique de l'idéal correspondant [4]. Dans le cas où la variété est de dimension zéro, le *Shape Lemma* [1] montre que cette base réduite consiste en (i) un polynôme en une seule variable et (ii) un polynôme pour chaque autre variable, exprimant sa valeur en fonction d'un polynôme en la première variable. Les solutions d'un tel système à coefficients rationnels sont des *nombres algébriques*, représentables finiment par les équations qui les définissent. Une approche numérique standard peut être utilisée pour résoudre une équation polynomiale à une variable à coefficients rationnels avec une précision arbitraire. Aussi, le système peut être résolu avec une précision arbitraire, en résolvant la première équation puis en injectant la valeur obtenue pour calculer toutes les autres variables.

4. L'exposant k de γ^k ou ρ^k indique que nous sommes au niveau k.

Une base de Groebner réduite pour l'ordre lexicographique peut être calculée via des opérations élémentaires sur des polynômes multivariés (additions, soustractions, multiplications). Le temps et l'espace de calcul sont généralement exponentiels en la "taille" du système [5]. Toutefois, il existe plusieurs implémentations d'algorithmes de calcul de base de Groebner, efficaces pour des problèmes avec des centaines de variables et d'équations [6]. Nous utilisons les fonctions implémentées dans la boite à outil `Singular`, accessible à partir de l'environnement `Sagemath` [6], pour calculer des bases de Groebner, leur dimension et les variétés correspondantes.

Finalement, le problème de parcours d'arc à un niveau k consiste, à partir d'un nœud (n,i)-presque complémentaire $\rho^k(Z',W')$ et d'un arc borné $\gamma^k(Z,W)$ voisin, à calculer l'autre extrémité de l'arc, $\rho^k(Z'',W'')$. L'algorithme **??** calcule ce nœud (n,i)-presque complémentaire en essayant tout les ajouts possibles d'équations au système $\left(\mathcal{S}_k^{Z,W}\right)$.

Algorithme 1 : TRAVERSEARC$((Z,W),(Z',W'),I_k)$, **corrected !**

```
/* Computes the end node of arc γ^k(Z,W),
   given starting almost-complementary
   node ρ^k(Z',W').                          */
/* Initialization                            */
1  Sol ← ∅;
2  for (ν,j) ∈ I_k do
3      if (ν,j) ∈ I_k \ Z' then
4          Z_loc ← Z ∪ {(ν,j)}, W_loc ← W;
5          if dim(V(S_k^{Z_loc,W_loc})) = 0 then
6              ρ_loc ← V(S_k^{Z_loc,W_loc}) ∩ D^k;
7              if ρ_loc ≠ ∅ then
                   Sol ← (Sol ∪ {(Z_loc, W_loc, ρ_loc)});
8      if (ν,j) ∈ I_k \ W' then
9          Z_loc ← Z, W_loc ← W ∪ {(ν,j)};
10         if dim(V(S_k^{Z_loc,W_loc})) = 0 then
11             ρ_loc ← V(S_k^{Z_loc,W_loc}) ∩ D^k;
12             if ρ_loc ≠ ∅ then
                   Sol ← (Sol ∪ {(Z_loc, W_loc, ρ_loc)});
13 return Sol
```

Lorsqu'un jeu est non-dégénéré, Sol est un singleton. Le cas des jeux dégénérés, non traité dans cet article, requiert une modification de la ligne 12.

Proposition 6 (Correction du parcours d'arc) *Pour un PCP non dégénéré, l'algorithme* **??** *retourne un unique triplet* $\left(Z'',W'',\mathcal{V}\left(\mathcal{S}_k^{Z'',W''}\right)\right)$ *où* $\mathcal{V}\left(\mathcal{S}_k^{Z'',W''}\right)$ *est un point.*

5. Voir section 5 pour une discussion sur la complexité de calcul des bases de Groebner.

6. `https://www.sagemath.org/index.html`.

©AFIA2021

3.5 Procédure de parcours de chemin

Nous avons presque tous les éléments nécessaires pour construire une procédure de parcours de chemin permettant d'atteindre un nœud complémentaire d'un PCP. Il nous manque seulement l'étape d'initialisation. Cette étape initialise arbitrairement la stratégie jointe pure ω^0 puis résout $\left(\mathcal{S}^1\right)$ décrit dans la définition 6. A partir du nœud complémentaire au niveau 1, nous calculons le nœud initial correspondant au niveau 2 en utilisant la proposition 4. Puis, nous suivons le chemin au niveau 2, partant de ce nœud. Si nous atteignons un nœud complémentaire au niveau 2, nous montons au niveau 3, etc. Si, à un niveau k, nous atteignons un nœud initial, non complémentaire, alors nous calculons le nœud complémentaire correspondant au niveau $k-1$ en utilisant la procédure de *descente* (Proposition 5). Puis, nous continuons au niveau $k-1$. Dans le cas où le jeu est non-dégénéré, puisque nous partons d'un nœud complémentaire au niveau 1 et puisque que tout nœud a exactement deux arcs voisins, à l'exception du nœud initial au niveau 1 et des nœuds complémentaires au niveau N, le chemin suivi est unique pour ω^0 fixé et se termine en un nœud complémentaire au niveau N : une solution du PCP. La figure 2 illustre quelques étapes de l'algorithme.

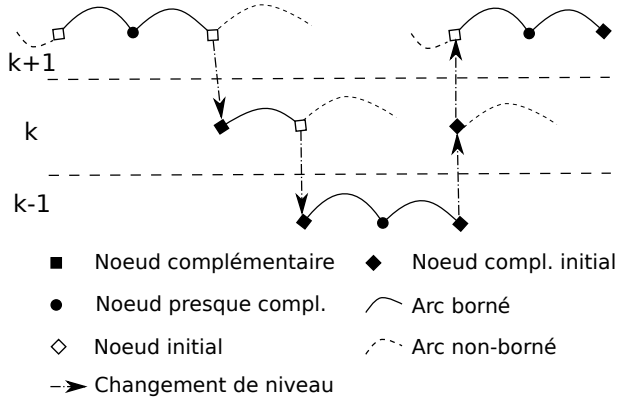


FIGURE 2 – Partie d'un chemin suivi par l'algorithme.

4 Un exemple de jeu à 3 joueurs

Considérons un exemple de jeu à trois joueurs avec deux actions pour chaque joueur, décrit par la table d'utilités/désutilités suivante (les deux représentations sont équivalentes) :

ω_1	ω_2	ω_3	u^1	u^2	u^3	a^1	a^2	a^3
0	0	0	6	0	4	2	8	4
0	0	1	7	3	7	1	5	1
0	1	0	0	7	4	8	1	3
0	1	1	5	4	0	3	4	8
1	0	0	1	6	3	7	2	5
1	0	1	4	5	2	4	3	6
1	1	0	2	1	6	6	7	2
1	1	1	3	2	1	5	6	7

(5)

Nous fixons $\omega^0 = (0,0,0)$. Alors, l'ensemble des polynômes définis par l'équation (4) est :

$$
\begin{aligned}
A_0^{1,1} = 1 \quad ; \quad A_1^{1,1} &= \frac{7}{2} \\
A_0^{1,2}\left(x^2\right) &= 2x_0^2 + 8x_1^2 \\
A_1^{1,2}\left(x^2\right) &= 7x_0^2 + 6x_1^2 \\
A_0^{2,2}\left(x^1\right) &= 8x_0^1 + 2x_1^1 \\
A_1^{2,2}\left(x^1\right) &= x_0^1 + 7x_1^1 \\
A_0^{1,3}\left(x^2,x^3\right) &= 2x_0^2x_0^3 + x_0^2x_1^3 + 8x_1^2x_0^3 + 3x_1^2x_1^3 \\
A_1^{1,3}\left(x^2,x^3\right) &= 7x_0^2x_0^3 + 4x_0^2x_1^3 + 6x_1^2x_0^3 + 5x_1^2x_1^3 \\
A_0^{2,3}\left(x^1,x^3\right) &= 8x_0^1x_0^3 + 5x_0^1x_1^3 + 2x_1^1x_0^3 + 3x_1^1x_1^3 \\
A_1^{2,3}\left(x^1,x^3\right) &= x_0^1x_0^3 + 4x_0^1x_1^3 + 7x_1^1x_0^3 + 6x_1^1x_1^3 \\
A_0^{3,3}\left(x^1,x^2\right) &= 4x_0^1x_0^2 + 3x_0^1x_1^2 + 5x_1^1x_0^2 + 2x_1^1x_1^2 \\
A_1^{3,3}\left(x^1,x^2\right) &= x_0^1x_0^2 + 8x_0^1x_1^2 + 6x_1^1x_0^2 + 7x_1^1x_1^2
\end{aligned}
$$

A partir de cet ensemble de polynômes, l'algorithme de résolution de PCP va parcourir une séquence de nœuds et arcs presque complémentaires définis par des paires $Z, W \subseteq I_k$ au niveau k.

nœud/arc	Z	W	niveau
nœud C	$\{(1,1)\}$	$\{(1,0)\}$	$k=1$
arc	$\{(1,1),(2,1)\}$	$\{(1,0)\}$	$k=2$
nœud PC	$\{(1,1),(2,1)\}$	$\{(1,0),(2,1)\}$	$k=2$
arc	$\{(1,1)\}$	$\{(1,0),(2,1)\}$	$k=2$
nœud PC	$\{(1,1)\}$	$\{(1,0),(1,1),(2,1)\}$	$k=2$
arc	$\emptyset$	$\{(1,0),(1,1),(2,1)\}$	$k=2$
nœud C	$\emptyset$	$\{(1,0),(1,1),$	$k=2$
		$(2,1),(2,2)\}$	$k=2$
arc	$\{(3,1)\}$	$\{(1,0),(1,1),$	$k=3$
		$(2,1),(2,2)\}$	$k=3$
nœud C	$\{(3,1)\}$	$\{(1,0),(1,1),$	$k=3$
		$(2,1),(2,2),(3,0)\}$	$k=3$

Finalement, une solution du PCP vérifie le système suivant, obtenu à partir de la paire (Z,W) définissant le nœud complémentaire au niveau 3 :

$$
\begin{aligned}
x_1^3 &= 0 \\
2x_0^2x_0^3 + 8x_1^2x_0^3 &= 1 \\
7x_0^2x_0^3 + 6x_1^2x_0^3 &= 1 \\
8x_0^1x_0^3 + 2x_1^1x_0^3 &= 1 \\
x_0^1x_0^3 + 7x_1^1x_0^3 &= 1 \\
4x_0^1x_0^2 + 3x_0^1x_1^2 + 5x_1^1x_0^2 + 2x_1^1x_1^2 &= 1
\end{aligned}
$$

Ce système peut être résolu en calculant une base de Groebner puis en résolvant un polynôme à une indéterminée. Ici, on peut en calculer une solution analytique :

$$
\begin{aligned}
x_0^1 = \sqrt{\frac{110}{1377}} \quad ; \quad x_1^1 &= \sqrt{\frac{1078}{6885}} \\
x_0^2 = \sqrt{\frac{18}{935}} \quad ; \quad x_1^2 &= \sqrt{\frac{45}{374}} \\
x_0^3 = \sqrt{\frac{85}{792}} \quad ; \quad x_1^3 &= 0.
\end{aligned}
$$

Après normalisation, cette solution donne l'équilibre de Nash mixte suivant :

$$\begin{aligned}
\xi_0^1 &= \frac{\sqrt{\frac{110}{1377}}}{\sqrt{\frac{110}{1377}}+\sqrt{\frac{1078}{6885}}} \sim 0.41666 \\
\xi_1^1 &= \frac{\sqrt{\frac{1078}{6885}}}{\sqrt{\frac{110}{1377}}+\sqrt{\frac{1078}{6885}}} \sim 0.58333 \\
\xi_0^2 &= \frac{\sqrt{\frac{18}{935}}}{\sqrt{\frac{18}{935}}+\sqrt{\frac{45}{374}}} \sim 0.28571 \\
\xi_1^2 &= \frac{\sqrt{\frac{45}{374}}}{\sqrt{\frac{18}{935}}+\sqrt{\frac{45}{374}}} \sim 0.71429 \\
\xi_0^3 = 1 \quad ; \quad \xi_1^3 &= 0
\end{aligned}$$

5 Jeux graphiques /hypergraphiques

L'approche présentée dans cet article s'étend naturellement aux jeux polymatriciels [21], graphiques [14] et hypergraphiques [18]. Ces jeux sont des représentations succinctes de jeux à N-joueurs où les utilités des joueurs s'expriment à partir d'utilités locales, c-à-d ne dépendant que des stratégies d'un sous ensemble de joueurs de P.
Les jeux hypergraphiques, par exemple, sont définis ainsi :

Definition 8 (Jeu hypergraphique) *Un jeu hypergraphique à N-joueurs Γ^N est défini par*

$$\Gamma^N = \{\{P_g\}_{g=1..G}, \{S_i\}_{i=1..N}, \{a^g\}_{g=1..G}\}, \text{ où}$$

- *$\forall g \in 1,\ldots,G$, $P_g \subseteq P$ est l'ensemble des joueurs du jeu local g et $\cup_{g=1..G} P_g = P$.*
- *$\{S_i\}_{i=1..N}$, est la liste des ensembles de stratégies pures des joueurs.*
- *$a^{g,n}_{\omega_{P_g}}$ est la désutilité locale (positive) d'un joueur n appartenant à P_g dans le jeu local g, lorsque la stratégie jointe des joueurs du jeu g est ω_{P_g}.*

Dans le jeu Γ^N, la désutilité du joueur $n \in N$ pour une stratégie jointe ω est obtenue à partir des désutilités locales :

$$a^n_\omega = \sum_{g, n\in P_g} a^{g,n}_{\omega_{P_g}}.$$

Cette représentation de la matrice de désutilités globale à partir de matrices de désutilités locales permet potentiellement un gain exponentiel d'espace, par rapport à une représentation en forme normale, pour la représentation d'un jeu hypergraphique.
Les jeux polymatriciels et graphiques sont des cas particuliers de jeux hypergraphiques. Les jeux polymatriciels sont définis par le fait que leurs jeux locaux impliquent exactement deux joueurs : $|P_g| = 2, \forall g = 1,\ldots,G$. Les jeux graphiques sont des jeux dans lesquels la désutilité d'un joueur $n \in P$ ne dépend que des stratégies d'un unique sous-ensemble de joueurs $P_n \in P$. Un jeu graphique peut s'exprimer comme un jeu hypergraphique dans lequel $G = N$ (il y a un jeu local et un seul attaché à chaque joueur) et $a^{g,n}_{\omega_{P_g}} = 0, \forall \omega \in \pi, \forall n \neq g$.
Les polynômes du PCP dérivé d'un jeu hypergraphique exploitent la factorisation des fonctions de désutilité. Ils prennent la forme suivante :

$$A^n_i(x^{-n}) = \sum_{g, n\in P_g} \sum_{\substack{\omega_{P_g}\in\pi_{P_g} \\ \omega_n = i}} a^{g,n}_{\omega_{P_g}} \prod_{\substack{\omega_\nu = j \\ \nu \in P_g\setminus\{n\}}} x^\nu_j. \quad (6)$$

Dans l'expression (6), les degrés des polynômes du PCP sont tous strictement inférieurs au nombre de joueurs du plus grand jeu local. En particulier, lorsque le jeu est polymatriciel, les polynômes sont de degré 1 au plus. Dans ce cas, le problème est un *Linear Complementarity Problem (LCP)*. Howson [13] a exploité cette propriété pour étendre l'algorithme de Lemke Howson aux jeux polymatriciels.
Plus généralement, le fait de pouvoir borner les degrés des polynômes d'un PCP est utile pour un calcul efficace des bases de Groebner. Sans entrer dans les détails ici, des résultats de la littérature montrent que le problème de calcul de bases de Groebner, qui est EXPSPACE-difficile dans le cas général, n'est plus "que" PSPACE-difficile lorsque le système est homogène et l'idéal de dimension zéro [16].
Dans le cas d'un jeu hypergraphique dont le PCP est non-dégénéré, on obtient le résultat de complexité suivant :

Proposition 7 (Complexité) *La complexité de l'algorithme de parcours de chemin pour un jeu graphique/hypergraphique est simplement exponentielle en le nombre de joueurs, le nombre maximum de stratégies pures d'un joueur et doublement exponentielle en le nombre maximal de joueurs d'un jeu local.*

6 Conclusion

La littérature sur l'algorithmique de la recherche d'équilibres approchés dans les jeux à N-joueurs est abondante. Celle-ci inclut des travaux décrivant des approches numériques de parcours d'arc utilisant des *méthodes d'homotopie* [8, 9, 2, 12]. Ces travaux sont basés sur la définition d'un continuum de jeux paramétrés par un paramètre unique et joignant un jeu arbitraire (dont l'équilibre est connu) au jeu qui nous intéresse. Les méthodes d'homotopie suivent alors l'arc des équilibres du continuum des jeux paramétrés.
Par exemple, Datta [5] a proposé une méthode d'homotopie qui exploite également le concept de base de Groebner, mais uniquement pour le calcul d'un équilibre du jeu initial, choisi pour être facilement résolu. Du fait de la précision limitée des méthodes numériques de parcours d'arc, les méthodes de calcul d'équilibres basées sur le concept d'homotopie sont susceptibles aux erreurs numériques et peuvent potentiellement (souvent, en pratique !) ne pas converger.
Plus proche de notre proposition, [19] utilise les concepts d'énumération de supports de stratégies mixtes et de systèmes d'équations polynomiales pour résoudre un jeu à N

©AFIA2021

joueurs. Cependant, contrairement à notre approche, [19] ne décrit pas dans quel ordre les supports sont énumérés, ni comment les équations polynomiales doivent être résolues.

Au contraire des approches d'homotopie, notre méthode est combinatoire et exploite des principes de géométrie algébrique pour calculer un équilibre de Nash mixte "exact" sous la forme d'un nombre algébrique [3].

Le nombre d'étapes de notre algorithme peut être exponentiel en la taille de description du problème et chaque étape de parcours d'arc est également coûteuse. Cependant, pour un PCP donné, le nombre d'étapes de l'algorithme peut grandement varier selon le choix d'ordre des indices des joueurs et de la stratégie ω^0. Puisque ces choix sont arbitraires, nous pouvons exploiter des ressources de calcul parallèle pour améliorer l'efficacité de notre algorithme, en lançant un lot d'exécutions indépendantes avec différentes initialisations.

Puisque nous utilisons un logiciel tiers (Singular) pour la résolution d'équations polynomiales, nous n'avons pas de prise directe sur la complexité du calcul des bases de Groebner. Néanmoins, nous avons un peu de latitude sur le choix des systèmes lors du parcours d'un arc. Nous pouvons d'abord calculer la base de Groebner de l'idéal (de dimension 1) supportant l'arc, avant de recalculer une base pour chacun des idéaux de dimension 0 correspondant aux équations polynomiales que nous pouvons ajouter pour déterminer l'extrémité de l'arc. Cette approche peut être potentiellement plus efficace que le recalcul complet des bases de Groebner de chacun des idéaux potentiels de dimension nulle. Enfin, pour améliorer l'efficacité de notre approche, nous pouvons maintenir une liste des bases de Groebner de tous les idéaux/systèmes rencontrés et les réutiliser quand cela est approprié.

Pour finir, notre approche peut être étendue à d'autres types de jeux. Une perspective de ce travail est de l'étendre aux jeux bayesiens [11] et aux jeux stochastiques [7]. Ces extension nécessitent la représentation des équilibres de Nash de ces jeux par une solution d'un PCP. Mais puisque ces familles de jeux admettent généralement une représentation en forme normale, cette perspective est potentiellement prometteuse.

Références

[1] E. Becker, T. Mora, M.G. Marinari, and C. Traverso. The shape of the shape lemma. In *ISSAC*, pages 335–342. ACM Press, 1994.

[2] B. Blum, D. Koller, and C.R. Shelton. A continuation method for Nash equilibria in structured games. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 25 :457–502, 2006.

[3] J. H. Conway and R. K. Guy. *The Book of Numbers*, chapter Algebraic Numbers, pages 189–190. Springer-Verlagr, New York, 1996.

[4] D.A. Cox, J.B. Little, and D. O'Shea. *Ideals, Varieties, and Algorithms*. Springer, 4 edition, 2015.

[5] R.S. Datta. Finding all Nash equilibria of a finite game using polynomial algebra. *Econonmics Theory*, 42 :55–96, 2010.

[6] J.C. Faugère. A new efficient algorithm for computing groebner bases without reduction to zero (f_5). In *ISSAC*, pages 75–83. ACM Press, 2002.

[7] J. Filar and K. Vrieze. *Competitive Markov Decision Processes*. Springer-Verlag, 1997.

[8] S. Govindan and R. Wilson. A global newton method to compute Nash equilibria. *Journal of Economic Theory*, 110(1) :65–86, 2003.

[9] S. Govindan and R. Wilson. Computing Nash equilibria by iterated polymatrix approximation. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 28(7) :1229–1241, 2004.

[10] M.S. Gowda. Polynomial complementarity problems. *Pac. J. Optim*, 3 :227–241, 2017.

[11] J.C. Harsanyi. Games with incomplete information played by "Bayesian" players, i–iii part i. the basic model. *Management science*, 14(3) :159–182, 1967.

[12] J.J. Herings and R. Peeters. Homotopy methods to compute equilibria in game theory. *Economic Theory*, 42 :119–156, 2010.

[13] J.T. Howson. Equilibria of polymatrix games. *Management Science*, 18(5-part-1) :312–318, 1972.

[14] M. Kearns, M.L. Littman, and S. Singh. Graphical models for game theory. *UAI*, 2001.

[15] C.E. Lemke and J.T. Howson. Equilibrium points of bimatrix games. *Journal of the Society for industrial and Applied Mathematics*, 12(2) :413–423, 1964.

[16] E. W. Mayr. Some complexity results for polynomial ideals. *Journal of Complexity*, 13(3) :303–325, 1997.

[17] J.F. Nash. Equilibrium points in n-person games. *PNAS*, 36(1) :48–49, 1950.

[18] C.H. Papadimitriou and T. Roughgarden. Computing correlated equilibria in multi-player games. *Journal of the ACM (JACM)*, 55(3) :14, 2008.

[19] R. Porter, E. Nudelman, and Y. Shoham. Simple search methods for finding a Nash equilibrium. *Games and Economic Behavior*, 63(2) :664–669, 2008.

[20] R. Wilson. Computing equilibria of n-person games. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 21(1) :80–87, 1971.

[21] E.B. Yanovskaya. Equilibrium points in polymatrix games. *Litovskii Matematicheskii Sbornik*, 8 :381–384, 1968.

Jeux bayésiens hypergraphiques

H. Fargier[1], P. Jourdan[1,2], R. Sabbadin[2]

[1] IRIT, Université de Toulouse, Toulouse, France
[2] INRAE, Université de Toulouse, UR MIAT, Castanet-Tolosan, France

helene.fargier@irit.fr, {paul.jourdan, regis.sabbadin}@inrae.fr

Résumé

Cet article définit le cadre des jeux bayésiens hypergraphiques, qui permet de représenter succinctement des jeux bayésiens à interactions locales. Ce cadre généralise à la fois les jeux bayésiens sous forme normale et les jeux hypergraphiques (y compris les jeux polymatriciels). Nous montrons que les jeux bayésiens hypergraphiques (et polymatriciels) peuvent être transformés, en temps polynomial, en jeux hypergraphiques équivalents à information complète, en généralisant le théorème de Howson et Rosenthal. Cette démonstration a plusieurs conséquences. Elle permet de montrer que le problème de recherche d'un équilibre de Nash mixte dans un jeu bayésien hypergraphique ou polymatriciel est PPAD*-complet tandis que le problème de recherche de l'existence d'un équilibre de Nash pur est NP-complet. Elle montre également que le problème de recherche d'un équilibre de Nash mixte dans un jeu bayésien sous forme normale est aussi* PPAD*-complet*

Mots-clés

Théorie des jeux, jeux bayésiens, jeux hypergraphiques, décision sous incertitude

Abstract

This paper defines the framework of hypergraphical Bayesian games, which allows to concisely specify Bayesian games with local interactions. This framework generalizes both normal-form Bayesian games and hypergraphical games (including polymatrix games). Establishing a generalization of Howson and Rosenthal's Theorem, we show that hypergraphical (resp. polymatrix) Bayesian games can be transformed, in polynomial time, into equivalent complete-information hypergraphical (resp. polymatrix) games. This result has several consequences. It involves that finding a mixed Nash equilibrium in a hypergraphical or polymatrix Bayesian game is a PPAD*-complete problem while the existence of a pure Nash equilibrium defines an NP-complete problem. It also implies that computing a mixed Nash-equilibrium in a standard normal-form, Bayesian game is* PPAD*-complete.*

Keywords

Game Theory, Bayesian games, hypergraphical games, decision under uncertainty

1 Introduction

La théorie des jeux a pour but de représenter, expliquer et optimiser des situations où plusieurs agents, les joueurs, ont le choix entre plusieurs actions. L'utilité reçue par un joueur, qu'il souhaite maximiser, dépend de son action choisie ainsi que des actions choisies par les autres joueurs. Dans un jeu simultané à information complète, les joueurs ne peuvent pas coordonner leurs actions mais chacun a une connaissance totale du jeu : les joueurs, les actions possibles et les utilités.

L'hypothèse d'une information complète n'est pas toujours satisfaite : les joueurs ne connaître que partiellement le jeu. Leur connaissance des utilités des autres joueurs peut, en particulier, être incomplète. Les jeux bayésiens [17], proposés dans les années soixante, permettent de modéliser la connaissance incomplète d'un jeu et la possibilité qu'ont les joueurs de disposer d'informations supplémentaires, représentées par la notion de "type". Le "type" d'un joueur regroupe les informations sur le jeu auxquelles il a accès.

La représentation sous forme normale d'un jeu bayésien est coûteuse. Pour un jeu à n joueurs, chacun d'entre eux disposant de t types possibles et de d actions, il faut définir et stocker n tables d'utilité de taille $t^n \times d^n$. Il existe plusieurs cadres de représentation succincte de jeux à information *complète*. En particulier les *jeux graphiques* [22], *jeux polymatriciels* [29] et *jeux hypergraphiques* [25] ont été proposés pour représenter des jeux à plusieurs joueurs dont les interactions sont locales. Dans ces cadres, l'utilité (dite globale) d'un joueur est la somme d'utilités (dites locales) obtenues dans différents sous-jeux (un seul, dans le cas graphique) auxquels il participe. Chacun de ces sous-jeux n'implique qu'une partie de l'ensemble des joueurs.

Ces représentations peuvent demander un espace exponentiellement inférieur à une représentation sous forme normale. Dans un jeu polymatriciel, par exemple, les interactions des agents sont représentées par un graphe où chaque agent (noeud) participe à plusieurs sous-jeux à deux joueurs sous forme normale (arêtes). Dans un cas hypergraphique les joueurs peuvent jouer a des sous-jeux avec plus de 2 joueurs. La taille de représentation d'un jeu hypergraphique est polynomiale dans le nombre d'actions possibles pour chaque joueur et dans le nombre total de joueurs et exponentielle en le nombre maximal de joueurs d'un sous-jeu. Ces cadres succincts disposent de plusieurs méthodes de ré-

©AFIA2021

solution exacte ou approchée : LCP [18], descente de gradient [14] , propagation de message [22, 24, 8], programmation par contrainte [27, 16, 28]...
Dans cet article, nous proposons un cadre de représentation des jeux bayésiens plus concis que la forme normale habituelle : le cadre des jeux bayésiens *hypergraphiques*. La prochaine section présente les notions basiques sur lesquelles notre travail s'appuie. La section 3 définit les jeux bayésiens polymatriciels et hypergraphiques. Nous rappelons ensuite dans la section 4 que, grâce au théorème de Howson et Rosenthal [19], tout jeu bayésien polymatriciel peut être transformé en un jeu polymatriciel (à information complète) équivalent. Nous généralisons le théorème de Howson et Rosenthal et proposons une transformation en temps polynomial d'un jeu bayésien hypergraphique vers un jeu hypergraphique à information complète. On peut alors montrer que le problème de recherche d'un équilibre dans un jeu bayésien hypergraphique n'est pas plus difficile que dans un jeu hypergraphique "standard".

2 Contexte et notations

2.1 Jeux sous forme normale

Un jeu sous forme normale à information complète est défini par un triplet $G = \langle N, A, U \rangle$. $N = \{1, \ldots, n\}$ est un ensemble fini de joueurs. $A = \times_{i \in N} A_i$ est un ensemble d'actions jointes, où A_i est l'ensemble fini des actions du joueur $i \in N$. Une action jointe est un vecteur $a \in A$ spécifiant une action a_i pour chaque joueur i. $U = \{(u_i)_{i \in N}\}$ est un ensemble de fonctions d'utilité associant à toute action $a \in A$ un réel $u_i(a)$ décrivant l'utilité du joueur i lorsque $a \in A$ est jouée. Dans un jeu sous forme normale (jeu "SNF"), u_i est donnée par une table à $|A|$ entrées.
Une stratégie mixte pour un joueur i est une distribution de probabilité sur A_i. Une stratégie mixte jointe est un n-uplet $\sigma = (\sigma_1, ..., \sigma_n)$ où σ_i est une stratégie mixte du joueur i. L'utilité d'un joueur pour une stratégie mixte est son utilité espérée :

Définition 1 (Utilité d'une stratégie mixte)**.** *Pour un jeu $G = \langle N, A, U \rangle$, σ une stratégie et i un joueur :*

$$EU_i(\sigma) = \sum_{a \in A} \left(\prod_{j=1}^{n} \sigma_j(a_j) \right) u_i(a)$$

Lorsque pour σ une seule action par joueur a une probabilité non nulle, σ est une stratégie *pure* et définit simplement une action jointe a. Dans ce cas, on a tout simplement $EU_i(\sigma) = u_i(a)$.
Dans la suite nous utilisons la notation suivante : pour tout vecteur $v = (v_1, \ldots, v_n)$ dans le domaine produit $V = \times_{i \in N} V_i$ et pour n'importe quel $e \subseteq N$, v_e est la restriction de v à e et $V_e = \times_{i \in e} V_i$. Par abus de notation, nous utilisons v_i pour $v_{\{i\}}$. Pour tout i, $-i$ désigne l'ensemble $N \backslash \{i\}$, i.e.$v_{-i} = (v_1, \ldots, v_{i-1}, v_{i+1}, \ldots, v_n) \in V_{-i} = \times_{j \neq i} V_j$. v_{-i} est une restriction de v à tous les joueurs sauf i. Enfin, "." désignera la concaténation : $v'_i.v_{-i} = (v_1, \ldots, v_{i-1}, v'_i, v_{i+1}, \ldots, v_n)$. En particulier, pour deux actions jointes $a, a' \in A$, $a'_i.a_{-i}$ désigne l'action jointe où a_i est remplacé par a'_i.
Un équilibre de Nash est une stratégie mixte jointe qui ne peut pas être modifiée de manière unilatérale par un joueur pour obtenir un gain d'utilité.

Définition 2 (Équilibre de Nash)**.** *Une stratégie mixte σ est un équilibre de Nash ssi $EU_i(\sigma_i.\sigma_{-i}) \geqslant EU_i(\sigma'_i.\sigma_{-i})$, $\forall i \in N, \forall \sigma'_i$. Une action jointe a est un équilibre de Nash pur ssi $U_i(a \geqslant U_i(a'_i.a_{-i})$, $\forall i \in N, \forall a'_i \in A_i$.*

Le modèle classique SNF est limité. Premièrement, l'hypothèse d'une connaissance complète n'est pas toujours satisfaite. Les joueurs peuvent ne pas être bien informés sur les propriétés du jeu : la connaissance du jeu est alors qualifiée *d'incomplète*. Les jeux bayésiens, proposés par Harsanyi [17] offrent un cadre adapté pour les jeux à information incomplète. Ils sont détaillés ci dessous. Deuxièmement, même en supposant une connaissance complète, la description d'un problème sous la forme normale est très coûteuse lorsque le nombre de joueurs augmente alors que les interactions entre les joueurs restent limitées. Le cadre des jeux hypergraphiques, qui permet un gain exponentiel en espace de cette description, est détaillé dans la sous-section 2.3.

2.2 Jeux bayésiens

Un jeu à information incomplète [17, 23] comprend un ensemble S de "mondes possibles", chaque monde correspondant à un jeu classique. L'utilité u_i d'un agent i ne dépend pas seulement des actions mais aussi du monde/jeu réel. Les joueurs ne savent pas précisément quel est le monde réel, mais ils ont une connaissance commune sur ce dernier. Juste avant de jouer, chaque joueur i reçoit une information privée $\tau_i(s)$ sur le monde réel. τ_i associe à chaque monde $s \in S$ un élément θ_i d'un ensemble Θ_i appelé l'ensemble des "types" du joueur i. Après avoir observé $\tau_i(s)$, l'agent i en sait plus sur le jeu réel, mais plusieurs jeux restent souvent possibles. L'agent conditionne ses connaissances par $\tau_i(s)$ et décide quelle action jouer. Les agents peuvent obtenir des informations différentes et par conséquent, ne partagent pas la même connaissance a posteriori sur le monde réel.
Harsanyi propose de décrire les jeux à information incomplète à partir de l'ensemble des types $\Theta = \Theta_1 \times \cdots \times \Theta_n$ (les mondes sous-jacents sont omis). L'idée de Harsanyi en définissant les types était que la notion de type encapsule toutes les informations d'un jeu auxquelles les joueurs ont accès. Elle n'inclut pas seulement le statut du monde que les joueurs peuvent observer mais aussi leur croyance sur les autres joueurs et leur état mental introspectif [1].
Les jeux bayésiens sont des jeux à information incomplète où la connaissance a priori des joueurs est commune et est capturée par une distribution de probabilité :

Définition 3 (Jeu bayésien)**.** *Un jeu bayésien (B-game) G est un n-uplet $\langle N, A, \Theta, P, U \rangle$ où :*

— *N est un ensemble fini de n joueurs $\{1, ..., n\}$;*

1. Voir [5, 2, 3, 4, 13] pour les liens entre les états de croyance et types, et pour plus de développements sur la théorie des jeux épistémiques.

— $A = \times_{i \in N} A_i$, *où* A_i *est l'ensemble des actions du joueur* i *;*
— $\Theta = \times_{i \in N} \Theta_i$, *où* Θ_i *est l'ensemble des types du joueur* i*, regroupe toute les configurations* $\theta = (\theta_1, \ldots, \theta_n)$ *de types ;*
— $P : \Theta \rightarrow [0, 1]$ *est une distribution de probabilité jointe sur les combinaisons de types ;*
— $U = \{(u_i)_{i \in N}\}$ *où* $u_i : A \times \Theta \rightarrow \mathbb{R}$ *est la fonction d'utilité du joueur* i*.*

P capture la connaissance a priori des joueurs. Cette connaissance est commune. L'information que les joueurs ont sur le monde réel correspond à un $\theta \in \Theta$, mais n'est pas commune. i n'a pas connaissance de θ mais seulement de θ_i. $P(.|\theta_i)$ représente la connaissance a posteriori qu'a l'agent i de type θ_i à propos du jeu. D'autre part, l'utilité $u_i(a, \theta)$ est l'utilité pour i de l'action jointe a quand le monde réel est décrit par θ. Elle est reçue seulement après que tous les joueurs aient joué leurs actions et révélé leurs types : u_i dépend de θ et non pas seulement de θ_i.
Un joueur i, de type θ_i, joue une stratégie mixte $\sigma_i(.|\theta_i)$, qui est une distribution de probabilité sur A_i. Comme sous information complète, une stratégie pure est une stratégie mixte particulière.
Dans un jeu bayésien, pour toute combinaison de types $\theta \in \Theta$, la probabilité qu'une action jointe $a \in A$ soit sélectionnée est $\sigma(a|\theta) = \prod_{i \in N} \sigma_i(a_i|\theta_i)$.
L'utilité espérée d'une stratégie σ pour un joueur i de type θ_i est l'espérance de l'utilité de i selon la distribution σ, conditionnée par le type θ_i reçu par i :

Définition 4 (Utilité d'une stratégie dans jeu bayesien)**.**

$$EU_i(\sigma|\theta_i) = \sum_{\theta_{-i}} P(\theta_{-i}|\theta_i) \sum_{a \in A} \left(\prod_{j=1}^{n} \sigma_j(a_j|\theta_j) \right) u_i(a, \theta)$$

Comme dans un jeu à information complète, σ est un équilibre de Nash mixte ssi $EU_i(\sigma_i.\sigma_{-i}|\theta_i) \geqslant EU_i(a_i.\sigma_{-i}|\theta_i), \forall i \in N, \theta_i \in \Theta_i, \forall a_i \in A_i$.
Un jeu bayésien sous forme normale est décrit par une distribution de probabilité de taille t^n et par n tables d'utilité de taille $t^n.d^n$ (pour une question de simplicité, nous considérons que tous les joueurs ont t types et d actions possibles). Même en tenant compte de cette représentation en extension coûteuse, le problème de recherche d'un équilibre de Nash est difficile : pour un jeu bayésien sous forme normale, déterminer s'il existe un équilibre de Nash pur est un problème NP-complet [10] et le problème de recherche d'un équilibre mixte est PPAD-difficile même s'il n'y a que deux joueurs [9, 12].

2.3 Jeux hypergraphiques

La question de la représentation succincte des jeux est importante pour les jeux classiques non bayésiens : la représentation d'un jeu classique sous sa forme SNF est coûteuse (n tables de taille d^n) et, comme mentionné par [15] :

> "For large population of games (modeling for instance agents interactions over the Internet), the SNF is practically unfeasible, while the more succinct graphical normal form works very well, and is actually a more natural representation."

En effet, dans beaucoup de situations, l'utilité d'un joueur ne va pas dépendre des actions de tous les autres – les interactions sont souvent *locales*. Pour les jeux classiques, [29] a proposé les *jeux polymatriciels* comme moyen de représentation des jeux à plusieurs joueurs avec des interactions par paires. Ce formalisme a été généralisé dans les années 2000 pour décrire les interactions locales comprenant plus de deux joueurs [22, 25] :

Définition 5 (Jeu hypergraphique)**.** *Un* jeu hypergraphique *est un n-uplet* $G = \langle N, A, E, U \rangle$ *où :*
— $N = \{1, \ldots, n\}$ *est un ensemble fini de joueurs ;*
— $A = \times_{i \in N} A_i$*, où* A_i *est l'ensemble fini d'actions du joueur* $i \in N$ *;*
— E *est un ensemble de sous-ensembles de* N*, i.e.*$\langle N, E \rangle$ *est un hypergraphe décrivant les interactions locales ;*
— $U = \{u_i^e\}_{e \in E, i \in e}$ *est un ensemble de fonctions d'utilité locales. Chaque* u_i^e *associe à* $a_e \in A_e$ *une utilité dans* $\mathbb{R}$

Chaque hyperarête e correspond à un jeu SNF classique $G^e = \langle e, A_e, U_e \rangle$: e est l'ensemble des joueurs, $A^e = \times_{i \in e} A_i$ et $U_e = \{u_i^e, i \in e\}$. S'il n'existe aucune hyperarête contenant la paire (i, j), cela signifie que la fonction d'utilité du joueur i ne dépend pas de l'action choisie par le joueur j. Cependant, les stratégies de deux joueurs ne jouant pas ensemble peuvent tout de même être liées indirectement via les actions des autres joueurs dont ils dépendent. Dans un jeu hypergraphique, la fonction d'utilité globale d'un joueur est la somme des utilités récupérées par ce joueur dans les jeux locaux dans lesquels il est impliqué.

Définition 6 (Utilité d'une stratégie jointe pure)**.**

$$u_i(a) = \sum_{e \in E \text{ tq } i \in e} u_i^e(a_e), \forall i \in N, \forall a \in A$$

En d'autres termes, un jeu SNF équivalent à un jeu hypergraphique $G = \langle N, A, E, U \rangle$ est un jeu $\langle N, A, \{u_i, i \in N\} \rangle$, u_i étant donnée par la définition 6.
L'utilité d'une stratégie mixte σ est définie par :

Définition 7 (Utilité d'une stratégie mixte)**.**

$$EU_i(\sigma) = \sum_{a \in A} \sigma(a). \left(\sum_{e \in E, i \in e} u_i^e(a_e) \right)$$

Quand chaque jeu local est un jeu à 2 joueurs, G est un jeu *polymatriciel*. Les jeux graphiques, proposés à l'origine par [22], sont des jeux sous forme normale où la table d'utilité de chaque joueur ne dépend des actions que d'un sous-ensemble de joueurs. Ces jeux correspondent à des jeux hypergraphiques où $E = \{e_1, \ldots, e_n\}$, où $i \in e_i, \forall i = 1..n$ et où $u_j^{e_i}(a_{e_i}) = 0, \forall j \neq i$. L'espace de représentation requis pour les jeux hypergraphiques, graphiques et polymatriciels peut être exponentiellement inférieur à celui demandé

©AFIA2021

pour une représentation équivalente sous forme normale [25, 28, 26]. Par exemple, un jeu polymatriciel demande de stocker $2.|E|.d^2$ nombres ($|E| < n^2$) tandis que le jeu SNF correspondant demande de stocker $n.d^n$ nombres.

3 Jeux bayésiens hypergraphiques

3.1 Définitions et propriétés

Les jeux hypergraphiques permettent une représentation succincte des jeux à informations complète. Nous allons les étendre au cas bayésien :

Définition 8 (Jeu bayésien hypergraphique)**.** *Un* jeu bayésien hypergraphique *(raccourci en (H, B)-game), $G = \langle N, A, \Theta, E, P, U\rangle$, est défini par :*

- *$N = \{1, \ldots, n\}$ est un ensemble fini de joueurs ;*
- *$A = \times_{i\in N} A_i$, où A_i est l'ensemble fini des actions de i ;*
- *$\Theta = \times_{i\in N}\Theta_i$, où Θ_i est l'ensemble fini des types de i ;*
- *E est un ensemble de sous-ensembles de N, i.e. $\langle N, E\rangle$ est un hypergraphe ;*
- *$\{P_e, e \in E\}$ est un ensemble de distributions de probabilité locales $P_e : \Theta_e \mapsto [0, 1]$ où Θ_e est le type joint local dans e ;*
- *$U = \{u_i^e\}_{e\in E, i\in e}$ est l'ensemble des fonctions d'utilité locales : chaque u_i^e est une fonction de $A_e \times \Theta_e$ vers $\mathbb{R}$.*

Lorsque $|e| \leqslant 2, \forall e \in E$, G est un jeu bayésien polymatriciel*.*

On notera $G^e = \langle e, A_e, \Theta_e, P_e, \{u_i^e, i \in e\}\rangle$ le jeu local correspondant à $e \in E$ dans le (H, B) game.

Définition 9 (Utilité globale dans un (H, B)-game)**.**

$$u_i(a, \theta) = \sum_{e\in E \text{ tq } i\in e} u_i^e(a_e, \theta_e), \forall a \in A, \theta \in \Theta$$

Les définitions 8 et 9 capturent, en tant que cas dégénérés, les jeux hypergraphiques et polymatriciels (sans incertitude : $|\Theta| = 1$) d'un côté et de l'autre les jeux bayésiens (une seule hyperarête $e = N$). Mais à la différence des jeux bayésiens, $u_i(a, \theta)$ ne dépend pas forcement des types et des actions de tous les joueurs.

La condition de "connaissance commune" est moins naturelle dans le cas d'une série de jeux bayésiens locaux que dans un jeu bayésien SNF. En effet, il n'y a pas de raison pour que le type d'un joueur l'informe des types des joueurs avec lesquels il n'est pas lié par un jeu local. Ainsi, nous réduisons la condition de "connaissance commune" dans les (H, B)-game à une simple condition de cohérence des distributions de probabilité locales. En d'autres mots, nous supposons que les croyances des joueurs sont cohérentes avec une probabilité a priori jointe (inconnue) sur les types :

Hypothèse 1 (Cohérence des distributions de probabilités locales)**.** *Il existe une distribution de probabilité jointe P sur Θ telle que :*

$$P_e(\theta_e) = \sum_{\theta_{-e}} P(\theta_e.\theta_{-e}), \forall e \in E, \theta_e \in \Theta_e.$$

Dans un (H, B)-game la connaissance a priori sur un groupe de joueurs $v \subseteq N$ est cohérente d'un jeu local à l'autre : $\forall v \subseteq N, \forall e, e'$ tels que $v \subseteq e \cap e'$,

$$\sum_{\theta_{e\setminus v}} P_e(\theta_v.\theta_{e\setminus v}) = \sum_{\theta_{e'\setminus v}} P_{e'}(\theta_v.\theta_{e'\setminus v}) = P_v(\theta_v).$$

Le (H, B)-game est donc équivalent au jeu bayesien $\langle N, A, \Theta, P, \{u_i, i \in N\}\rangle$ où u_i est donnée par la définition 9. Notons que dans la définition 4, EU_i dépend de P, qui porte sur les types de tous les joueurs et n'est pas totalement connue par le joueur i. Seule sa marginalisation aux jeux locaux auxquels i participe est connue. On peut montrer que :

Théorème 1 (Décomposition de l'utilité espérée)**.** *Soit σ une stratégie mixte pour un (H, B)-game G :*

$$EU_i(\sigma|\theta_i) = \sum_{e\in E \text{ tq } i\in e} EU_i^e(\sigma_e|\theta_i), \forall i \in N, \theta_i \in \Theta_i,$$

où $EU_i^e(\sigma_e|\theta_i)$ est l'utilité espérée de σ_e dans le jeu bayésien local $G^e = \langle E, A_e, \Theta_e, P_e, \{u_i^e, i \in e\}\rangle$.

Donc, sous l'hypothèse 1, la connaissance des distributions locales sur les types est suffisante pour calculer l'utilité d'une stratégie mixte. Le cadre est donc bien fondé et opérationnel.

3.2 Exemple

Prenons un exemple inspiré de [26], qui est un jeu de coordination entre des joueurs choisissant un fournisseur Internet. Dans ce problème, la satisfaction d'un joueur dépend des choix de ses voisins proches, voisinage qui est représenté par un graphe $\langle N, E\rangle$. Plus le nombre de voisins d'un joueur utilisant le même fournisseur est élevé, plus la satisfaction de ce joueur sera élevée. L'incertitude du problème vient des possibilités d'offres que les joueurs peuvent recevoir des fournisseurs. Recevoir une offre peut augmenter la préférence pour ce fournisseur et donner une information sur les autres agents : *si je reçois une offre, mes voisins probablement aussi*.

Les jeux bayésiens polymatriciels fournissent une représentation appropriée à ce type de problème. Considérons un jeu bayésien polymatriciel à 4 joueurs dont la figure 1 représente le graphe.

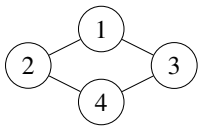


FIGURE 1 – Graphe d'un jeu bayésien polymatriciel à 4 joueur.

Chaque joueur i a deux actions, $A_i = \{b, c\}$, correspondant aux choix des fournisseurs, respectivement *Berizon* ou *C-Mobile*. Berizon a envoyé des offres à certains joueurs mais les joueurs n'ont pas une connaissance complète de qui a reçu ces offres. $\Theta_i = \{R, \bar{R}\}$, R et $\bar{R}$ correspondant

respectivement à "a reçu" et "n'a pas reçu" une offre de Berizon. Pour chaque paire de joueurs possible (chaque arête) une fonction d'utilité est associée à cette paire et dépend des 4 combinaisons de paires de types possibles. Un joueur qui n'a pas reçu d'offre (joueur de type $\bar{R}$) préfère choisir c plutôt que b. Un joueur qui a reçu une offre (joueur de type R) préfère b plutôt que c (les offres fonctionnent !). Qu'ils aient reçu une offre ou non, les joueurs qui ne se coordonnent pas dans un jeu local avec leur voisin ne sont pas satisfaits. La figure 2 formalise un tel jeu bayésien SNF local à 2 joueurs. Tous les jeux bayésiens locaux sont supposés identiques.

		R		$\bar{R}$	
		b	c	b	c
R	b	$3,3$	$0,0$	$3,1$	$0,0$
	c	$0,0$	$2,2$	$0,0$	$2,2$

		b	c	b	c
$\bar{R}$	b	$1,3$	$0,0$	$1,1$	$0,0$
	c	$0,0$	$2,2$	$0,0$	$2,2$

FIGURE 2 – Tables d'utilité pour une paire de joueurs (i, j) du jeu bayésien polymatriciel.

Les distributions de probabilité locales sont supposées identiques :
$P(\theta_i = R, \theta_j = R) = 0.4$, $P(\theta_i = R, \theta_j = \bar{R}) = 0.1$, $P(\theta_i = \bar{R}, \theta_j = R) = 0.1$ et $P(\theta_i = \bar{R}, \theta_j = \bar{R}) = 0.4$.

Nous pouvons calculer les probabilités conditionnelles et marginales des types des jeux bimatriciels locaux :

— $P(\theta_j = R) = 0.5$ et $P(\theta_j = \bar{R}) = 0.5, \forall j \in N$,
— $P(\theta_j = R|\theta_i = R) = 0.8$, $P(\theta_j = \bar{R}|\theta_i = R) = 0.2$,
$P(\theta_j = R|\theta_i = \bar{R}) = 0.2$, $P(\theta_j = \bar{R}|\theta_i = \bar{R}) = 0.8, \forall (i, j) \in E$

Avec cette distribution, il est plus probable que le voisin d'un joueur reçoive une offre si ce joueur en a reçu une ou que le voisin ne reçoive pas d'offre si le joueur n'en a pas reçu.

Dans un jeu bayesien polymatriciel, pour tout joueur $i \in N$,

$$\begin{aligned} EU_i(\sigma|\theta_i) &= \sum_{e \text{ tq } i \in e} EU_i^e(\sigma_e|\theta_i), \text{ où} \\ EU_i^e(\sigma_e|\theta_i) &= EU_i^{(i,j)}(\sigma_i.\sigma_j|\theta_i) \\ &= \sum_{\theta_j} P(\theta_j|\theta_i) \times \\ &\quad \sum_{a_i, a_j} \sigma(a_i.a_j|\theta_i.\theta_j) u_i(a_i.a_j, \theta_i.\theta_j) \end{aligned}$$

Soit une stratégie σ^* consistant en quatre stratégies pures identiques σ_i^*, tel que $\sigma_i^*(\theta_i = R) = b$ et $\sigma_i^*(\theta_i = \bar{R}) = c$. Cela signifie que les joueurs suivent sans réfléchir l'offre quand ils en reçoivent une et préfèrent le fournisseur c lorsqu'ils n'en reçoivent pas. On peut calculer l'utilité espérée de cette stratégie pour un joueur i :

$$\begin{aligned} EU_i^j(\sigma^*|\theta_i = R) &= P(\theta_j = R|\theta_i = R) u_i^j(b, b, R, R) \\ &+ P(\theta_j = \bar{R}|\theta_i = R) u_i^j(b, c, R, \bar{R}) \\ &= 0.8 \times 3 + 0.2 \times 0 = 2.4 \text{ et} \\ EU_i(\sigma^*|\theta_i = R) &= 2.4 + 2.4 = 4.8 \end{aligned}$$

De la même manière, nous obtenons

$$\begin{aligned} EU_i^j(\sigma^*|\theta_i = \bar{R}) &= 0.2 u_i^j(c, b, \bar{R}, R) + 0.8 u_i^j(c, c, \bar{R}, \bar{R}) \\ &= 1.6 \\ EU_i(\sigma^*|\theta_i = \bar{R}) &= 3.2 \end{aligned}$$

On peut vérifier facilement que σ^* est bien un équilibre de Nash, puisque modifier unilatéralement l'action choisie par un joueur n'augmentera pas son utilité locale. Les stratégies inconditionnelles où chaque joueur choisit c ou choisit b sont aussi des équilibres de Nash purs.

3.3 Complexité spatiale

Bien sur, tous les jeux bayésiens n'impliquent pas exclusivement des interactions locales. Mais c'est le cas pour certains et une représentation polymatricielle du jeu, quand elle est possible, est moins coûteuse que sa représentation SNF. Ceci est connu [25] pour les jeux à information complète et c'est aussi vrai pour les (H, B)-games.
En considérant le cas d'interactions par paires : un jeu bayésien polymatriciel contient $|E| = O\left(n^2\right)$ distributions de probabilité de taille $O\left(t^2\right)$, et $2 \cdot |E|$ fonctions d'utilités de taille $O\left(t^2.d^2\right)$ où t est le nombre maximum de types pour tout joueur et d est le nombre maximum d'actions. Plus généralement, notant ρ l'arité maximale de n'importe quelle hyperarête, nous avons :

Proposition 1 (Taille de représentation)**.** *La complexité en espace de la représentation d'un (H, B)-game est $O\left(|E|.\rho.t^\rho.d^\rho\right)$. Pour le cas particulier des jeux bayésiens polymatriciels, c'est $O\left(|E|.t^2.d^2\right)$.*

Cette complexité en espace doit être comparée à la taille du jeu bayésien SNF équivalent à ce (H, B)-game. La forme normale comprend une distribution de probabilité de taille $O\left(t^n\right)$ et n fonctions d'utilité de taille $O\left(d^n \cdot t^n\right)$. Alors, quand ρ est borné par une constante (e.g. pour le cas polymatriciel, $\rho = 2$) la représentation graphique est exponentiellement moins coûteuse que la représentation SNF.

4 Des *(H,B)*-games aux jeux hypergraphiques à information complète

Au-delà de la proposition d'un nouveau cadre succinct, nous montrons que le gain de concision est obtenu sans augmentation de la complexité théorique du calcul d'un équilibre de Nash. Le principal résultat de cet article est de montrer que tout (H, B)-game peut être transformé en un jeu hypergraphique à information complète équivalent, en utilisant une transformation en *temps polynomial*. Donc, la complexité du calcul d'un équilibre de Nash dans ce cadre

©AFIA2021

n'est pas plus élevée que dans le cadre des jeux hypergraphiques à information complète. Notre travail s'inspire du résultat établi par Howson et Rosenthal [19], qui fait référence à une transformation originalement proposée par Selten [17][2] pour les jeux bayésiens à 2 joueurs. Les auteurs proposent une transformation d'un jeu bayésien à 2 joueurs en un équivalent polymatriciel. Ce résultat fondamental est présenté de manière informelle par les auteurs. Nous le présenterons plus formellement ici.

Définition 10 (Transformation en jeu polymatriciel)**.** *Soit $G = \langle N, A, \Theta, P, U\rangle$ un jeu bayésien à 2 joueurs. Nous définissons le jeu polymatriciel $\tilde{G}$ comme :*

- $\tilde{N} = \{(i, \theta_i), i \in N = \{1, 2\}, \theta_i \in \Theta_i\}$;
- $\tilde{A} = \times_{(i,\theta_i)} \tilde{A}_{i,\theta_i}$ *où* $\tilde{A}_{(i,\theta_i)} = A_i, \forall i \in N, \theta_i \in \Theta_i$;
- $\tilde{E} = \{((i, \theta_i), (j, \theta_j)), i \neq j, \theta_i \in \Theta_i, \theta_j \in \Theta_j\}$;
- $\tilde{U} = \left\{u^{(j,\theta_j)}_{(i,\theta_i)}, \big((i, \theta_i), (j, \theta_j)\big) \in \tilde{E}\right\}$, *où* $u^{(j,\theta_j)}_{(i,\theta_i)}(\tilde{a}_{(i,\theta_i)}, \tilde{a}_{(j,\theta_j)}) = P(\theta_j|\theta_i).u^j_i(\tilde{a}_{(i,\theta_i)}.\tilde{a}_{(j,\theta_j)}, \theta)$

On considère la bijection suivante entre les stratégies mixtes de G et celles de $\tilde{G}$:

Définition 11 (Transformation de stratégie)**.** *Pour une stratégie mixte σ de G, $\tilde{\sigma}$ est la stratégie de $\tilde{G}$ définie par $\tilde{\sigma}_{(i,\theta_i)}(a_i) = \sigma_i(a_i|\theta_i) \forall a_i \in A_i$.*

[19] montrent alors que :

Théorème 2 (Théorème de Howson et Rosenthal)**.** *Si G est un jeu bayésien à 2 joueurs, alors le jeu polymatriciel $\tilde{G}$ est tel que $EU_i(\sigma|\theta_i) = EU_{(i,\theta_i)}(\tilde{\sigma}), \forall i \in N, \theta_i \in \Theta_i, \forall \sigma$.*

En d'autres mots, tout jeu bayésien à 2 joueurs peut être transformé en un jeu polymatriciel équivalent (sans incertitude) et les équilibres de Nash de ces deux jeux sont en bijection. Notez aussi que, puisque N contient seulement deux joueurs, le graphe résultant $(\tilde{N}, \tilde{E})$ est biparti.

4.1 Extension du théorème de Howson et Rosenthal aux jeux bayésiens polymatriciels

Le théorème 2 concerne les jeux bayésiens à 2 joueurs sous forme normale. Nous pouvons l'étendre aux jeux bayésiens polymatriciels :

Théorème 3 (Transformation d'un jeu bayésien polymatriciel)**.** *Pour tout jeu bayésien polymatriciel G, il existe un jeu polymatriciel $\tilde{G}$ tel que :*
$EU_i(\sigma|\theta_i) = EU_{(i,\theta_i)}(\tilde{\sigma}), \forall i \in N, \forall \theta_i \in \Theta_i, \forall \sigma$

Ici, $\tilde{G}$ est obtenu à partir des jeux polymatriciels locaux $\tilde{G}^e$ construits à partir des jeux bimatriciels locaux G^e, comme dans la définition 10. En effet, nous construisons $\tilde{N} = \cup_{e\in E}\tilde{N}^e$ et $\tilde{E} = \cup_{e\in E}\tilde{E}^e$ ($\tilde{A}$ et $\tilde{U}$ sont ensuite définis naturellement). $\tilde{\sigma}$ est défini selon la définition 11. Pour tous les jeux locaux de G, nous utilisons cette transformation pour les transformer en jeux locaux de $\tilde{G}$. Donc, lorsque $n > 2$ le graphe du jeu obtenu n'est pas biparti.

En reprenant l'exemple de la section 3.2, le jeu bayésien polymatriciel à 4 joueurs devient un jeu polymatriciel à information complète à 8 joueurs. Le graphe de ce jeu est représenté dans la figure 3. Chaque arête $\big((i, \theta_i), (j, \theta_j)\big)$ correspond à un jeu bimatriciel, dont la table d'utilité sera différente en fonction de la paire (θ_i, θ_j) des joueurs. Ces tables sont représentées dans la figure 4.

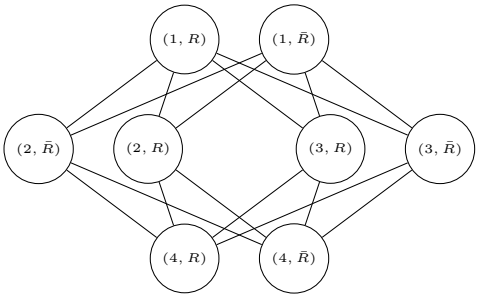


FIGURE 3 – Graphe du jeu polymatriciel à 8 joueurs correspondant au jeu bayésien polymatriciel à 4 joueurs de la figure 1.

(i, R)

	(j,R) b	(j,R) c	$(j,\bar{R})$ b	$(j,\bar{R})$ c
b	$2.4, 2.4$	$0, 0$	$0.6, 0.2$	$0, 0$
c	$0, 0$	$1.6, 1.6$	$0, 0$	$0.4, 0.4$

$(i, \bar{R})$

	(j,R) b	(j,R) c	$(j,\bar{R})$ b	$(j,\bar{R})$ c
b	$0.2, 0.6$	$0, 0$	$0.8, 0.8$	$0, 0$
c	$0, 0$	$0.4, 0.4$	$0, 0$	$1.6, 1.6$

FIGURE 4 – Tables d'utilité du jeu polymatriciel à 8 joueurs.

4.2 Extension du théorème de Howson et Rosenthal au jeux bayésiens hypergraphiques

Nous allons suivre, pour les (H, B)-games, la même approche que pour les jeux bayésiens polymatriciels. Nous allons d'abord définir la transformation :

Définition 12 (Transformation d'un (H, B)-game)**.** *Soit $G = \langle N, A, \Theta, E, P, U\rangle$ un (H, B)-game. $\tilde{G}$ est le jeu hypergraphique défini par :*

- $\tilde{N} = \{(i, \theta_i), i \in N, \theta_i \in \Theta_i\}$
- $\tilde{A} = \times_{(i,\theta_i)} \tilde{A}_{i,\theta_i}$ *où* $A_{(i,\theta_i)} = A_i$
- $\tilde{E} = \{\tilde{\theta_e}, e \in E, \theta_e \in \Theta_e\}$ *où* $\tilde{\theta_e} = \{(i, \theta_i), i \in e, \theta_i \in \theta_e\}$
- $\tilde{U} = \{u^{\tilde{\theta_e}}_{(i,\theta_i)}, \tilde{\theta_e} \in \tilde{E}, (i, \theta_i) \in \tilde{\theta_e}\}$
  où $u^{\tilde{\theta_e}}_{(i,\theta_i)}(a_e) = p(\theta_{e-\{i\}}|\theta_i).u^e_i(a_e, \theta_e)$

Cette définition généralise la définition 10. Considérons $\tilde{\sigma}$ la stratégie de $\tilde{G}$ correspondant à σ (voir la définition 11). Nous pouvons montrer que :

2. Il est intéressant de mentionner que Selten et Harsanyi sont co-détenteurs, avec Nash, du prix Nobel en science économique, pour leur "analyse innovante de l'équilibre en théorie des jeux compétitifs".

Théorème 4 (Transformation d'un jeu bayésien sous forme normale)**.** *Pour tout jeu bayésien G, il existe un jeu hypergraphique $\tilde{G}$ tel que $EU_i(\sigma|\theta_i) = EU_{(i,\theta_i)}(\tilde{\sigma}), \forall i \in N, \theta_i \in \Theta_i, \forall \sigma$.*

Ce théorème généralise le théorème de Howson et Rosenthal aux jeux bayésiens à n joueurs. Bien sur, σ est un équilibre de Nash de G si et seulement si $\tilde{\sigma}$ est un équilibre de $\tilde{G}$. Notez que $\tilde{G}$ dans le théorème 4 est obtenu à partir de la définition 12, en considérant une seule hyperarête e de taille n. Ainsi, le jeu hypergraphique obtenu a $\sum_{i \in N} |\Theta_i|$ noeuds et $|\Theta|$ hyperarêtes de taille n. Cette transformation n'est donc pas forcément très utile pour les jeux bayésiens sous forme normale. Cependant, grâce au théorème 4, nous obtenons :

Théorème 5 (Transformation d'un (H, B)-game)**.** *Si G est un (H, B)-game et $\tilde{G}$ un jeu équivalent comme défini dans la définition 12, alors $EU_i(\sigma|\theta_i) = EU_{(i,\theta_i)}(\tilde{\sigma}), \forall i \in N, \theta_i \in \Theta_i, \forall \sigma$.*

Il est donc possible de transformer n'importe quel (H, B)-game en un jeu hypergraphique à information complète. Dans la suite, nous montrons que la transformation en jeu hypergraphique à information complète est un résultat important, puisque qu'elle peut être effectuée en temps polynomial.

4.3 "The games world is (still) flat"

Puisque le problème de recherche d'un équilibre de Nash mixte dans les jeux polymatriciels ou hypergraphiques à information complète est PPAD-complet [11], la recherche d'un équilibre de Nash mixte dans un jeu bayésien polymatriciel/hypergraphique n'est pas plus facile (l'existence d'un équilibre est garantie, car tout (H, B)-game G est équivalent à un jeu bayésien sous forme normale $\langle N, A, \Theta, P, \{u_i\}\rangle$ où u_i est donné par la définition 9).
Néanmoins, nous montrons que ce problème n'est en réalité pas plus dur. En effet, on peut montrer que :

Lemme 1 (Transformation en temps polynomial)**.** *Pour tout (H, B)-game G, $\tilde{G}$ peut être calculé en temps polynomial.*

La taille de $\tilde{G}$ est comparable à celle de G. En notant t le nombre maximum de types, d le nombre maximum d'actions et ρ l'arité maximale des hyperarêtes, on constate que représenter G demande de stocker $|E|.t^{\rho}.(\rho.d^{\rho} + 1)$ nombres. D'un autre coté, $\tilde{G}$ contient $|E|.t^{\rho}$ jeux SNF avec $\rho.t$ tables de d^{ρ} nombres, i.e. $|E|.t^{\rho+1}.\rho.d^{\rho}$ nombres.
Nous dérivons du lemme 1 que :

Proposition 2 (Complexité)**.** *Le problème de recherche d'un équilibre de Nash mixte dans un (H, B)-game est* PPAD*-complet. La* PPAD*-complétude est également vérifiée pour les jeux bayésiens polymatriciels.*

Cela signifie que résoudre un (H, B)-game n'est pas plus difficile que résoudre un jeu hypergraphique à information complète de taille similaire. En d'autres mots, dans les jeux bayésiens comme dans les jeux classiques "the game world is flat", comme écrit par [11].
Maintenant, remarquons que les jeux bayésiens sous forme normale sont des (H, B)-games (dégénérés), avec une seule hyperarête. Donc la transformation en temps polynomial s'applique aussi à eux. Nous en déduisons :

Proposition 3 (Complexité des jeux bayésiens)**.** *Calculer un équilibre de Nash mixte dans un jeu bayésien sous forme normale est un problème* PPAD*-complet.*

A notre connaissance ce résultat n'a pas encore été montré. Seule la NP-complétude du problème d'existence d'un EN *pur* dans un jeu bayésien a été montrée [10].
En ce qui concerne les équilibres de Nash purs dans les (H, B)-games, nous déduisons du théorème 5 :

Proposition 4 (Équivalence de l'équilibre Nash pur)**.** *σ est un équilibre de Nash pur du (H, B)-game G ssi $\tilde{\sigma}$ est un équilibre de Nash pur de $\tilde{G}$.*

Ceci implique que décider si un (H, B)-game a un EN pur ou non appartient à NP. La NP-complétude du problème est déduite du résultat connu, que décider si un jeu bayésien à 2 joueurs admet un EN pur est NP-complet [10] :

Proposition 5 (Complexité d'un équilibre de Nash pur)**.** *Déterminer s'il existe un équilibre de Nash pur dans un (H, B)-game est un problème NP-complet.*

Pour résumer, le gain en espace, potentiellement exponentiel, offert par les (H, B)-games par rapport aux jeux bayesiens sous forme normale n'augmente pas la complexité théorique de la résolution.

5 Conclusion

Dans cet article, nous proposons un nouveau cadre, les *jeux bayésiens hypergraphiques*, permettant de représenter des jeux à information incomplète de manière succincte. Notre principal résultat est de généraliser le théorème de Howson et Rosenthal et de montrer que n'importe quel (H, B)-game peut être transformé, en temps polynomial, en un jeu hypergraphique équivalent. De plus, la taille de description du jeu hypergraphique résultant est comparable à celle du (H, B)-game d'origine. Ceci est aussi vrai pour les jeux polymatriciels. Ce résultat a d'importantes conséquences, d'un point de vue algorithmique et de complexité théorique. Premièrement, nous avons prouvé que le calcul d'un équilibre de Nash mixte dans un (H, B)-game est PPAD-complet. Ceci fournit également la preuve que la recherche d'un EN dans un jeu bayésien sous forme normale est PPAD-complet.
Les *Bayesian Action-Graph Games (BAGG)* [20] sont une autre représentation succincte des jeux bayésiens, représentant leur fonction d'utilité comme dans le cadre des *Action-Graph Games (AGG)* [21]. Bien qu'elle puisse être exponentiellement plus compacte, la représentation de la distribution de probabilité sous forme d'un réseau bayésien peut être beaucoup plus coûteuse qu'un produit de distributions marginales. Le calcul d'utilité peut prendre un temps exponentiel(à cause de l'inférence). Le calcul d'un équilibre

©AFIA2021

de Nash mixte dans un BAGG est probablement plus complexe que pour les (H, B)-games pour différents types de distributions de probabilité possibles. Cependant il existe vraisemblablement des types de distributions de probabilité pour lesquels la transformation d'un BAGG en AGG peut être fait en temps polynomial. La comparaison des propriétés des cadres BAGG et (H, B)-games semble une perspective intéressante.

D'un point de vue algorithmique, puisque les (H, B)-games peuvent être transformés en temps polynomial en jeux hypergraphique, nous pouvons adapter aux (H, B)-games les algorithmes de résolution, exacte ou approchée, existant pour les jeux hypergraphiques, polymatriciels et graphiques [18, 24, 27, 28, 8]. Ceci est aussi intéressant pour les jeux Bayésiens classiques, même si leur transformation en jeu hypergraphique est en général coûteuse. En effet, la littérature sur l'algorithmique du calcul d'équilibres dans les jeux bayésiens est peu abondante [1, 7, 6].

Références

[1] O. Armantier, J.P. Florens, and J.F. Richard. Approximation of bayesian nash equilibrium. *Journal of Applied Econometrics*, 23(7) :965–981, 2008.

[2] R. Aumann and A. Brandenburger. Epistemic conditions for nash equilibrium. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 1161–1180, 1995.

[3] P. Battigalli and G. Bonanno. Recent results on belief, knowledge and the epistemic foundations of game theory. *Research in Economics*, 53(2) :149–225, 1999.

[4] A. Brandenburger. Epistemic game theory : an overview. *The New Palgrave Dictionary of Economics, 2nd edition*, 2008.

[5] A. Brandenburger and E. Dekel. Hierarchies of beliefs and common knowledge. *Journal of Economic Theory*, 59(1) :189–198, 1993.

[6] G. Cai and P.R. Wurman. Monte carlo approximation in incomplete information sequential auction games. *Decision Support Systems*, 39(2) :153–168, 2005.

[7] S. Ceppi, N. Gatti, and N. Basilico. Computing bayes-nash equilibria through support enumeration methods in bayesian two-player strategic-form games. In *IAT*, pages 541–548, 2009.

[8] A.C. Chapman, A. Farinelli, E.M. de Cote, A. Rogers, and N.R. Jennings. A distributed algorithm for optimising over pure strategy nash equilibria. In *AAAI*, pages 749—755, 2010.

[9] X. Chen and X. Deng. Settling the complexity of two-player nash-equilibrium. In *FOCS*, pages 261–272, 2006.

[10] V. Conitzer and T. Sandholm. New complexity results about nash equilibria. *Games and Economic Behavior*, 63(2) :621–641, 2008.

[11] C. Daskalakis, A. Fabrikant, and C.H. Papadimitriou. The game world is flat : The complexity of nash equilibria in succinct games. In *ICALP*, pages 513–524. Springer, 2006.

[12] C. Daskalakis, P.W. Goldberg, and C.H. Papadimitriou. The complexity of computing a nash equilibrium. *SIAM Journal on Computing*, 39(1) :195–259, 2009.

[13] E. Dekel and M. Siniscalchi. Epistemic game theory. In *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, volume 4, pages 619–702. Elsevier, 2015.

[14] A. Deligkas, J. Fearnley, R. Savani, and P. Spirakis. Computing approximate nash equilibria in polymatrix games. In *WINE*, pages 58–71. Springer, 2014.

[15] G. Gottlob, G. Greco, and F. Scarcello. Pure nash equilibria : Hard and easy games. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 24 :357–406, 2005.

[16] A. Grubshtein and A. Meisels. Finding a nash equilibrium by asynchronous backtracking. In *CP*, pages 925–940. Springer, 2012.

[17] J.C. Harsanyi. Games with incomplete information played by "bayesian" players, i–iii part i. the basic model. *Management science*, 14(3) :159–182, 1967.

[18] J.T. Howson. Equilibria of polymatrix games. *Management Science*, 18(5-part-1) :312–318, 1972.

[19] J.T. Howson and R.W. Rosenthal. Bayesian equilibria of finite two-person games with incomplete information. *Management Science*, 21(3) :313–315, 1974.

[20] A.X. Jiang and K. Leyton-Brown. Bayesian action-graph games. In *NIPS*, volume 23, pages 991–999, 2010.

[21] A.X. Jiang, K. Leyton-Brown, and N.A.R. Bhat. Action-graph games. *Games and Economic Behavior*, 71(1) :141–173, 2011.

[22] M. Kearns, M.L. Littman, and S. Singh. Graphical models for game theory. *UAI*, pages 253–260, 2001.

[23] R.B. Myerson. Comments on "games with incomplete information played by 'bayesian'players, i–iii harsanyi's games with incomplete information". *Management Science*, 50(12_supplement) :1818–1824, 2004.

[24] L.E. Ortiz and M. Kearns. Nash propagation for loopy graphical games. In *NIPS*, volume 15, pages 817–824, 2003.

[25] C.H. Papadimitriou and T. Roughgarden. Computing correlated equilibria in multi-player games. *Journal of the ACM (JACM)*, 55(3) :1–29, 2008.

[26] S. Simon and D. Wojtczak. Constrained pure nash equilibria in polymatrix games. In *AAAI*, pages 691–697, 2017.

[27] D. Vickrey and D. Koller. Multi-agent algorithms for solving graphical games. In *AAAI*, pages 345–351, 2002.

[28] M. Wahbi and K.N. Brown. A distributed asynchronous solver for nash equilibria in hypergraphical games. In *ECAI*, pages 1291–1299. IOS Press, 2016.

[29] E.B. Yanovskaya. Equilibrium points in polymatrix games. *Litovskii Matematicheskii Sbornik*, 8 :381–384, 1968.

Améliorer la généralisation de l'équité en apprentissage grâce à l'Optimisation Distributionnellement Robuste

J. Ferry[1], U. Aïvodji[2], S. Gambs[2], M-J. Huguet[1], M.Siala[1]

[1] LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, INSA, Toulouse, France
[2] UQAM, Montréal, Canada

jferry@laas.fr

Résumé

Pour répondre aux enjeux de biais non-désirés en apprentissage machine, de nombreux travaux ont proposé des techniques d'amélioration de l'équité se basant sur des métriques statistiques. Cependant, l'expérience montre que la généralisation sur de nouvelles données n'est pas toujours au rendez-vous. Pour répondre à ce problème, nous proposons une technique d'Optimisation Distributionnellement Robuste permettant de générer des modèles d'apprentissage dont l'équité généralise mieux sur des nouvelles données. L'évaluation expérimentale de cette technique démontre son efficacité.

Mots-clés

Apprentissage supervisé, Equité, Généralisation, Optimisation Distributionnellement Robuste.

Abstract

Recent work have proposed fairness enhancement methods based on statistical metrics to address the problem of negative bias in machine learning. However, it has been shown that these methods do not always generalize well to new data. To address this issue, we propose a Distributionally Robust Optimization technique allowing for the generation of learning models whose fairness generalizes better to new data. Empirical evaluation demonstrates the effectiveness of the approach.

Keywords

Supervised Learning, Fairness, Generalization, Distributionally Robust Optimization

1 Introduction

Le déploiement croissant de systèmes d'intelligence artificielle soulève l'enjeu, de plus en plus étudié, de l'équité de ces systèmes. En particulier, l'objectif est souvent d'assurer que des systèmes, entraînés sur des données historiquement biaisées, ne reproduisent pas ces biais, parfois implicites. Considérant que certains attributs, dits sensibles, ne devraient pas (pour des raisons éthiques et/ou légales) influer sur la décision, différentes métriques d'équité statistique ont été proposées. Elles reposent généralement sur le même principe : égaliser la valeur d'une certaine mesure (par exemple le taux de prédictions positives) entre des groupes différant par la valeur d'un ou plusieurs attribut(s) sensible(s). Plusieurs méthodes ont été proposées pour apprendre des modèles respectant ces contraintes d'équité sur leur ensemble d'entraînement. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois grandes familles d'approches. D'une part, les approches de *preprocessing* [8] ou de *postprocessing* [6] interviennent respectivement avant (pour éliminer le biais des données d'entraînement) et après (en modifiant les prédictions pour les rendre équitables) la phase d'apprentissage qui conduit à la construction du modèle. Enfin, les approches *inprocessing* [11] consistent à modifier directement l'algorithme d'apprentissage afin de construire des modèles équitables à partir de données possiblement biaisées. La méthode que nous proposons s'applique à cette dernière famille de techniques. Cependant, quelle que soit l'approche choisie, la généralisation de l'équité de ces modèles sur de nouvelles données n'est souvent pas au rendez-vous.

Pour améliorer cette généralisation, [7] propose l'ajout d'un terme de régularisation (mesurant la stabilité) à la fonction objectif d'un problème d'apprentissage équitable. En s'assurant que les prédictions du modèle ne varient pas trop lorsque l'ensemble d'entraînement est perturbé, cette méthode permet de borner théoriquement l'erreur de généralisation.

Plusieurs approches améliorant la généralisation de métriques statistiques d'équité [3, 4, 9] sont basées sur la méthode de [1], qui formule le problème d'apprentissage équitable comme un jeu à deux joueurs. L'un des joueurs optimise la fonction objectif (incluant un terme d'équité) et l'autre cherche à approximer la relaxation Lagrangienne la plus difficile en modifiant les coefficients Lagrangiens associés à la violation de l'équité. Dans [3, 4], le second joueur met à jour les coefficients Lagrangiens associés aux contraintes d'équité en mesurant la violation de l'équité sur un ensemble de validation séparé (plutôt que sur l'ensemble d'entraînement lui-même), ce qui permet d'améliorer la généralisation de ces contraintes.

Enfin, plutôt que d'optimiser une fonction objectif f sur un ensemble $\mathcal{D}$, l'Optimisation Distributionnellement Robuste (ODR) consiste à optimiser f sur le "pire cas", parmi un ensemble de perturbations de $\mathcal{D}$ [10] (et donc d'optimiser f

©AFIA2021

pour un ensemble de distributions voisines de $\mathcal{D}$). D'autres travaux récents utilisent le principe de l'ODR pour améliorer la généralisation de l'équité [9, 10]. Dans [10], un modèle est construit en minimisant l'erreur maximale sur un ensemble de groupes définis par la valeur d'attributs biaisés. L'approche d'ODR de [9] reprend la formulation de [1]. Le second joueur mesure alors la violation de l'équité "pire cas" en pondérant les instances d'entraînement (l'équité est ainsi optimisée pour un ensemble de pondérations des instances de l'ensemble d'entraînement).

2 Problématique

Nous considérons un algorithme d'apprentissage supervisé équitable de la littérature, produisant des modèles interprétables de type *rule list* : `FairCORELS` [2] [1]. Cet algorithme se base sur une approche de type branch and bound explorant l'ensemble $\mathcal{R}$ des *rule lists* à l'aide d'un arbre des préfixes. Dans cet arbre, chaque noeud correspond à une règle et chaque chemin (depuis la racine) est une solution possible. Ainsi, une étape préalable à l'utilisation de `FairCORELS` est le minage de règles. Ces dernières peuvent être n'importe quelle combinaison des attributs du jeu de données et doivent prendre une valeur binaire pour toutes les instances du jeu de données d'entraînement. L'objectif de `FairCORELS` est de déterminer la solution minimisant la fonction objectif f_{obj} (somme pondérée de l'erreur de classification et du nombre de règles) tout en respectant une contrainte d'équité ϵ donnée.
Soit $\mathcal{D} = (X, Y, A)$ l'ensemble de données d'entraînement, où X est l'ensemble des attributs non sensibles, Y l'ensemble des étiquettes et A l'attribut (ou l'ensemble des attributs) sensible(s). La fonction `misc(.)` mesure l'erreur de classification alors que `unf(.)` quantifie la violation de l'équité (selon la métrique choisie). La *rule list* recherchée r^* est la solution du problème suivant, où K_r désigne la longueur de r, et λ est un coefficient de régularisation :

$$\begin{aligned} \underset{r \in \mathcal{R}}{\arg\min} \quad & f_{obj} = \texttt{misc}(r, X, Y) + \lambda . K_r \\ \text{s.t.} \quad & \texttt{unf}(r, X, Y, A) \leq \epsilon, \end{aligned}$$

A chaque itération, un préfixe r est évalué. S'il améliore f_{obj} et respecte la contrainte d'équité (sur l'ensemble d'entraînement), la meilleure solution courante est mise à jour. Plusieurs heuristiques peuvent être utilisées pour guider l'exploration, dont l'efficacité est améliorée par l'existence de différentes bornes. `FairCORELS` retourne théoriquement la solution optimale, c'est-à-dire la *rule list* pour laquelle f_{obj} est minimisée, et qui respecte la contrainte d'équité. Toutefois, la taille de l'arbre des préfixes augmentant exponentiellement avec le nombre de règles, un paramètre n_{iter} définit le nombre maximal de noeuds à explorer dans l'arbre des préfixes. Ce paramètre limite l'espace mémoire utilisé par le programme, permettant ainsi d'obtenir de bonnes solutions dans un délai maîtrisé.

1. https ://github.com/ferryjul/fairCORELS

Il est possible d'utiliser `FairCORELS` pour générer un ensemble de solutions, en réalisant des appels successifs pour différentes valeurs d'ϵ. On obtient ainsi un ensemble de compromis précision/équité, qu'on peut représenter par un front de Pareto sur l'ensemble d'entraînement. Cependant, ces solutions définissent souvent un ensemble de compromis moins intéressants sur leur ensemble de test, en raison d'une mauvaise généralisation de l'équité, notamment lorsque les contraintes sont fortes (ϵ faible). Plusieurs travaux récents ont ainsi proposé des méthodes pour palier à ce problème [3, 4, 7, 9, 10].

3 Méthode proposée

Notre objectif est d'obtenir des modèles dont l'équité généralise bien sur l'ensemble de test (c'est-à-dire de nouvelles données non observées pendant l'entraînement de ces modèles). A l'inverse de la précision, l'équité statistique se mesure uniquement sur des ensembles d'instances (et pas sur des instances seules). En outre, il est possible qu'un modèle paraisse équitable sur un ensemble donné, tout en prenant des décisions non équitables localement [5]. Notre intuition est qu'assurer l'équité sur plusieurs sous-ensembles de l'ensemble d'entraînement peut forcer le modèle construit à une meilleure organisation de ses décisions, et par conséquence à une meilleure généralisation de l'équité. Chaque sous-ensemble aléatoire de taille suffisamment importante présente une distribution voisine de celle de l'ensemble global. Pour cette raison, notre méthode est directement inspirée de l'Optimisation Distributionnellement Robuste, qui vise à optimiser une métrique (ici l'équité) sur un ensemble donné (ici l'ensemble d'entraînement $\mathcal{D}$), mais également sur un ensemble de distributions voisines (ici les sous-ensembles de $\mathcal{D}$).
Dans le contexte de `FairCORELS`, l'approche proposée consiste à s'assurer que la *rule list* générée respecte la contrainte d'équité sur l'ensemble d'entraînement, et sur un certain nombre de sous-ensembles aléatoires de celui-ci, approximant les "distributions voisines" du cadre de l'ODR. Pour cela, n masques binaires aléatoires sont générés et utilisés afin de définir n sous-ensembles de l'ensemble d'entraînement. Lorsque la *rule list* évaluée r permet d'améliorer la fonction objectif, on ne met à jour la meilleure solution courante que si r respecte la contrainte d'équité sur l'ensemble d'entraînement et sur chacun des sous-ensembles définis par les n masques. La *rule list* recherchée r^* est donc la solution du problème suivant, où V_i est le sous-ensemble de V défini par le masque i, pour $V \in \{X, Y, A\}$:

$$\begin{aligned} \underset{r \in \mathcal{R}}{\arg\min} \quad & f_{obj} = \texttt{misc}(r, X, Y) + \lambda . K_r \\ \text{s.t.} \quad & \texttt{unf}(r, X, Y, A) \leq \epsilon, \\ & \underset{\forall i \in [n]}{\texttt{unf}(r, X_i, Y_i, A_i) \leq \epsilon} \end{aligned}$$

4 Evaluation expérimentale

Afin d'évaluer notre méthode, nous calculons un ensemble de solutions non-dominées (en faisant varier la contrainte

Jeu de données	Nombre d'instances	Attribut sensible	Nombre de règles minées	Prédiction
Adult Income	33 917	Homme/Femme	183	Salaire : haut/bas
COMPAS	5 273	African-American/Caucasian	165	Récidive : oui/non
Default of Credit Card	29 986	Homme/Femme	189	Paiement refusé le mois prochain : oui/non
Marketing	41 175	Age : entre 30 et 60 ans ou pas	179	Souscription : oui/non

TABLE 1 – Caractéristiques des différents jeux de données (après notre pré-traitement) utilisés pour évaluer notre méthode

d'équité) pour trois valeurs de masques : 0 (cas où notre méthode n'est pas utilisée), 10 et 30. Cette évaluation a été réalisée pour six métriques statistiques d'équité (*Statistical Parity*, *Predictive Parity*, *Predictive Equality*, *Equal Opportunity*, *Equalized Odds* et *Conditional Use Accuracy Equality*), sur quatre ensembles de données (*Adult Income*, *COMPAS*, *Default of Credit Card* et *Marketing*). Les caractéristiques (taille, attribut sensible, ...) de ces ensembles de données sont résumés dans le tableau 1.

Les quatre ensembles de données regroupent des données historiquement biaisées (notamment par rapport à l'attribut sensible considéré), et peuvent donc être utilisés pour générer des ensembles de compromis entre la précision et l'équité. Afin de pouvoir utiliser `FairCORELS` sur ces ensembles de données, nous les avons binarisés, avant de calculer, pour chacun d'entre eux, un ensemble de règles. Les règles minées sont des conjonctions d'au plus deux attributs (ou leur négation) capturant plus de $min_{support}\%$ des instances de l'ensemble de données, où $min_{support}$ est choisi de sorte à limiter le nombre de règles minées. Pour toutes nos expérimentations, n_{iter} est fixé à 25.10^5, $\lambda = 10^{-3}$ et l'heuristique d'exploration utilisée est le `BFS obj.-aware` (une recherche en largeur priorisant les solutions présentant une meilleure valeur de f_{obj} parmi celles de même profondeur). Les valeurs reportées (précision et équité) sont obtenues au moyen d'une *validation croisée 5-folds*. Tous les résultats obtenus confortent les observations présentées ci-après sur l'ensemble de données *Default of Credit Card* et pour la métrique d'équité *Predictive Equality*.

La figure 1 présente la généralisation des solutions construites, où les points les plus proches de la diagonale correspondent aux solutions dont l'équité généralise le mieux. Elle illustre l'amélioration apportée pour la généralisation de l'équité, en particulier pour des contraintes fortes d'équité. En effet, on peut voir que lorsque la violation de l'équité sur l'ensemble d'entraînement est faible, les solutions obtenues en utilisant la méthode basée sur l'ODR (`10masks` et `30masks`) présentent une violation de l'équité en test plus faible que celles obtenues sans ODR (`0masks`). La figure 2 suggère qu'un compromis entre performance sur l'ensemble d'entraînement (équité et précision) et généralisation doit être fait. En effet, la méthode basée sur l'ODR permet de générer des solutions moins performantes sur l'ensemble d'entraînement, mais plus robustes (généralisant mieux). La figure 3 démontre qu'une conséquence de l'amélioration de la généralisation

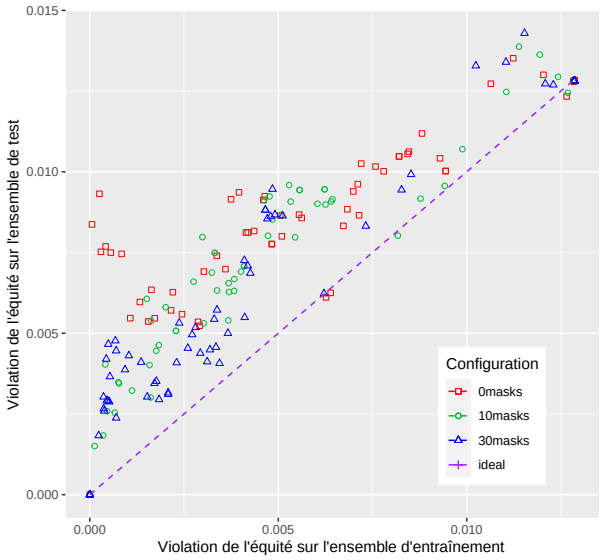


FIGURE 1 – Equité sur l'ensemble de test en fonction de l'équité sur l'ensemble d'entraînement pour la *Predictive Equality* sur l'ensemble de données *Default of Credit Card*

de l'équité est la production d'un front de Pareto sur l'ensemble de test plus garni. L'utilisation de notre méthode permet en effet de générer des solutions avec des violations d'équité très faibles, y compris sur de nouvelles données, sans affecter de manière trop importante la précision. Le nombre de masques conduisant à la meilleure généralisation varie selon la métrique d'équité et le jeu de données considérés. L'ensemble des résultats obtenus démontrent ainsi l'intérêt de l'approche proposée : générer des solutions plus robustes, et présentant de meilleurs compromis équité/précision sur de nouvelles données, au prix d'une performance dégradée sur l'ensemble d'entraînement.

5 Conclusion

Nous proposons une méthode inspirée de l'ODR améliorant la généralisation de l'équité en apprentissage supervisé. Une évaluation expérimentale en démontre l'intérêt, bien qu'elle ne s'accompagne pas de garanties théoriques. Les perspectives futures portent sur l'étude de l'impact du nombre de masques sur la généralisation ainsi que des extensions pour d'autres modèles d'apprentissage équitable.

©AFIA2021

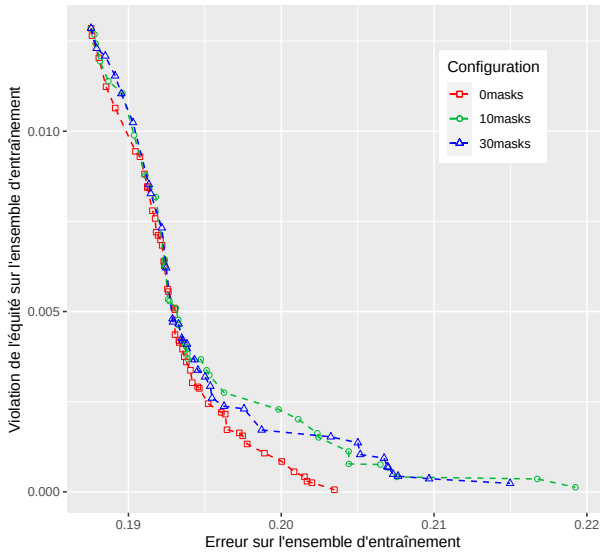


FIGURE 2 – Front de Pareto (violation de l'équité en fonction de l'erreur) sur l'ensemble d'entraînement, pour la *Predictive Equality*, sur l'ensemble de données *Default of Credit Card*

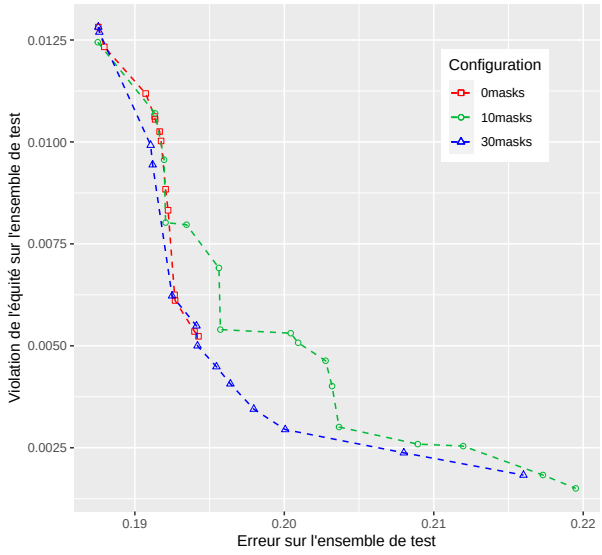


FIGURE 3 – Front de Pareto (violation de l'équité en fonction de l'erreur) sur l'ensemble de test, pour la *Predictive Equality*, sur le jeu de données *Default of Credit Card*

Références

[1] Alekh Agarwal, Alina Beygelzimer, Miroslav Dudík, John Langford, and Hanna M. Wallach. A reductions approach to fair classification. In Jennifer G. Dy and Andreas Krause, editors, *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, ICML 2018, Stockholmsmässan, Stockholm, Sweden, July 10-15, 2018*, volume 80 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 60–69. PMLR, 2018.

[2] Ulrich Aïvodji, Julien Ferry, Sébastien Gambs, Marie-José Huguet, and Mohamed Siala. Learning fair rule lists. *arXiv preprint arXiv :1909.03977*, 2019.

[3] Andrew Cotter, Maya Gupta, Heinrich Jiang, Nathan Srebro, Karthik Sridharan, Serena Wang, Blake Woodworth, and Seungil You. Training fairness-constrained classifiers to generalize, 2018.

[4] Andrew Cotter, Maya Gupta, Heinrich Jiang, Nathan Srebro, Karthik Sridharan, Serena Wang, Blake Woodworth, and Seungil You. Training well-generalizing classifiers for fairness metrics and other data-dependent constraints. In *International Conference on Machine Learning*, pages 1397–1405. PMLR, 2019.

[5] Cynthia Dwork, Moritz Hardt, Toniann Pitassi, Omer Reingold, and Richard Zemel. Fairness through awareness. In *Proceedings of the 3rd innovations in theoretical computer science conference*, pages 214–226, 2012.

[6] Moritz Hardt, Eric Price, and Nathan Srebro. Equality of opportunity in supervised learning. *arXiv preprint arXiv :1610.02413*, 2016.

[7] Lingxiao Huang and Nisheeth K. Vishnoi. Stable and fair classification. *36th International Conference on Machine Learning, ICML 2019*, 2019-June :5130–5144, 2 2019.

[8] Faisal Kamiran and Toon Calders. Data preprocessing techniques for classification without discrimination. *Knowledge and Information Systems*, 33(1) :1–33, 2012.

[9] Debmalya Mandal, Samuel Deng, Suman Jana, Jeannette Wing, and Daniel J Hsu. Ensuring fairness beyond the training data. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 2020.

[10] Shiori Sagawa, Pang Wei Koh, Tatsunori B Hashimoto, and Percy Liang. Distributionally robust neural networks for group shifts : On the importance of regularization for worst-case generalization. *arXiv preprint arXiv :1911.08731*, 2019.

[11] Muhammad Bilal Zafar, Isabel Valera, Manuel Gomez Rodriguez, and Krishna P Gummadi. Fairness beyond disparate treatment & disparate impact : Learning classification without disparate mistreatment. In *Proceedings of the 26th international conference on world wide web*, pages 1171–1180, 2017.

IA de confiance : condition nécessaire pour le déploiement de l'IA dans les systèmes critiques

J. Mattioli[8], F. Terrier[3], L. Cantat[4], R. Gelin[5], J. Chiaroni[7], Y. Bonhomme[4], H. Amadou-Boubacar[1], E. Escorihuela[2], S. Picard[6], C. Alix[8]

[1] Air Liquide, [2] Airbus, [3] CEA, [4]IRT SystemX, [5] Renault, [6] SAFRAN,
[7] Secrétariat général pour l'investissement, [8]Thales

juliette.mattioli@thalesgroup.com

Résumé

Avec le renouveau de l'IA, on assiste aujourd'hui à une croissance de ses usages, sans précédent. Ce qui a changé ces dernières années, c'est que la recherche est passée de connaissances théoriques à de nombreuses applications pratiques. Malgré ces résultats très prometteurs trop peu de preuves de concept (PoC) atteignent un déploiement au niveau de la production des systèmes critiques. L'une des causes est que le déploiement dans des industries telles que l'aéronautique, l'énergie, l'automobile, la défense, la santé, la fabrication, etc. nécessite la conformité à des objectifs de qualité, de sûreté, de sécurité et de fiabilité qui ne sont pas complétés par des systèmes d'IA à l'état de l'art. Ainsi, un système critique à base d'IA doit reposer sur des méthodes de développement bien définies, de sa conception à son déploiement et sa qualification. Cela nécessite une chaîne d'outils de bout en bout garantissant la confiance à toutes les étapes : (1) la spécification, les connaissances et la gestion des données ; (2) conception d'algorithmes et d'architecture de système avec la préoccupation de la relation à l'humain ; (3) caractérisation, vérification et validation des fonctions de l'IA ; (4) déploiement, en particulier sur l'architecture embarquée ; (5) qualification, certification d'un point de vue système.

Mots-clés

IA, confiance, méthodologie, ingénierie algorithmique, ingénierie des données, ingénierie de la connaissance, ingénierie système, méthodes formelles, système critique.

Abstract

With the renewal of AI, we observe an unprecedented growth of its usage. What has changed is that research in recent years turns from theoretical insights into various practical applications. Despite these very promising results, too few Proof of Concept (PoC) are reaching production level deployment within critical systems. One of the causes is that deployment in industries as aeronautics, energy, automotive, defense, health, manufacturing, etc. requires conformity to quality, safety, security, reliability objectives that are from being completed by state-of-the-art AI systems. Thus, an AI based critical system needs to have well defined development methods from its design to its deployment and qualification. This requires a complete tool chain ensuring trust at all stages, as : (1) specification, knowledge and data management ; (2) algorithm and system architecture design taking into account human in the loop ; (3) characterization, verification and validation of AI functions ; (4) deployment, particularly on embedded architecture ; (5) qualification, certification from a system point of view.

Keywords

AI, Trust, Methodology, Algorithm Engineering, Data Engineering, Knowledge Engineering, System Engineering, Formal Methods, Critical Systems

1 Les enjeux de l'IA de confiance

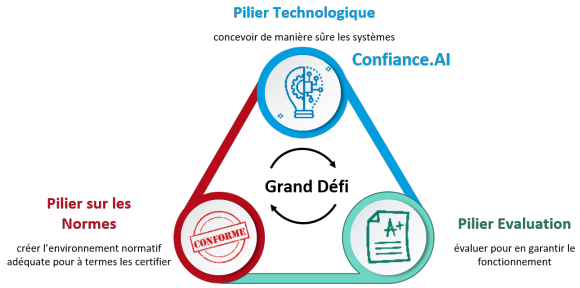


FIGURE 1 – Le Grand Défi de l'IA de confiance repose sur 3 piliers : le pilier technologique avec le programme Confiance.AI, le pilier évaluation et le pilier normalisation

Si l'Intelligence Artificielle (IA) semble promise à un fort développement, de nombreux verrous freinent son adoption, en particulier pour un déploiement dans les systèmes critiques. Ceux-ci doivent par construction garantir des propriétés de sécurité et de sûreté mais aussi suivre des principes de confiance et de responsabilité. En effet, par système critique, nous entendons, tout système pouvant directement ou indirectement engendrer des impacts sur les personnes physiques – impacts de nature corporelle, psychologique, sur la vie privée etc. – mais également sur les personnes morales – typiquement les entreprises avec des impacts de nature industrielle, financière, ou sur l'image au-

©AFIA2021

près du public, la propriété intellectuelle etc.

En parallèle de ce constat industriel, le conseil de l'innovation [1], a lancé fin 2018 le **Grand Défi National de l'IA de confiance**, avec l'objectif de sortir de l'ère des PoC (preuves de concept) par une réponse appropriée à la question de la qualification (homologation voire certification) des systèmes critiques à base d'IA.

En effet, que les systèmes critiques à base d'IA reposent sur des techniques d'apprentissage ou sur des approches plus symboliques, leur conception n'est pas neutre. Ces systèmes doivent suivre des principes de confiance et de responsabilité, garantir par construction (*by design*) des propriétés de sécurité, de sûreté et de fiabilité, qu'il faut pouvoir démontrer. Ainsi, pour permettre un déploiement de l'IA dans ces systèmes critiques, les pratiques d'ingénierie actuelles sont en défaut de par leur démarche basée sur la constitution de bases de données et de connaissances et leur exploitation via des algorithmes génériques qui masquent, voire abstraient, la logique fine des calculs. Il est alors extrêmement difficile de définir et comprendre leur enchaînement et donc d'établir la conformité des fonctions implantées. Il devient donc nécessaire de repenser ces ingénieries classiques (ingénierie algorithmique, ingénierie logicielle, ingénierie des données, ingénierie des connaissances, ingénierie système et ingénierie des facteurs humains) pour garantir la conformité du système vis à vis des concepts d'emploi, des besoins et des contraintes du client et des utilisateurs, de définir des méthodes et outils pour sécuriser l'ensemble des phases de conception mais aussi pour garantir des propriétés de type fiabilité, sécurité et cybersécurité, et de maintenabilité du système et cela tout au long de son cycle de vie. L'enjeu industriel est alors d'outiller de bout en bout toute cette démarche de « génie de l'IA » prenant en compte les dimensions algorithmiques, logicielles et systèmes. Pour cela, la construction des méthodologies de développement et la mise en place d'un environnement les outillant permettra de répondre aux défis posés par l'intégration de composants ou sous-systèmes d'IA dans des systèmes critiques mais aussi d'en accélérer le déploiement. C'est l'ambition du programme Confiance.ai.

L'objectif de cet article est d'identifier les enjeux induits par l'industrialisation de l'IA pour les systèmes critiques et de présenter les principales composantes d'un environnement de confiance pour les développeurs et intégrateurs, les auditeurs internes ou externes. Cet environnement est un atelier d'ingénieries support à la conception, à la validation et au test en vue d'intégrer de l'IA dans les systèmes critiques tout en répondant aux exigences réglementaires des régulateurs.

2 Un environnement de confiance

Comme mentionné précédemment, cet environnement de confiance est constitué d'un ensemble d'outils opérables et fédérés et de méthodologies qui peuvent être interfacés, notamment au sein d'ateliers d'ingénierie industriels.

Concernant l'état de l'art actuel et à venir à court terme, il existe :

- D'une part, une kyrielle d'initiatives développant des briques technologiques pour l'IA de confiance. Ces briques n'implantent que partiellement les fonctionnalités précédemment identifiées. Elles doivent donc être enrichies (voir fig. 2).
- D'autre part, il existe aujourd'hui un certain nombre d'environnements de développement d'IA existants. Ces environnements sont des environnements outillés mais ne traitant pas des problématiques particulières de la confiance.

Par exemple, le développement de logiciels à base d'IA dans de nombreux secteurs d'activité (automobile, aéronautique, ferroviaire, défense, énergie, naval, santé, etc.) pose des questions de garantie de bon fonctionnement dès lors que ces logiciels prennent des décisions de manière autonome dans un contexte critique. Il faut donc être capable d'assurer la transparence et l'auditabilité de ces systèmes pour pouvoir les comprendre et les corriger le cas échéant, mais aussi parfois aller jusqu'à la preuve formelle de leur bon fonctionnement et ceci de manière industrielle comme mentionné précédemment. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'outils d'**ingénierie de la donnée et de la connaissance** afin de pouvoir respecter certains principes comme la loyauté et/ou l'équité lors des étapes de collecte, d'acquisition, d'analyse, de manipulation, de qualification des jeux de données d'apprentissage mais aussi de bases de connaissances. Puis, l'**ingénierie algorithmique** [15] doit être enrichie afin de prendre en compte les spécificités de l'IA de confiance, démontrant que les fonctions implantées sont correctes, prévisibles, stables, reproductibles, explicables, fiables et robustes. Cette ingénierie doit prendre en compte l'incertitude induite par la dynamique de l'environnement dans lequel le système évolue. Enfin, il faut être capable de détecter les erreurs sur un domaine d'emploi défini, et in fine si se pose la question de sa spécification et de sa validation. C'est pourquoi, l'intégralité du processus d'**ingénierie système** doit être outillée.

Les fonctionnalités de l'environnement doivent supporter l'ensemble des usages pressentis (cf. fig. 2) regroupant :

- Un coeur de fonctionnalités pour aider à la conception, à la qualification au déploiement et à la maintenance des composants et des systèmes à base d'IA.
- Un ensemble de fonctionnalités proposant des méthodes outillées.
- Un ensemble de fonctionnalités transverses.
- Un ensemble de fonctionnalités permettant de s'interfacer.

Le coeur de ces fonctionnalités se décompose alors en deux sous-ensembles :

- Le premier pour aider à la conception, à la qualification, au déploiement et à la maintenance des composants d'IA : point de vue de l'ingénierie algorithmique de l'IA.
- Le second pour aider à la conception, à la qualifi-

1. Composé de 6 ministres, des administrations concernées (SGPI, DGE, DGRI), de deux opérateurs (ANR et Bpifrance) ainsi que de 6 personnalités reconnues, ce Conseil fixe les priorités stratégiques de la politique d'innovation française.

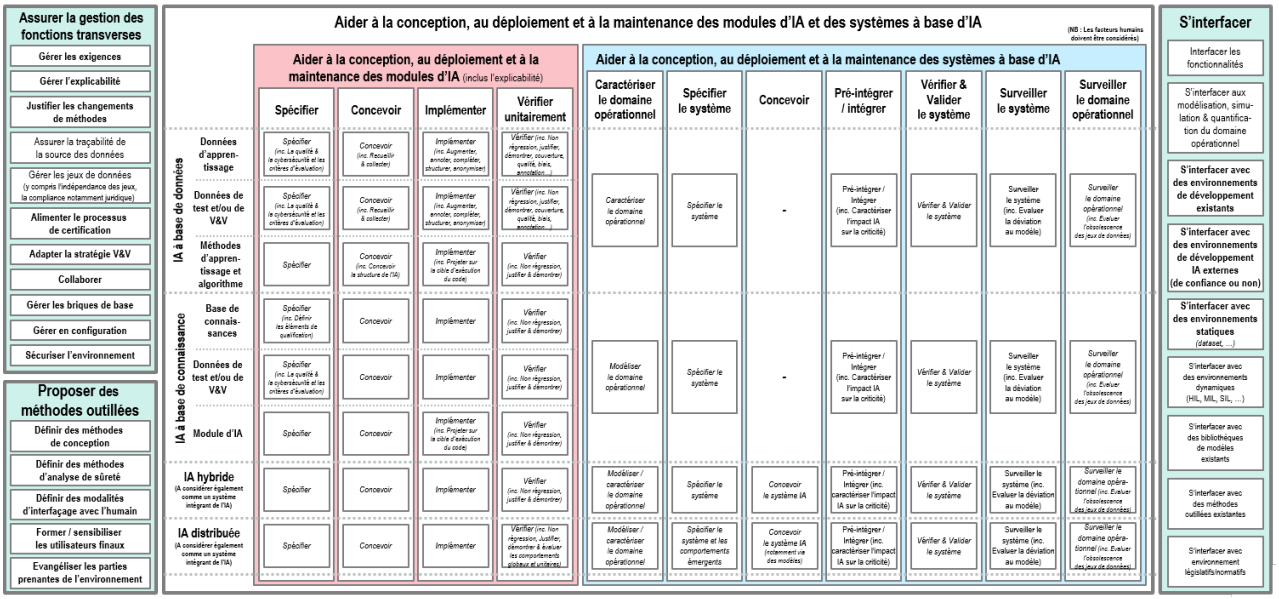


FIGURE 2 – La matrice de fonctionnalités de l'ingénierie de l'IA de confiance pour un déploiement opérationnel [Source Confiance.ai]

cation, au déploiement et à la maintenance des systèmes à base d'IA : point de vue de l'ingénierie système de l'IA.

Chacun de ces sous-ensembles est subdivisé en fonction du cycle de développement, soit :

- Pour la sous partie traitant des composants d'IA, nous trouvons les étapes suivantes : Spécifier, Définir le domaine opérationnel, Concevoir, Implémenter, Vérifier de manière unitaire, incluant bien sûr, en fonction des paradigmes de l'IA choisis, l'ingénierie des données et l'ingénierie des connaissances.
- Pour la sous partie traitant des systèmes à base d'IA (vue ingénierie système) nous trouvons les étapes suivantes : Caractériser le domaine opérationnel, Spécifier le système, Concevoir, Pré-intégrer et intégrer, Vérifier et Valider le système, Surveiller le système, Surveiller le domaine opérationnel, et Garantir son maintien en condition opérationnel.

L'ensemble des fonctionnalités proposant des méthodes outillées est alors constitué des éléments suivants :

- Définir des méthodes de conception,
- Définir des méthodes d'analyse de sureté,
- Définir des modalités d'interfaçage avec l'humain,
- Former / sensibiliser les utilisateurs finaux,
- Evangéliser les parties prenantes de l'environnement.

Il convient de préciser que les 3 premières fonctionnalités sont transverses et seront donc utilisées dans l'ensemble des autres fonctionnalités de l'environnement de confiance, puisqu'elles constituent le sous-jacent méthodologique.

Des fonctionnalités transverses permettent de :

- Gérer les exigences,
- Gérer l'explicabilité,
- Justifier les changements de méthode – Passage à une méthode basée sur de l'IA par opposition à une méthode traditionnelle,
- Assurer la traçabilité de la source de donnée,
- Gérer les jeux de données,
- Alimenter le processus de certification,
- Adapter la stratégie V& V,
- Collaborer – entre plusieurs acteurs via l'environnement,
- Gérer les briques de base – briques de composant d'IA dite de confiance
- Gérer en configuration – toute ou partie de l'environnement et des objets manipulés,
- Sécuriser l'environnement.

Enfin, cet environnement doit permettre de garantir le respect des normes et de la réglementation, comme par exemple, la conformité au RGPD via des approches respectant la vie privée (*Privacy by design*) ou avec la loi pour une République numérique qui induit transparence et loyauté. De plus, dans un contexte de montée de l'autonomie de certaines fonctions, ces ingénieries doivent être repensées pour prendre en compte les contraintes d'**embarquabilité** et la **relation humain-système**.

3 Ingénierie algorithmique de l'IA de confiance

Historiquement, la conception d'algorithmes d'IA émerge dans les années 1950 au travers de deux courants. L'**IA à base de connaissances**, qualifiée aujourd'hui de GOFAI (*Good Old Fashioned AI*) ou d'IA symbolique, se base quasi exclusivement sur le raisonnement symbolique et la logique. Elle se distingue de l'**IA dirigée par les données**, appelée aussi IA statistique et connexionniste, sous les feux de la rampe ces dernières d'années avec la collecte massive des données et l'arrivée de l'IA subsymbolique (et du deep learning), bien qu'aussi ancienne. Ainsi, l'IA symbolique

©AFIA2021

utilise des connaissances transmises à la machine pour résoudre des problèmes et l'IA dirigée par les données part d'exemples de solutions qu'elle essaie d'extrapoler par des méthodes statistiques. Leurs domaines d'emploi diffèrent. Alors que l'IA connexioniste est l'IA des sens, l'IA symbolique est celle du sens.
Plusieurs travaux cherchent à hybrider ces deux paradigmes, comme le souligne N. Asher [2] : "*L'addition de ces deux courants, IA symbolique et IA connexionniste, constitue le défi d'aujourd'hui*". Par exemple, l'apprentissage par renforcement consiste à récompenser les comportements souhaités et/ou à sanctionner les comportements non désirés avec des stratégies de récompense ou de sanction basées sur des connaissances métiers ou heuristiques issues de l'IA symbolique.

3.1 Conception algorithmique

Pour garantir une conception algorithmique de confiance (robuste, fiable...), l'ingénierie algorithmique (*Algorithm Engineering*) définit par P. Sanders [12, 16], doit intégrer les paradigmes induits par l'IA ainsi que les dimensions de (cyber)-sécurité et l'humain dans la boucle.
De plus, la sûreté et la sécurité des systèmes critiques à base d'IA nécessitent, de démontrer que les algorithmes sont corrects, c'est-à-dire qu'ils font ce qu'on attend d'eux. Il est donc nécessaire de vérifier la conformité entre leurs spécifications et leur comportement, autrement dit l'écart entre ce qu'il est supposé faire et ce qu'il fait réellement. Certaines approches en IA symbolique comme la programmation par contraintes offrent, par construction, cette propriété de correction, mais il reste nécessaire de la démontrer dans les autres cas comme pour l'IA connexionniste.
La robustesse d'un algorithme caractérise son aptitude à fournir des réponses correctes face à des situations inconnues ou à des malveillances. Cependant, cette propriété est plus dure que la précision. En effet, un système non précis ne peut être robuste. Mais surtout, un système précis peut ne pas être robuste. C'est le cas d'un système à base d'apprentissage ayant appris par coeur les données d'apprentissage qui se trompera dans ses décisions futures basées sur de nouvelles données. Ce phénomène est appelé *overfitting* (sur-apprentissage). De plus, l'IA reste vulnérable, et si l'on n'y prend pas garde, particulièrement sensible aux attaques dites "adversarial" (contradictoire), attaques qui tirent parti du fonctionnement des algorithmes sous-jacents pour générer des perturbations de faible amplitude dans les données analysées et et force l'IA à renvoyer un résultat incorrect. Heureusement, l'existence d'attaques 'adversarial' induit l'existence de défenses. De nombreuses défenses ont été proposées ces dernières années par la communauté scientifique [2] mais qui sont parfois réfutées avec de nouvelles attaques les rendant obsolètes. C'est pourquoi, il faut de se doter de méthodes et outils pour concevoir des algorithmes robustes et a minima caractériser leur robustesse.
Il est aussi nécessaire de prouver que les systèmes critiques sont contrôlables, c'est-à-dire qu'ils sont bien-fondés ou cohérents (on emploie aussi l'anglicisme consistant), si l'on peut prouver qu'ils ne font que ce qu'on l'attend d'eux. Les questions relatives aux problèmes de robustesse et de consistance commencent à faire l'objet de travaux liés aux preuves formelles. Ces dernières visent à apporter des garanties a priori sur la sûreté de fonctionnement d'un programme, contrairement aux méthodologies de validation par expérimentations directes qui visent à apporter des garanties a posteriori. Enfin, la compréhension de l'IA et de son raisonnement est nécessaire pour déterminer à quel point nous pouvons lui faire confiance. Un avantage des approches symboliques est de permettre de tracer le raisonnement. Mais même dans ce cas, il est nécessaire pour les usagers d'avoir une explication intelligible (explicabilité) plus que la traçabilité du raisonnement. Par contre, les approches connexionnistes s'apparentent aujourd'hui à des boîtes noires dont la complexité et l'abstraction qui sous-tendent ses décisions nous éloignent davantage de cette compréhension. Il devient alors nécessaire d'offrir des méthodes et outils pour rendre l'IA plus transparente, ouvrir les boîtes noires afin de comprendre comment un résultat a été atteint.

3.2 Vérification, validation et qualification

Lors de la vérification, la validation et la qualification du bon fonctionnement d'un algorithme d'IA, les situations suivantes doivent être abordées [11] :

- Le cas des composants livrés en boîte noire sur lesquels on cherchera principalement à en évaluer la robustesse. Par exemple, des approches ont été proposées dans la littérature [21, 20] présentant des méthodes pour étudier la robustesse de réseaux de neurones sur des problèmes de classification.
- Lorsque le composant est en boîte blanche (accès aux détails de sa structure, configuration, code source), il est alors possible de réaliser une analyse fine à l'aide de méthodes formelles (interprétation abstraite [5], Satisfiabilité modulo théories [8], programmation linéaire, etc.), mathématiques de ses comportements possibles. Un enjeu majeur restant la capacité de formaliser les propriétés de sûreté attendues afin que donner un sens fort aux preuves développées [6]. Cela permet, par exemple, de mettre en place des stratégies de test de robustesse face aux attaques adverses dans le cas d'approches à base d'apprentissage [13]. Il est également possible d'aller plus loin dans la caractérisation en définissant des domaines de stabilité.

Une voie prometteuse d'évaluation de la robustesse consiste à utiliser des approches de randomisation, à l'aide de bruits ajoutés de manière contrôlés à l'entrée du processus de décision, permettant de conduire à des notions de certificats statistiques de robustesse [3].

2. Nicolas Asher chercheur CNRS à l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT) est le directeur scientifique du 3IA ANITI

4 Ingénierie des données et des connaissances

Pour les approches statistiques et connexionnistes, les données sont donc cruciales pour l'apprentissage, le test et la validation. Il ne suffit pas d'avoir beaucoup de données, il faut qu'elles soient de "bonne qualité" et représentatives du domaine d'emploi du système concerné, sans quoi ces approches donnent de mauvais résultats. De même, en IA symbolique, l'exploitation de connaissances de mauvaise qualité conduit à des résultats médiocres voire des erreurs. Il est nécessaire de repenser l'ingénierie des données et l'ingénierie des connaissances au regard de ces exigences.

De nouvelles méthodologies sont à définir pour une meilleure maîtrise des étapes d'acquisition, d'exploration, d'enrichissement, d'annotation et de préparation des données. Par exemple, la décomposition du jeu de données en plusieurs sous-ensembles dédiés aux différentes phase d'apprentissage, de validation et de test, doit respecter la représentativité du jeu de données pour permettre une bonne inférence en adéquation avec le domaine d'emploi.

De plus, comme les performances sont évaluées statistiquement sur un jeu de test préalablement constitué, la fiabilité de l'indice de performance est étroitement liée à la représentativité de ce jeu. La difficulté de cette décomposition réside dans la contrainte de constituer des ensembles distincts tout en garantissant qu'ils préservent des distributions comparables. De plus, il est nécessaire d'identifier automatiquement les situations qui mettent les systèmes en échec critique, et en retrouver le plus grand nombre possible parmi les données déjà acquises est nécessaire et difficile. Les techniques d'apprentissage actif (aussi appelé *machine teaching* [10]) n'y suffisent pas.

L'enrichissement permet de pallier la rareté des données. Cela consiste à ajouter artificiellement certaines données dans le jeu d'apprentissage ou de validation. Allant au-delà de la simple identification ou sélection intelligente d'outils, les techniques suivantes permettent d'augmenter la robustesse des modèles appris, ou de tester la robustesse lors de phase de validation :

- La génération artificielle de cas limites à base de réseaux neuronaux génératifs, pour créer de façon plausible de telles situations. Il sera par exemple possible de produire (et annoter) des situations rarissimes.
- L'utilisation de données réelles peut s'avérer complexe et le recours à des données synthétiques obtenues avec des simulateurs constitue une alternative intéressante.
- La création de nouvelles données à partir des données existantes, en appliquant par exemple, dans le cas de classification d'images, des transformations géométriques sur les images d'origine.

Mais aujourd'hui, les techniques d'apprentissage les plus efficaces sont supervisées reposant donc sur des annotations. La production d'annotations fiables est donc incontournable, puisque l'algorithme va ajuster ses paramètres afin d'associer une donnée d'entrée avec l'annotation cible. Cette phase a fait l'objet de nombreux travaux comme l'apprentissage actif ou l'automatisation de l'annotation par la création de fonctions d'annotation (supervision faible). De plus, caractériser la qualité d'un jeu de données n'est pas aisé. Il existe une pléthore de dimensions [14] qu'il faut choisir au regard d'un contexte décisionnel particulier. Même s'il existe très peu de normes relatives à la qualité des données [3], la question de la qualité de la donnée (*Data Quality* [7, 19]) n'est pas nouvelle : meilleure sera la qualité de la donnée, plus pertinente sera la décision. Dans son programme "*Total Data Quality Management*" (TDQM), le MIT s'attaque à cette question depuis le début des années 1990 [17], identifiant ainsi de nombreuses dimensions telles que la précision, la pertinence, la couverture, la complétude, la crédibilité, la cohérence, la fiabilité...

Enfin, si les données qui nourrissent les algorithmes à base d'apprentissage sont biaisées, les décisions que ceux-ci prendront le seront également. L'identification de ces biais peut poser question car l'une des difficultés consiste à comprendre comment un modèle généralise l'apprentissage qu'il a effectué à partir des données d'entraînement. C'est pourquoi, l'ingénierie des données doit être outillées pour permettre en particulier d'identifier les biais d'échantillonnage, d'enregistrement, de nettoyage, d'exclusion [4], induits par les transformations d'ingénierie des caractéristiques (*Feature Engineering*), voire de confirmation [5].

Les systèmes à base de connaissances, quant à eux peuvent représenter et traiter des principes et des règles de décisions, des taxonomies, des théories, des processus et des méthodes mémorisées dans un système artificiel. Mais pour concevoir un système à base de connaissances ayant un comportement compréhensible et acceptable par l'utilisateur passe par une modélisation à un niveau d'abstraction pertinent qui fait sens pour les différents acteurs impliqués dans sa conception (experts métiers, utilisateurs, etc.). En phase d'utilisation du système, le modèle est rendu opérationnel de manière à ce que l'utilisateur s'approprie le comportement du système et puisse interagir avec lui. L'ingénierie des connaissances (IC) propose des concepts, méthodes et techniques permettant de modéliser et/ou d'acquérir les connaissances dans des domaines ou la formalisation est difficile ou la compréhension des phénomènes partielle. L'IC peut être schématiquement définie par trois étapes : l'acquisition de connaissances disponibles, leur représentation informatique et l'utilisation de celles-ci à des fins de simulation, de prédiction, de validation, d'optimisation pour aider à la décision [18]. Rappelons que l'extraction des connaissances couvre le processus permettant de transformer les connaissances des experts dans un domaine sous forme d'informations organisées, alors que l'acquisi-

3. norme ISO 8000 relative à la qualité des données de référence – Master data

4. le biais d'exclusion provient de données qui sont retirées de manière inappropriée de la source de données.

5. le biais de confirmation est le désir de sélectionner uniquement les informations qui soutiennent ou confirment quelque chose que vous connaissez déjà, plutôt que des données qui pourraient suggérer quelque chose qui va à l'encontre d'idées préconçues.

©AFIA2021

tion des connaissances est le processus inverse qui consiste à transformer, par l'apprentissage, les informations et les savoirs disponibles en connaissances. Là encore, il est important de se doter d'une démarche méthodologique pour garantir la complétude, à la pertinence et à la qualité des modèles.

5 Evaluation de la qualité de l'algorithme

Évaluer les performances d'une IA dirigée par les données, consiste à évaluer la qualité d'une fonction, apprise selon des principes d'apprentissage statistique, lorsqu'elle sera déployée. Si la théorie donne un cadre clair à l'évaluation du risque théorique, sa mise en pratique implique de définir la notion de risque empirique qui s'appuie sur deux concepts : d'une part la distribution réelle des données n'est pas connue, elle est remplacée par un ensemble de données, ou une distribution approchée ; d'autre part elle repose sur la définition d'une fonction de coût, qui doit au mieux retranscrire l'intention finale. Dans le cadre strict de l'évaluation des performances, les deux problèmes principaux sont donc : 1) comment choisir la bonne métrique d'évaluation ; 2) quelle méthodologie pour l'estimation robuste de cette métrique de performance. Dans ce cadre, un guide d'évaluation a été rédigé par la DGA [11] pour les approches d'apprentissage supervisé. À ces deux problèmes issus de la nature intrinsèque de l'apprentissage statistique, il faut ajouter la question de la reproductibilité des performances rapportées, vis-à-vis de paramètres considérés jusqu'ici comme mineurs. Il faut aussi noter que de nombreux projets s'attellent à la question de l'évaluation ou de l'explication. Citons les travaux issus du programme DEEL (France et Canada) pour le cadre IA des données ou du "GT Explicabilité du GDR IA" pour l'IA symbolique.

Enfin, le changement radical des pratiques de développement des systèmes à base d'IA et la complexité induite pour leur validation, amènent à envisager l'introduction d'approches de qualification et de certification plus souples pour faire face aux différents types d'incertitude que présentent ces systèmes. Outre la définition de référentiels de risques spécifiques liés à l'IA, deux approches de la qualification semblent particulièrement intéressantes : (1) la qualification basée sur des propriétés globales du système [4, 1], offrant plus de souplesse dans la manière de gérer la complexité et l'implantation des pratiques de qualification ("*Assurance Case*" qualification based on "system overarching properties" satisfaction) ; et (2) la qualification modulaire, incrémentale et évolutive, par exemple via des approches par contrat, permettant de prendre en compte l'évolution nécessaire des systèmes liées aux évolutions des données, connaissances et de l'environnement qui risquent d'être beaucoup plus rapides pour l'IA.

6 Conclusion

Sécuriser, certifier et fiabiliser les systèmes qui ont recours à l'intelligence artificielle posent des questions d'ingénierie algorithmique, d'ingénierie des données et des connaissances, d'ingénierie système, de la sûreté et de la (cyber)-sécurité, mais aussi d'ingénierie des facteurs humains, dès lors que ces logiciels prennent des décisions de manière autonome dans un contexte critique. Le programme "Confiance.ai" du Grand Défi national a pour objectif de définir et d'outiller une approche rigoureuse et interdisciplinaire en formalisant l'ensemble du cycle de vie de ces systèmes à base d'IA de confiance [9].

Les besoins principaux auxquels l'environnement devra répondre, in fine, sont les suivantes :

- Disposer de méthodes et d'outils de gestion des données et des connaissances : conception, d'analyse, manipulation, collecte, acquisition, qualification, génération, filtrage des jeux de données d'apprentissage et base de connaissances pour la validation des systèmes cibles.
- Capacité à produire (concevoir, valider, implanter) un algorithme d'intelligence artificielle dit de confiance : correct, prévisible, stable, reproductible, explicable, fiable, robuste, capable de détecter les erreurs sur un domaine d'emploi défini et maîtrisé et donc in fine et si nécessaire certifiable.
- Capacité à définir et outiller l'intégralité du processus de développement, d'intégration et de qualification/certification sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes intégrant de l'IA en interopérabilité avec les autres environnements de conception.
- Sortir d'une approche basée uniquement sur les preuves de concepts et passer à l'échelle industrielle en revisitant et repensant la chaîne d'ingénierie de l'algorithme, du logiciel et du système ainsi que la prise en compte du hardware pour le développement de composants à base d'IA.

Pour appuyer la spécification des besoins, valider et caractériser les solutions, le programme s'appuie sur un ensemble de cas d'usages ciblés et partagés par l'ensemble des acteurs. On peut citer notamment :

- Compréhension de scène pour la mobilité autonome à partir d'un capteur caméra 2D ;
- Surveillance et détection de déviation de l'efficacité opérationnelle d'une usine ;
- Contrôle embarqué par réseaux de neurones pour une fonction d'anticollision en vol ;
- Détection de conformité de cordons de soudure par inspection visuelle ;
- Maintenance prédictive des propulseurs de navire.

Des cas d'usage complémentaires seront intégrés au cours du programme afin d'aborder les volets techniques complémentaires, notamment autour de l'IA à base de connaissances et hybride.

Remerciements

Les partenaires de Confiance.ai sont par ordre alphabétique : Airbus, Air Liquide, ATOS, CEA, Inria, IRT SystemX, IRT St Exupéry, Naval Group, Renault, Safran, Sopra Steria, Thales et Valéo

Références

[1] Darpa program assured autonomy, https ://www.darpa.mil/program/assured-autonomy.

[2] A. Araujo, L. Meunier, R. Pinot, and B. Negrevergne. Robust neural networks using randomized adversarial training. *arXiv preprint arXiv :1903.10219*, 2019.

[3] J. Cohen, E. Rosenfeld, and JZ. Kolter. Certified adversarial robustness via randomized smoothing. *arXiv preprint arXiv :1902.02918*, 2019.

[4] E. Denney, G. Pai, and I. Habli. Dynamic safety cases for through-life safety assurance. In *IEEE/ACM 37th IEEE Int. Conf. on Software Engineering*, volume 2, pages 587–590. IEEE, 2015.

[5] T. Gehr, M. Mirman, D. Drachsler-Cohen, et al. Ai2 : Safety and robustness certification of neural networks with abstract interpretation. In *2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, pages 3–18. IEEE, 2018.

[6] J. Girard-Satabin, G. Charpiat, Z. Chihani, and M. Schoenauer. CAMUS : A framework to build formal specifications for deep perception systems using simulators. In *24th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, 2020.

[7] Y. Huh, F. Keller, Thomas C. Redman, and A. Watkins. Data quality. *Information and software technology*, 32(8) :559–565, 1990.

[8] G. Katz, D. Huang, D. Ibeling, K. Julian, et al. The marabou framework for verification and analysis of deep neural networks. In *Int. Conf. on Computer Aided Verification*, pages 443–452. Springer, 2019.

[9] J. Mattioli, F. Terrier, L. Cantat, J. Chiaroni, M. Barreteau, Y. Bonhomme, C. Guettier, and C. Alix. Ia de confiance : condition nécessaire pour le déploiement de l'ia dans les systèmes de défense - hal id : hal-02955575, 2020.

[10] S. Mei and X. Zhu. Using machine teaching to identify optimal training-set attacks on machine learners. In *AAAI Conf. on Artificial Intelligence*, 2015.

[11] DGA (French MoD). Guide méthodologique pour la spécification et la qualification des systèmes intégrant des modules d'intelligence artificielle - version 1.0 b, 2019.

[12] M. Muller-Hannemann and S. Schirra. *Algorithm engineering : bridging the gap between algorithm theory and practice*. Springer-Verlag, 2010.

[13] MI. Nicolae, M. Sinn, MN. Tran, B. Buesser, A. Rawat, M. Wistuba, V. Zantedeschi, N. Baracaldo, B. Chen, H. Ludwig, et al. Adversarial robustness toolbox v1. 0.0. *arXiv preprint arXiv :1807.01069*, 2018.

[14] L. Pipino, Y. Lee, and R. Wang. Data quality assessment. *Communications of the ACM*, 45(4) :211–218, 2002.

[15] P. Sanders. Algorithm engineering–an attempt at a definition. In *Efficient Algorithms*, pages 321–340. Springer, 2009.

[16] P. Sanders. Algorithm engineering–an attempt at a definition using sorting as an example. In *12th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX)*, pages 55–61. SIAM, 2010.

[17] F. Sidi, P. Panahy, L. Affendey, M. Jabar, H. Ibrahim, and A. Mustapha. Data quality : A survey of data quality dimensions. In *2012 Int. Conf. on Information Retrieval & Knowledge Management*, pages 300–304. IEEE, 2012.

[18] R. Studer, VR. Benjamins, and D. Fensel. Knowledge engineering : principles and methods. *Data & knowledge engineering*, 25(1-2) :161–197, 1998.

[19] R.Y Wang and D.M Strong. Beyond accuracy : What data quality means to data consumers. *Journal of management information systems*, 12(4) :5–33, 1996.

[20] L. Weng, PY. Chen, L. Nguyen, M. Squillante, A. Boopathy, I. Oseledets, and L. Daniel. Proven : Verifying robustness of neural networks with a probabilistic approach. In *Int. Conf. on Machine Learning*, pages 6727–6736, 2019.

[21] H. Zhang, TW. Weng, PY. Chen, and others. Efficient neural network robustness certification with general activation functions. In *Advances in neural information processing systems*, pages 4939–4948, 2018.

©AFIA2021

Covid-on-the-Web: Graphe de Connaissances et Services pour faire Progresser la Recherche sur la COVID-19

F. Michel, F. Gandon, V. Ah-Kane, A. Bobasheva, E. Cabrio, O. Corby,
R. Gazzotti, A. Giboin, S. Marro, T. Mayer, M. Simon, S. Villata, M. Wincker.

University Côte d'Azur, Inria, CNRS, I3S (UMR 7271), France

franck.michel@cnrs.fr

Résumé

Le projet Covid-on-the-Web permet aux chercheurs d'accéder à la littérature relative à la famille des coronavirus, de l'interroger et d'en extraire des connaissances. Il s'aligne sur des besoins concrets formulés par des instituts de santé et de recherche. Ainsi, il adapte, combine et étend des outils destinés à traiter, analyser et enrichir le corpus CORD-19 qui rassemble plus de 100 000 articles scientifiques relatifs aux coronavirus. Ce jeu de données comprend deux principaux graphes de connaissances décrivant (1) 113 millions de mentions d'entités nommées liées au Web de données, et (2) les arguments extraits à l'aide d'ACTA, un outil d'extraction et de visualisation de graphes argumentatifs. Nous fournissons également plusieurs outils de visualisation et d'exploration basés sur la plateforme Corese, la bibliothèque MGExplorer, ainsi que des Notebooks Jupyter.

Mots-clés

COVID-19, arguments, visualisation, entités nommées, données liées.

Abstract

The Covid-on-the-Web project allows scientists to access, query and extract knowledge from the literature on the coronavirus family. It is aligned with concrete needs formulated by health and research institutes. Thus, it adapts, combines and extends tools designed to process, analyze and enrich the CORD-19 corpus, that gathers 100,000+ scientific articles related to the coronaviruses. This dataset comprises two main knowledge graphs describing (1) 113 million mentions of named entities linked to the Web of data, and (2) arguments extracted using ACTA, a tool for extraction and visualization of argumentative graphs. We also provide several visualization and exploration tools based on the Corese platform, the MGExplorer library, and Jupyter Notebooks.

Keywords

COVID-19, arguments, visualization, named entities, linkeddata.

1 Des données sur la COVID-19 vers des données ouvertes liées

En mars 2020, alors que la maladie infectieuse respiratoire COVID-19 nous obligeait à rester confinés, l'équipe de recherche Wimmics [1] a décidé de se joindre aux efforts de nombreux scientifiques du monde entier qui mettent à profit leur expertise et leurs ressources pour lutter contre la pandémie et en atténuer ses effets dévastateurs. Nous avons lancé un nouveau projet nommé *Covid-on-the-Web* visant à faciliter l'accès, la recherche et la compréhension de la littérature scientifique biomédicale relative au COVID. À cette fin, nous avons adapté, réorienté, combiné et utilisé des outils pour publier, aussi exhaustivement et rapidement que possible, un maximum de données liées relatives aux coronavirus.

En quelques semaines, nous avons déployé plusieurs outils afin d'analyser le *COVID-19 Open Research Dataset* (CORD-19) [18] qui compte plus de 100 000 articles scientifiques relatifs à la famille des coronavirus. D'une part, nous avons adapté la plateforme ACTA, [2] conçue initialement pour aider les cliniciens dans l'analyse des essais cliniques et la prise de décision [11], en permettant l'extraction automatique et la visualisation des graphes argumentatifs. D'autre part, notre expertise dans la gestion des données extraites à l'aide de graphes de connaissances, qu'elles soient génériques ou spécialisées, et leur intégration dans le projet HealthPredict [8, 9], nous ont permis d'enrichir le corpus CORD-19 avec différentes sources. Nous avons utilisé DBpedia Spotlight [5], Entity-fishing [3] et NCBO BioPortal Annotator [10] afin d'extraire les entités nommées des articles du corpus CORD-19, et les désambiguïser en regard des ressources des données ouvertes liées venant de DBpedia, Wikidata et BioPortal. En utilisant la plateforme Morph-xR2RML, [4] nous avons transformé le résultat en un jeu de données RDF que nous avons publié via un point d'accès SPARQL public. En parallèle, nous avons intégré les plateformes Corese [5] [4] et MGExplorer [3] pour mani-

1. https://team.inria.fr/wimmics/
2. http://ns.inria.fr/acta/
3. https://github.com/kermitt2/entity-fishing
4. https://github.com/frmichel/morph-xr2rml/
5. https://project.inria.fr/corese/

©AFIA2021

puler des graphes de connaissances et permettre leur visualisation et leur exploration sur le web.

Le projet Covid-on-the-Web (représenté dans la Figure 1) a ainsi conçu et mis en place un pipeline (workflow) intégré facilitant l'extraction et la visualisation des informations issues du corpus CORD-19 par la production et la publication d'un graphe de connaissances de données liées enrichi en permanence. Nous pensons que notre approche, qui intègre des structures argumentatives et des entités nommées, est pertinente dans le contexte actuel. En effet, alors que de nouvelles recherches liées à la COVID-19 sont publiées chaque jour, les résultats sont activement débattus, et de nombreuses controverses voient le jour (sur l'origine de la maladie, son diagnostic, son traitement...) [2]. Les chercheurs ont donc besoin d'outils pour les aider à étayer ou écarter certaines hypothèses, traitements ou explications. L'exploitation conjointe de structures argumentatives et de raisonnement basé sur les entités nommées peut aider à répondre aux besoins de ces utilisateurs et ainsi réduire les zones d'ombres liées à la maladie.

Cet article est un résumé long traduit et mis à jour de l'article [14] que nous avons publié à ISWC 2020 et dans lequel nous dressons un bilan ainsi qu'une comparaison avec les travaux connexes (non reproduits dans cet article).

Le reste de cet article est organisé de la manière suivante. Dans la section 2, nous détaillons le pipeline d'extraction mis en place pour traiter le corpus CORD-19 et générer des données RDF. Puis, la section 3 détaille les caractéristiques du jeu de données et des services mis à disposition pour l'exploiter. Les sections 4 et 5 présentent les outils d'exploitation et de visualisation, et traitent des applications futures et de l'impact potentiel de notre jeu de données.

2 De CORD-19 au jeu de données Covid-on-the-Web

Le *COVID-19 Open Research Dataset* [18] (CORD-19) est un corpus rassemblant des articles scientifiques liés au SARS-Cov-2 et à la famille des coronavirus. Les créateurs de CORD-19 ont traité plus de 100 000 articles et les ont convertis en documents JSON tout en nettoyant les citations et les références bibliographiques.

Cette section décrit comment nous avons exploité ce jeu de données pour *(1)* établir des liens significatifs entre les articles du corpus CORD-19 et le Web de données au moyen des entités nommées, et *(2)* extraire un graphe d'arguments découverts dans les articles, tout en reposant sur les normes du Web sémantique et les pratiques des données liées.

2.1 Construction du graphe de connaissances des entités nommées CORD-19

Le graphe de connaissances des entités nommées CORD-19 (CORD19-NEKG), décrit les entités nommées identifiées et désambiguïsées dans les articles du corpus CORD-19 à l'aide de trois logiciels : DBpedia Spotlight [5] pour désambiguïser et lier les ENs à DBpedia dont nous avons utilisé les modèles pré-entraînés [6] ; Entity-fishing [7] pour désambiguïser les ENs en regard à Wikidata ; et NCBO BioPortal Annotator [8] [10] qui permet d'annoter du texte biomédical et désambiguïser les ENs en regard des ontologies se trouvant sur BioPortal.

Listing 1 – Représentation de l'entité nommée "réaction en chaîne par polymérase" (PCR) comme une annotation du résumé d'un article présente de la position 235 à 238.

```
@prefix covidpr: <http://ns.inria.fr/covid19/property/>.
@prefix dct:     <http://purl.org/dc/terms/>.
@prefix oa:      <http://www.w3.org/ns/oa#>.
@prefix schema:  <http://schema.org/>.

[] a oa:Annotation;
  schema:about <http://ns.inria.fr/covid19/f74923b3...>;
  dct:subject "Engineering", "Biology";
  covidpr:confidence   "1"^^xsd:decimal;
  oa:hasBody <http://wikidata.org/entity/Q176996>;
  oa:hasTarget [
    oa:hasSource
    <http://ns.inria.fr/covid19/f74923b3...#abstract>;
    oa:hasSelector [
      a oa:TextPositionSelector, oa:TextQuoteSelector;
      oa:exact "PCR"; oa:start "235"; oa:end "238" ]];
```

Pour assurer sa réutilisabilité, CORD19-NEKG s'appuie sur des vocabulaires largement répandus, adaptés à la représentation des articles et des entités nommées en RDF. Nous présentons ci-dessous les principaux concepts de cette modélisation. De plus amples détails sont disponibles sur le dépôt Github du projet. [9]

Les métadonnées (ex. titre, auteurs, DOI) et le contenu des articles sont décrits à l'aide de DCMI, [10] FRBR-aligned Bibliographic Ontology (FaBiO), [11] Bibliographic Ontology, [12] FOAF [13] et Schema.org. [14] Les entités nommées sont représentées comme des annotations à l'aide du Web Annotation Vocabulary. [15] Un exemple d'annotation est donné dans le Listing 1. Le corps de l'annotation (`oa:hasBody`) correspond à l'URI de la ressource liée à l'entité détectée. Le morceau de texte reconnu comme l'entité nommée est la cible de l'annotation (`oa:hasTarget`). Celle-ci indique la partie de l'article dans laquelle l'entité a été reconnue (titre, résumé ou corps de l'article), et en donne sa position. Chaque annotation est accompagnée d'informations de provenance exprimées à l'aide de l'ontologie PROV-O, [16] indiquant la source en cours de traitement, l'outil utilisé pour extraire l'entité, le degré de confiance de l'annotateur sémantique, ainsi que l'auteur de l'annotation.

6. https://downloads.dbpedia.org/repo/dbpedia/spotlight/spotlight-model/
7. https://github.com/kermitt2/entity-fishing
8. http://data.bioontology.org/documentation
9. https://github.com/Wimmics/covidontheweb
10. https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmi-terms/
11. https://sparontologies.github.io/fabio/current/fabio.html
12. http://bibliontology.com/specification.html
13. http://xmlns.com/foaf/spec/
14. https://schema.org/
15. https://www.w3.org/TR/annotation-vocab/
16. https://www.w3.org/TR/prov-o/

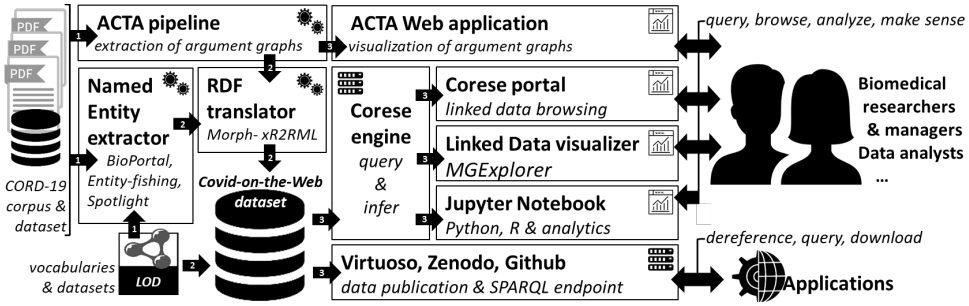


FIGURE 1 – Vue d'ensemble de Covid-on-the-Web : pipeline, ressources, services et applications.

2.2 Construction d'un graphe de connaissances d'argumentation

Argumentative **C**linical **T**rial **A**nalysis (ACTA) [11] est un outil conçu pour analyser les composants argumentatifs des essais cliniques, s'appuyant sur la méthode PICO. [17] Développé à l'origine comme un outil de visualisation interactif pour aider les cliniciens dans l'analyse des essais cliniques, nous avons adapté ACTA pour annoter le corpus CORD-19. ACTA va bien au-delà de la simple recherche par mot-clés en extrayant la ou les affirmations (claims) principales énoncées dans un article, ainsi que les preuves (evidences) supportant cette affirmation, et les éléments PICO correspondants.

Dans le contexte des essais cliniques, une *affirmation* est une déclaration finale faite par l'auteur sur le résultat de l'étude. Elle décrit généralement la relation d'un nouveau traitement par rapport aux traitements existants. Par conséquent, une observation ou une mesure est une *preuve* qui soutient ou attaque un autre composant argumentatif. Les observations comprennent les effets secondaires et les résultats obtenus. Deux types de relations peuvent exister entre les composants argumentatifs. La relation dit d'*attaque* tient lorsqu'un composant contredit la proposition de la composante cible, ou déclare que les effets observés ne sont statistiquement pas significatifs. La relation dit de *support* s'applique à toutes les déclarations ou observations justifiant la proposition du composant cible.

Chaque résumé du corpus CORD-19 a été analysé par ACTA [18] et le résultat représenté en RDF afin de générer le graphe de connaissances d'argumentation CORD-19 (CORD19-AKG). Le pipeline se compose de quatre étapes : *(1)* la détection des composants argumentatifs, c.-à-d. détecter les affirmations et les preuves, *(2)* la prédiction des relations existant entre ces composants, *(3)* l'extraction des éléments PICO, et *(4)* la production de la représentation RDF des arguments et des éléments PICO.

Détection de composants argumentatifs. Il s'agit d'une tâche d'étiquetage séquentiel où, pour chaque mot, le modèle prédit si le mot fait partie d'un composant ou non. Nous associons l'architecture BERT [6] à un LSTM (un réseau récurrent à mémoire court et long terme) [17] et un champ aléatoire conditionnel (conditional random fields) pour effectuer de la classification des unités lexicales (tokens). Les poids de BERT sont initialisés à partir des poids de SciBERT [1], ce qui permet une meilleure représentation textuelle des articles scientifiques utilisés dans un corpus tel que CORD-19. Le modèle optimisé (fine-tuned) sur un jeu de données annoté avec des composants argumentatifs obtient une f_1-score de 0,90 [12].

Classification des relations. Les composants argumentatifs extraits à partir de l'étape précédente sont ensuite évalués conjointement pour définir leurs inter-relations. Déterminer quelles relations existent entre les composants est une tâche d'étiquetage séquentiel à trois classes, où la séquence est constituée d'une paire de composants, et où la tâche est d'apprendre la relation entre eux, c.-à-d. *support, attaque* ou *aucune relation*.

Le transformeur SciBERT est utilisé pour créer la représentation vectorielle du texte en entrée, auquel on ajoute une couche linéaire afin de déterminer les relations. Le modèle est optimisé sur un jeu de données comportant les relations d'argumentation dans le domaine médical et obtient une f_1-score de 0,68 [12].

Détection des éléments PICO. Nous utilisons la même architecture que pour la détection des composants. Le modèle est entraîné sur le corpus EBM-NLP [16] afin de prédire la/le population / patient / problème (P de PICO), l'intervention (I de PICO) [19] et les critères de jugement (O de PICO) pour une entrée donnée. L'évaluation de la détection des éléments PICO obtient une f_1-score de 0.734 [11]. Chaque composant argumentatif est annoté avec les éléments PICO qu'il contient. Pour faciliter les requêtes structurées, les éléments PICO sont rattachés à leurs concepts UMLS (Unified Medical Language System) à l'aide de ScispaCy [15].

Graphe de connaissances d'argumentation. Le *graphe de connaissances d'argumentation CORD-19* (CORD19-AKG) s'appuie sur l'Argument Model Ontology (AMO), [20]

17. PICO est un cadre utilisé pour répondre aux questions de soins de santé dans la pratique fondée sur des preuves. Il signifie : patients/population (P), intervention (I), control/comparison (C) et outcome (O).

18. https://github.com/Wimmics/CovidOnTheWeb/tree/master/src/acta

19. L'étiquette d'intervention (I de PICO) et de comparaison (C de PICO) sont traitées comme appartenant à une même classe.

20. http://purl.org/spar/amo/

©AFIA2021

Listing 2 – Exemple des composants argumentatifs et de leur relation.

```
@prefix prov:   <http://www.w3.org/ns/prov#>.
@prefix schema: <http://schema.org/>.
@prefix aif:    <http://www.arg.dundee.ac.uk/aif#>.
@prefix amo:    <http://purl.org/spar/amo/>.
@prefix sioca:  <http://rdfs.org/sioc/argument#>.

<http://ns.inria.fr/covid19/arg/4f8...>
 a amo:Argument;
 schema:about <http://ns.inria.fr/covid19/4f8...>;
 amo:hasEvidence
 <http://ns.inria.fr/covid19/arg/4f8.../0>;
 amo:hasClaim <http://ns.inria.fr/covid19/arg/4f8.../6>.

<http://ns.inria.fr/covid19/arg/4f8.../0>
 a amo:Evidence, sioca:Justification, aif:I-node;
 prov:wasQuotedFrom <http://ns.inria.fr/covid19/4f8...>;
 aif:formDescription "17 patients discharged in
                      recovered condition...";
 sioca:supports
 <http://ns.inria.fr/covid19/arg/4f8.../6>;
 amo:proves <http://ns.inria.fr/covid19/arg/4f8.../6>.
```

le SIOC Argumentation Module (SIOCA) [21] et l'Argument Interchange Format. [22] Chaque argument identifié par ACTA est modélisé comme un `amo:Argument` dont les composants argumentatifs, affirmations et preuves, sont reliés. Les affirmations et les preuves sont elles-mêmes reliées par des relations de support ou de réfutation (avec respectivement les propriétés `sioca:supports`/`amo:proves` et `sioca:challenges`).

Le Listing 2 dresse un exemple des composants de ce graphe. Les éléments PICO (non illustrés dans le Listing 2) sont décrits comme des annotations des éléments argumentatifs dans lesquels ils ont été identifiés, de manière très similaire aux entités nommées (Listing 1). La différence est que le corps (body) de l'annotation contient les identifiants UMLS des concepts (CUI) et de types (TUI).

2.3 Génération du jeu de données

D'un point de vue technique, le corpus CORD-19 se compose d'un document JSON par article scientifique. La génération du jeu de données RDF Covid-on-the-Web implique donc deux étapes principales : (1) traiter chaque document du corpus pour en extraire les entités nommées et les arguments, et (2) traduire les résultats de ces deux traitements en un jeu de données RDF unifié et cohérent. L'ensemble du pipeline est décrit dans la Figure 1.

Extraction des entités nommées. Pour chaque article du corpus, DBpedia Spotlight, Entity-fishing et BioPortal Annotator produisent chacun un document JSON allant de 100 KB à 50 MB chacun. Ces documents ont été chargés dans une base de données MongoDB, et prétraités pour filtrer les données inutiles ou invalides (ex. les caractères non valides) ainsi que pour supprimer les entités nommées de moins de trois caractères. Ensuite, chaque document a été traduit en RDF tel que décrit dans la section 2.1 en utilisant Morph-xR2RML, [23] une implémentation pour MongoDB du langage de transformation xR2RML [13]. Les trois annotateurs sémantiques ont été déployés sur une Precision Tower 5810 équipée d'un CPU à 3,7 GHz et de 64 Go de RAM.

Pour que les fichiers générés par Annotator+ conservent une taille manipulable, nous avons désactivé les options relatives à la négation (`negation`), à la détection du patient impliqué dans une expression médicale (`experiencer`), à la temporalité (`temporality`), à la hiérarchie des concepts identifiés (`display_links`) et aux informations sur les vocabulaires requêtés (`display_context`). Nous avons activé l'option `longest_only`, ainsi que l'option de lemmatisation (`lemmatize`) pour améliorer les capacités de détection. MongoDB et Morph-xR2RML ont été déployés sur une autre machine équipée de 8 cœurs et de 48 Go de RAM.

Extraction du graphe d'arguments. Seuls les résumés de plus de dix mots ont été traités par ACTA pour garantir des résultats significatifs. Au total, 44 153 documents ont répondu à ce critère. ACTA a été déployé sur un nœud dual-Xeon de 2,8 GHz avec 96 Go de RAM.

Comme pour l'extraction des entités nommées, les documents JSON en sortie ont été chargés dans MongoDB et traduits dans la représentation RDF décrite dans la section 2.2 en utilisant Morph-xR2RML. La traduction en RDF a été effectuée sur la même machine que celle décrite ci-dessus (celle hébergeant MongoDB et Morph-xR2RML).

3 Publication et interrogation du jeu de données Covid-on-the-Web

Le jeu de données Covid-on-the-Web est composé de deux principaux graphes RDF, à savoir le graphe de connaissances des entités nommées CORD-19 et le graphe de connaissances d'argumentation CORD-19. Un troisième graphe décrit les métadonnées et le contenu des articles CORD-19. Le Tableau 1 synthétise la quantité de données en termes de documents JSON et de triples RDF produits.

Description du jeu de données. Conformément aux meilleures pratiques en matière de publication de données [7], nous fournissons une description détaillée du jeu de données Covid-on-the-Web lui-même. Celle-ci comprend notamment (1) des informations relatives aux licences, aux contributeurs et la provenance décrites avec DCAT, [24] et (2) aux vocabulaires, aux liens entre jeux de données et les informations pour accéder aux données avec VOID. [25]

Accessibilité des données. Le jeu de données RDF est identifié via un DOI, téléchargeable depuis la plateforme Zenodo et accessible au moyen d'un endpoint SPARQL public. Chaque URI peut être déférencée avec négociation de contenu.

Le dépôt Github du projet fournit une documentation exhaustive incluant des détails relatifs aux licences, aux représentations RDF, aux graphes nommés et aux ontologies chargées dans l'endpoint. Ces informations sont résumées dans le Tableau 2.

21. `http://rdfs.org/sioc/argument#`
22. `http://www.arg.dundee.ac.uk/aif#`
23. `https://github.com/frmichel/morph-xr2rml/`
24. `https://www.w3.org/TR/vocab-dcat/`
25. `https://www.w3.org/TR/void/`

TABLE 1 – Volume de données de Covid-on-the-Web.

Type de données	Données JSON	Ressources produites	Triplets RDF
Métadonnées sur les articles et le contenu	15 GB	n.a.	3.72 M
Graphe de Connaissances des Entités Nommées CORD-19 (CORD19-NEKG)			
ENs identifiées par DBpedia Spotlight (titres, résumés)	87 GB	4.1 M	65.4 M
ENs identifiées par Entity-fishing (titres, résumés, corps)	52 GB	66.1 M	1.16 G
ENs identifiées par BioPortal Annotator (titres, résumés)	378 GB	43 M	104.4 M
Graphe de Connaissances d'Argumentation CORD-19 (CORD19-AKG)			
Composants preuves / affirmations (résumés)	112 MB	119 k	7.47 M
Éléments PICO		515 k	
Données totales pour Covid-on-the-Web (en incluant les métadonnées sur les articles et le contenu)			
	532 GB	113 M entités nommées 119 k preuves/affirmations 515 k éléments PICO	1.36 G

TABLE 2 – Accessibilité de Covid-on-the-Web.

CovidOnTheWeb DOI	10.5281/zenodo.4247134
Données RDF	https://doi.org/10.5281/zenodo.4247134
Endpoint SPARQL	https://covidontheweb.inria.fr/sparql
Documentation	https://github.com/Wimmics/CovidOnTheWeb
Espace de nommage	http://ns.inria.fr/covid19/
CovidOnTheWeb URI	http://ns.inria.fr/covid19/covidontheweb-1-2

Reproductibilité. Conformément aux principes de la science ouverte, tous les scripts, fichiers de configuration et de traduction en RDF impliqués dans notre pipeline sont fournis dans le dépôt Github du projet selon les termes de la licence Apache 2.0, de sorte que n'importe qui peut relancer l'ensemble de la chaîne de traitement (de l'extraction des articles au chargement des fichiers RDF dans Virtuoso OS).

Licences. Les données produites pour Covid-on-the-Web sont dérivées du corpus CORD-19, et en tant que telles différentes licences s'appliquent à ces dernières. Les métadonnées sur les articles ainsi que le contenu des articles traduits en RDF de CORD-19 sont publiés sous les mêmes termes que la licence de CORD-19. [26]

Les résultats de l'extraction des articles, qu'il s'agisse des ENs (CORD19-NEKG) ou des composants argumentatifs (CORD19-AKG), sont publiés selon les termes de la licence d'attribution Open Data Commons 1.0 (ODC-By). [27]

Maintenance. Chaque semaine de nouvelles recherches sont publiées au sujet du Covid-19. La valeur de Covid-on-the-Web, ainsi que des autres jeux de données s'attaquant à cette problématique, réside dans leur habilité à pouvoir intégrer ces nouveaux résultats au fur et à mesure de leur publication. À cette fin, nous avons pris soin de produire un pipeline documenté et reproductible, et nous avons déjà effectué une telle mise à jour, validant ainsi notre démarche. À moyen terme, nous avons l'intention d'améliorer la fréquence des mises à jour en considérant à la fois *(1)* l'importance des mises à jour de CORD-19 (nombre de nouveaux articles), et *(2)* les besoins définis par l'expression de nouveaux scénarios d'application (voir Section 5). En outre, nous avons déployé un serveur permettant d'héberger un endpoint SPARQL qui bénéficie d'une infrastructure à haute disponibilité et d'un support 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

26. https://ai2-semanticscholar-cord-19.s3-us-west-2.amazonaws.com/2020-03-13/COVID.DATA.LIC.AGMT.pdf

27. http://opendatacommons.org/licenses/by/1.0/

4 Visualisation et utilisations du jeu de données

Notre projet s'est également attaché à explorer les moyens de visualiser les données et d'interagir avec elles. Nous avons pour cela développé un outil appelé *Covid Linked Data Visualizer* [28] qui comprend une interface web hébergée sur un serveur node.js, un moteur de transformation basé sur Corese Semantic Web factory [4], et la bibliothèque graphique MGExplorer [3].

Par le biais de l'interface web, les utilisateurs peuvent utiliser des requêtes SPARQL prédéfinies ou écrire leurs propres requêtes. Des formulaires HTML servent à spécifier certains critères de recherche tels que la date de publication des articles. Par la suite, le moteur de transformation convertit les résultats des requêtes SPARQL dans le format JSON attendu par la bibliothèque graphique. L'exploration du graphe résultant est possible grâce à MGExplorer, une bibliothèque qui englobe un ensemble de techniques de visualisation spécialisées, chacune d'entre elles permettant de se concentrer sur un type de relation particulier.

La Figure 2 illustre certaines de ces techniques : le diagramme de graphe (gauche) montre une vue d'ensemble des nœuds et de leurs relations ; ClusterVis (en haut à droite) est une vue basée sur les clusters, qui permet de comparer les attributs des nœuds tout en préservant la représentation des relations entre eux ; IRIS (en bas à droite) est une vue égocentrique qui permet d'afficher tous les attributs et les relations d'un nœud donné. L'originalité de ces techniques de visualisation est d'offrir aux utilisateurs différents modes d'interaction qui peuvent les aider à explorer, classer et analyser l'importance des publications.

28. http://covid19.i3s.unice.fr:8080

©AFIA2021

Lors d'une réunion avec des organismes liés au domaine de la santé et de la recherche médicale (Inserm et INCa), un expert nous a indiqué un exemple de requête que les chercheurs aimeraient faire sur un tel jeu de données : "Identifier les articles qui mentionnent à la fois un type de cancer et un virus de la famille des coronavirus". En prenant en considération cette requête, nous avons utilisé Covid Linked Data Visualizer et affiché les résultats à l'aide de la bibliothèque MGExplorer (Figure 2).
Nous avons également créé plusieurs Notebooks Jupyter, Python et R [29] pour montrer que ces résultats peuvent être convertis en Dataframes (des structures de données tabulaires utilisées en analyse des données) afin de procéder à de la fouille de données (Figure 3).

5 Impact potentiel et exploitation

À notre connaissance, le jeu de données Covid-on-the-Web est le premier à intégrer dans un seul et même ensemble cohérent des ENs, arguments et éléments PICO . Nous pensons qu'il pourra servir de base pour des applications du Web sémantique, pour des algorithmes d'analyse comparative ou pour des défis.
Les ressources et les services que nous proposons, liés à la littérature concernant la COVID-19, sont intéressants pour les organismes et les instituts de santé puisqu'ils permettent d'extraire et d'analyser efficacement les informations sur une maladie encore relativement inconnue et pour laquelle la recherche est en constante évolution. Dans une certaine mesure, il est possible de croiser les connaissances pour mieux appréhender ce sujet et, en particulier, pour initier des recherches sur des voies inexplorées. Nous espérons également que l'ouverture des données et du code permettra aux contributeurs de faire progresser l'état actuel des connaissances sur cette maladie dont l'impact sanitaire est mondial.
En plus d'être interopérables avec les graphes de connaissances majeurs utilisés au sein de la communauté du Web Sémantique, les visualisations que nous offrons au moyen de MGExplorer et de Notebooks Jupyter montrent le potentiel de ces technologies dans d'autres domaines, à titre d'exemple, dans les domaines biomédicaux et médicaux.

Documentation / Tutoriels. Nous avons conservé les documents méthodologiques que nous avons suivis afin de pouvoir justifier nos choix de conception : La documentation technique des algorithmes et des représentations RDF, [30] les meilleures pratiques dans l'élaboration et publication des données (FAIR, Cool URIs, données liées à cinq étoiles, etc.) et des documentations destinées aux utilisateurs finaux (par exemple, les Notebooks Jupyter).

Scénarios, modèles d'utilisateurs et requêtes types. Nos ressources sont basées sur des outils génériques que nous avons adaptés à la problématique de la COVID-19. En adoptant une approche orientée utilisateur, nous les avons conçues selon trois principaux scénarios identifiés par une analyse des besoins des instituts biomédicaux avec lesquelles nous collaborons : *(Scénario 1)* Aider les cliniciens à obtenir des graphes argumentatifs pour analyser les essais cliniques et prendre des décisions fondées sur des données ; *(Scénario 2)* Aider les médecins en milieu hospitalier à collecter les valeurs biologiques (par exemple, le cholestérol) à partir d'articles scientifiques, afin de déterminer si leurs patients sont dans les normes ou non ; *(Scénario 3)* Aider les chefs de mission d'un institut du cancer à identifier les articles scientifiques traitant du cancer et des coronavirus afin d'élaborer des programmes de recherche pour étudier les liens entre eux.
La généricité des outils que nous avons développés nous permet de les appliquer à un panel plus large de scénarios, et nos partenaires dans le domaine biomédical nous incitent déjà à réfléchir à des scénarios liés à d'autres questions que la COVID-19.
Outre les scénarios décrits ci-dessus, nous établissons également des modèles d'utilisateurs représentatifs (sous la forme de personas), dont le but est de nous aider à identifier les besoins, l'expérience, les comportements et les objectifs de nos utilisateurs.
Nous avons également reçu diverses demandes des utilisateurs potentiels que nous avons interrogés. Ces demandes servent à préciser et à tester notre graphe de connaissances et nos services. À des fins de généricité, nous avons élaboré une typologie à partir des demandes collectées, en utilisant des dimensions telles que : demande prospective vs. rétrospective ou demande descriptive (demande de description) vs. explicatives (demande d'explication) vs. argumentatives (demande d'argumentation). Voici des exemples de ces requêtes :
(Demandes descriptives prospectives) Quels types de cancers sont susceptibles d'apparaître chez les victimes de la COVID-19 au cours des prochaines années ? Chez quelles catégories de patients ? Etc.
(Demandes rétrospectives descriptives) Quels types de cancers sont apparus chez les victimes de [SARSCoV1 | MERS-CoV] au cours des [2|3|n] années suivantes ? Quel était le taux d'occurrence ? Chez quels types de patients ? Etc. Quelles sont les différentes séquelles liées aux coronavirus ? Quels sont les patients guéris de la COVID-19 qui ont une fibrose pulmonaire ?
(Demandes rétrospectives explicatives) Le [SARS-CoV1 | MERS-CoV] peut-il induire le cancer ? La [malignité | progression du cancer] est-elle directement induite par une infection au coronavirus ? Ou était-elle indirectement causée par les [inflammations | modifications métaboliques] liées à une infection ? Quelles séquelles liées aux coronavirus sont responsables du plus fort potentiel de malignité ?
(Demande rétrospective argumentatives) Quelles sont les preuves que le [SARS-CoV1 | MERS-CoV] provoque le cancer ? Quelles expériences ont démontré que la fibrose pulmonaire observée chez les patients guéris de la COVID-19 était causée par la COVID-19 ?
Ces requêtes sont une brève illustration d'une liste réelle (mais non exhaustive) de questions avancées par les utilisateurs. Certaines questions peuvent trouver une réponse en

29. https://github.com/Wimmics/covidontheweb/tree/master/notebooks
30. https://github.com/Wimmics/covidontheweb/blob/master/doc/01-data-modeling.md

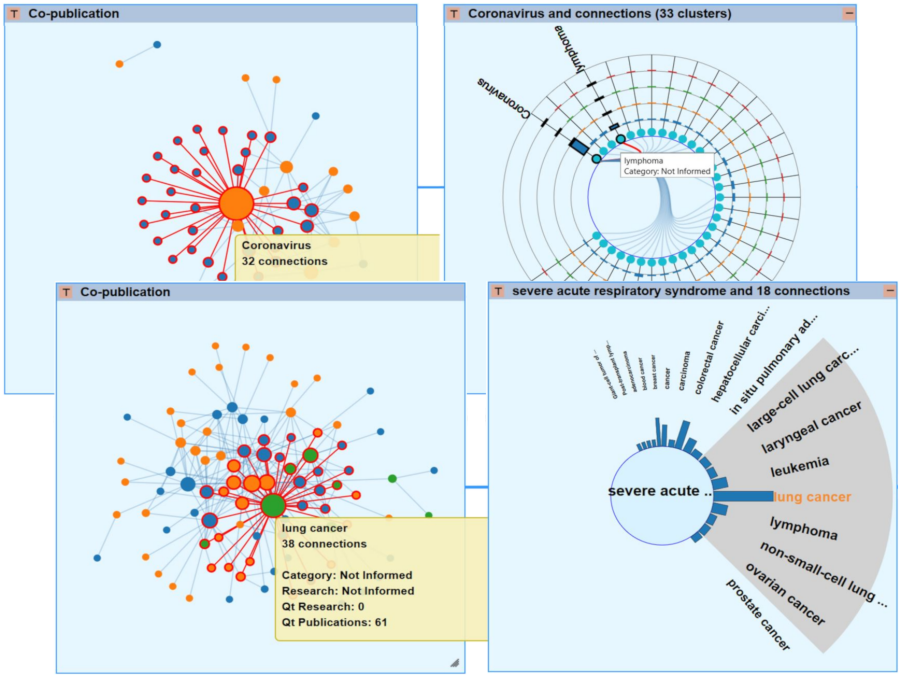


FIGURE 2 – Covid Linked Data Visualizer : visualisation des articles qui mentionnent à la fois un type de cancer (points bleus) et un virus de la famille des coronavirus (points orange).

montrant la corrélation entre les composants (par exemple, les types de cancer), d'autres nécessitent de représenter des tendances (par exemple, le cancer susceptible de se produire au cours des prochaines années) et l'analyse d'attributs spécifiques (par exemple, des détails sur les changements métaboliques causés par la COVID-19). La réponse à ces questions complexes requiert l'exploration du corpus CORD-19, et pour cela nous offrons une variété d'outils d'analyse et de visualisation. Ces requêtes et la typologie générique seront réutilisées dans d'autres extensions ainsi que d'autres projets.

Le Covid Linked Data Visualizer (présenté dans la Section 4) permet l'exploration visuelle du jeu de données Covid-on-the-Web. Les utilisateurs peuvent inspecter les éléments du graphe généré par une requête SPARQL (en positionnant la souris sur les éléments) ou explorer le graphe de façon itérative en chaînant les visualisations et en utilisant l'une des techniques d'interaction disponibles (que ce soit par IRIS, ClusterVis, etc.). Ces techniques de visualisation sont destinées à aider les utilisateurs à comprendre les relations présentes au sein des résultats. Par exemple, les utilisateurs peuvent lancer une requête pour visualiser un réseau de co-auteurs ; puis se servir de IRIS et ClusterVis pour comprendre qui collabore ensemble et sur quelles thématiques. Ils peuvent également lancer une recherche pour trouver des articles mentionnant la COVID-19 et divers types de cancer. Enfin, le mode avancé permet d'ajouter de nouvelles requêtes SPARQL mettant en œuvre d'autres chaînes d'exploration de données.

6 Conclusion et perspectives

Nous avons décrit dans cet article les données et logiciels déployés par le projet Covid-on-the-Web. Nous avons adapté et combiné des outils pour traiter, analyser et enrichir le corpus CORD-19 afin de permettre aux chercheurs dans le domaine biomédical d'accéder plus aisément à la littérature relative à la COVID-19, de l'interroger et de lui donner sens.

Nous avons conçu et publié un graphe de connaissances des données liées décrivant les entités nommées mentionnées dans les articles de CORD-19 et les graphes d'argumentation qu'ils incluent. Nous avons également publié le pipeline mis en place pour générer ce graphe de connaissances, afin de *(1)* continuer à l'enrichir et de *(2)* faciliter la réutilisation et l'adaptation du jeu de données et du pipeline.

Au-delà de ce graphe de connaissances, nous avons également développé, adapté et déployé plusieurs outils fournissant des visualisations de données liées, des méthodes d'exploration et des Notebooks pour les spécialistes dans les sciences des données. Par nos interactions avec des instituts dans le domaine de la santé et de la recherche médicale (entretiens, observations, tests d'utilisateurs), nous continuons de nous assurer que notre approche est guidée par et alignée sur les besoins de la communauté biomédicale. Nous avons montré que notre jeu de données permet d'effectuer des recherches documentaires et fournir des visualisations adaptées aux besoins des experts. De plus, notre démarche, dès ses prémices, s'est attachée à répondre aux objectifs de la science ouverte et reproductible ainsi qu'aux principes FAIR.

©AFIA2021

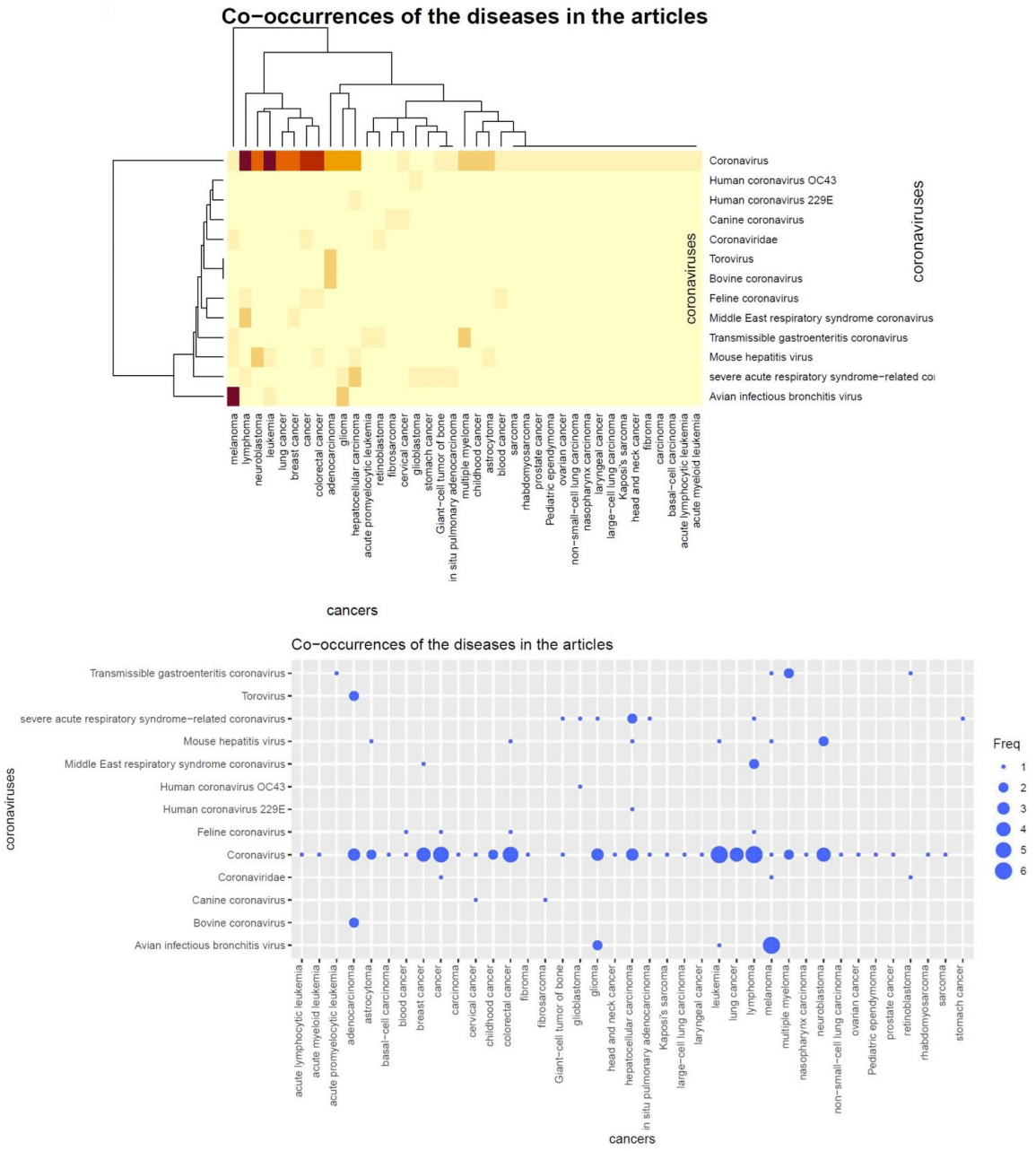


FIGURE 3 – Deux représentations différentes sous Jupyter Notebook du nombre d'articles qui co-mentionnent les types de cancer et les virus de la famille des coronavirus.

Depuis l'émergence de la COVID-19, le rythme effréné auquel les nouvelles recherches ont été publiées et les bases de connaissances ont évolué pose des problèmes critiques. Par exemple, de nouvelles versions de CORD-19 étaient publiées chaque semaine (désormais ce rythme peut être journalier), ce qui remet en question la capacité à suivre les dernières avancées. Par ailleurs, l'extraction et la désambiguïsation des ENs sur notre première version du jeu de données avaient été réalisées à l'aide de modèles préentraînés produits avant la pandémie, donc avant même la création de l'entité SARS-Cov-2 dans Wikidata. Par conséquent, à moyen terme, nous avons l'intention de nous engager dans un objectif de maintenance pérenne visant à ingérer régulièrement de nouvelles données, suivre l'évolution des connaissances et mettre régulièrement à jour nos extracteurs. Étant donné qu'il n'existe pas de jeu de données de référence de CORD-19 qui aurait été manuellement annoté et qui pourrait donc servir de référence (gold standard), il est difficile d'évaluer la qualité des modèles utilisés pour extraire les ENs et les structures argumentatives. Pour pallier ce problème, nous travaillons sur la mise en œuvre de curation de contenu (data curation), et la découverte auto-

matisée de motifs et de règles d'association qui pourraient être utilisées pour détecter les erreurs dans l'extraction des ENs, permettant ainsi de proposer un contrôle qualité des données.

Références

[1] I. Beltagy, K. Lo, and A. Cohan. SciBERT : A pretrained language model for scientific text. In *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*, pages 3615–3620, 2019.

[2] M. Bersanelli. Controversies about COVID-19 and anticancer treatment with immune checkpoint inhibitors. *Immunotherapy*, 12(5) :269–273, April 2020.

[3] R. Cava, C. Freitas, and M. Winckler. Clustervis : visualizing nodes attributes in multivariate graphs. In *Proceedings of the Symposium on Applied Computing, SAC 2017, Marrakech, Morocco, April 3-7, 2017*, pages 174–179. ACM, 2017.

[4] O. Corby, R. Dieng-Kuntz, and C. Faron-Zucker. Querying the semantic web with Corese search engine. In *Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, volume 16, page 705, Valencia, Spain, 2004.

[5] J. Daiber, M. Jakob, C. Hokamp, and P. Mendes. Improving efficiency and accuracy in multilingual entity extraction. In *Proceedings of the 9th International Conference on Semantic Systems*, pages 121–124, 2013.

[6] J. Devlin, M. Chang, K. Lee, and K. Toutanova. BERT : Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics : Human Language Technologies*, pages 4171–4186, 2019.

[7] B. Farias Lóscio, C. Burle, and N. Calegari. Data on the Web Best Practices. *W3C Recommandation*, 2017.

[8] R. Gazzotti, C. Faron-Zucker, F. Gandon, V. Lacroix-Hugues, and D. Darmon. Injecting domain knowledge in electronic medical records to improve hospitalization prediction. In *The Semantic Web - 16th European Conference, ESWC, Portorož, Slovenia, June 2-6, 2019, Proceedings*, volume 11503 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 116–130. Springer, 2019.

[9] R. Gazzotti, C. Faron-Zucker, F. Gandon, V. Lacroix-Hugues, and D. Darmon. Injection of automatically selected DBpedia subjects in electronic medical records to boost hospitalization prediction. In *SAC '20 : The 35th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing, online event, March 30 - April 3, 2020*, pages 2013–2020. ACM, 2020.

[10] C. Jonquet, N. Shah, and M. Musen. The open biomedical annotator. *Summit on translational bioinformatics*, 2009 :56, 2009.

[11] T. Mayer, E. Cabrio, and S. Villata. ACTA a tool for argumentative clinical trial analysis. In *Proceedings of the 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 6551–6553, 2019.

[12] T. Mayer, E. Cabrio, and S. Villata. Transformer-based argument mining for healthcare applications. In *Proceedings of the 24th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, 2020.

[13] F. Michel, L. Djimenou, C. Faron-Zucker, and J. Montagnat. Translation of Relational and Non-Relational Databases into RDF with xR2RML. In *Proceeding of the 11th International Conference on Web Information Systems and Technologies (WebIST)*, pages 443–454, Lisbon, Portugal, 2015.

[14] F. Michel, F. Gandon, V. Ah-Kane, A. Bobasheva, E. Cabrio, O. Corby, R. Gazzotti, A. Giboin, S. Marro, T. Mayer, M. Simon, S. Villata, and M. Winckler. Covid-on-the-web : Knowledge graph and services to advance COVID-19 research. In *The Semantic Web - ISWC 2020 - 19th International Semantic Web Conference, Athens, Greece, November 2-6, 2020, Proceedings, Part II*, volume 12507 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 294–310. Springer, 2020.

[15] M. Neumann, D. King, I. Beltagy, and W. Ammar. ScispaCy : Fast and Robust Models for Biomedical Natural Language Processing. In *Proceedings of the 18th BioNLP Workshop and Shared Task*, pages 319–327, Florence, Italy, August 2019. Association for Computational Linguistics.

[16] B. Nye, J. Li, R. Patel, Y. Yang, I. Marshall, A. Nenkova, and B. Wallace. A corpus with multi-level annotations of patients, interventions and outcomes to support language processing for medical literature. In *Proc. 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, pages 197–207, 2018.

[17] Haşim Sak, Andrew Senior, and Françoise Beaufays. Long short-term memory based recurrent neural network architectures for large vocabulary speech recognition. *arXiv preprint arXiv :1402.1128*, 2014.

[18] L. Wang, K. Lo, Y. Chandrasekhar, R. Reas, J. Yang, D. Eide, K. Funk, R. Kinney, Z. Liu, W. Merrill, P. Mooney, D. Murdick, D. Rishi, J. Sheehan, Z. Shen, B. Stilson, A. Wade, K. Wang, C. Wilhelm, B. Xie, D. Raymond, D. Weld, O. Etzioni, and S. Kohlmeier. Cord-19 : The covid-19 open research dataset. *ArXiv*, abs/2004.10706, 2020.

©AFIA2021

Défis ouverts aux systèmes multi-agents dans le cadre des constellations de satellites d'observation de la Terre

Gauthier Picard[1], Clément Caron[2], Jean-Loup Farges[1],
Jonathan Guerra[2], Cédric Pralet[1], Stéphanie Roussel[1]

[1] ONERA DTIS, Université de Toulouse
prenom.nom@onera.fr

[2] Airbus Defence and Space, Toulouse
prenom.nom@airbus.com

Résumé

Dans cet article, nous identifions plusieurs opportunités et défis ouverts aux systèmes multi-agents, suite aux récents développements dans le domaine des constellations de satellites d'observation de la Terre. Nous nous concentrons sur trois catégories de défis relevant de ce domaine : (i) les problèmes de configuration de constellations et de stations au sol utilisées pour les exploiter, potentiellement opérées par différents acteurs, afin d'améliorer les services fournis et leur coordination ; (ii) les problèmes de planification et d'ordonnancement hors ligne, qui consistent à trouver des méthodes de résolution pour planifier les observations et les tâches de chargement de commandes et de déchargement de prises de vue de la constellation ; et (iii) la conception de méthodes opérationnelles en ligne efficaces et réactives pour adapter les plans dans des contextes dynamiques. Étant naturellement distribués et composés de multiples entités et utilisateurs, ces problèmes s'inscrivent clairement dans le paradigme multi-agent, et peuvent représenter des défis scientifiques et techniques pour les chercheurs en intelligence artificielle distribuée et systèmes multi-agents, pour de nombreuses années.

Mots-clés

Satellite, constellation, observation de la Terre, systèmes multi-agents.

Abstract

We identify several challenges and opportunities opened to agent and multiagent systems, following the recent developments in the domain of Earth observation constellations. We focus on three challenge categories that manifest in this field : (i) configuration problems of constellations and ground stations used to operate them, potentially owned by different actors, as to provide better services and coordination ; (ii) offline planning and scheduling problems, which consist in finding solution methods to schedule observation and upload/download tasks over the constellation ; (iii) the design of efficient and reactive online operation methods as to adapt schedules in dynamic settings.Being naturally distributed and composed of multiple entities and users, these problems clearly fit the multiagent paradigm, and may challenge researchers for many years.

Keywords

Satellite, Constellation, Earth observation, Multiagent systems.

1 Introduction

Ces dernières années ont vu une forte augmentation du développement des constellations de satellites. Au lieu de considérer des satellites individuels, l'idée est de tirer parti d'un groupe de satellites, dont certains partagent souvent les mêmes plans orbitaux, pour fournir des services de positionnement, de télécommunications ou d'observation de la Terre [63], plus riches. Avec peu de satellites (*e.g.* deux dans le cas de la constellation PLEIADES [38]), et sur des orbites terrestres basses ou moyennes (altitude inférieure à 35 000 km), aucune région de la Terre n'est couverte à tout moment. Ainsi, la principale motivation pour augmenter la taille de ces constellations est de permettre d'observer n'importe quel point sur Terre à une fréquence plus élevée, comme le fait par exemple la société Planet avec plus de 150 satellites d'observation de la Terre (EOS) [54]. Mais l'exploitation de nombreux EOS nécessite d'améliorer la coopération entre les moyens sol et bord afin d'utiliser au mieux le système, ce qui est une tâche hautement combinatoire. Outre leur taille croissante, la composition des constellations évolue également. Les technologies récentes permettent la production et le déploiement d'EOS agiles capables de changer leur orientation, et de fournir de multiples types de prises de vue avec de multiples capteurs. Tout en fournissant des services plus riches, cela ajoute de nombreux degrés de liberté et des variables de décision pour programmer l'activité de l'EOS, ouvrant ainsi de nombreux défis scientifiques et techniques [3, 65].

La figure 1 montre un système EOS avec ses opérations au sol et dans l'espace. Elle met en évidence la multiplicité et la richesse des acteurs et des composants ayant leurs propres activités et objectifs. Comme les EOS ont une capacité de calcul embarquée limitée, la majeure partie de la mission est déterminée hors ligne et transmise aux EOS à

©AFIA2021

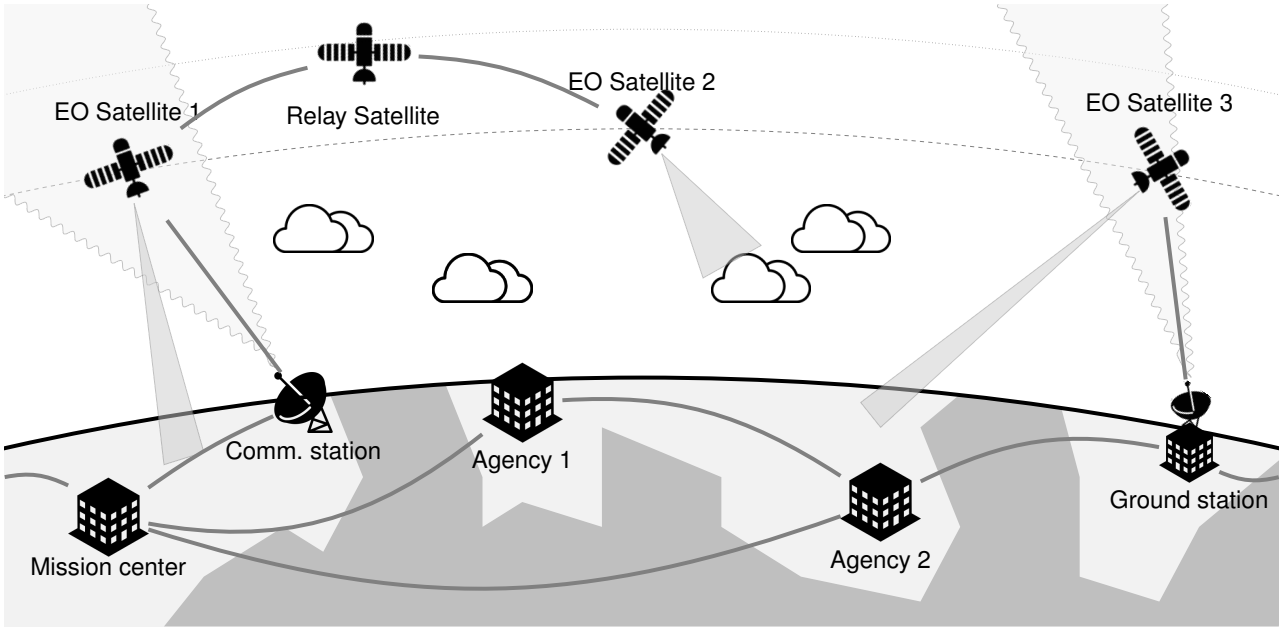


FIGURE 1 – Un système d'observation de la Terre composé d'un centre mission principal et de stations distribuées (ainsi que leurs fenêtres de visibilité), d'agences émettant des requêtes d'observation (au centre mission), de satellites d'observation (et leur empreinte sol), et de communication (reliant les satellites d'observation).

l'aide de stations au sol. En outre, les centres de mission et les agences doivent collaborer pour partager les orbites, programmer les téléchargements de plans, les acquisitions d'images et les données. Si la constellation EOS appartient à différentes parties prenantes, celles-ci peuvent même négocier le partage de certaines ressources embarquées. Les opérations dans l'espace nécessitent également une coopération, notamment entre les EOS qui doivent effectuer de multiples acquisitions, qui sont également souvent composites (*e.g.* plusieurs images requises pour couvrir une large région). Pour les applications optiques, les incertitudes météorologiques doivent être traitées pour éviter de capturer des images inutiles remplies de nuages. Les EOS se partagent également les tâches, de sorte que les observations inutilisables faites par un EOS peuvent être effectuées plus tard par un EOS suivant survolant la région. En ce qui concerne la coopération, les EOS peuvent s'appuyer sur des communications indirectes (via des satellites relais dédiés) ou directes à courte distance pour transférer les tâches de l'un à l'autre, au lieu d'attendre plusieurs minutes pour interagir avec les stations terrestres accessibles.

Ce scénario illustre la nécessité de coopérer, de résoudre et de planifier collectivement, de s'adapter et d'interagir, qui sont les motivations principales des systèmes multi-agents (SMA). Alors que les SMA ont été identifiés très tôt pour modéliser les systèmes de satellites [52, 32], ce scénario ouvre de nouveaux défis à relever par la communauté SMA, regroupés en trois catégories. La section 2 traite des techniques multi-agents qui pourraient aider à concevoir et à dimensionner les constellations de satellites avant leur déploiement. La section 3 passe en revue certains modèles multi-agents pour la gestion au sol des principaux problèmes d'allocation et de planification au sol, de tâches d'acquisition d'images, de communication et de manœuvre, et dont les solutions sont poussées jusqu'à la constellation. Enfin, la section 4 explore comment les systèmes multi-agents, et plus particulièrement les notions d'autonomie et d'interaction, peuvent apporter adaptation et résilience à l'exploitation des satellites, une fois les plans déjà installés à bord. Nous mettons l'accent sur les domaines d'intérêt multi-agents dans lesquels chaque défi se situe, en utilisant la notation ➥ *<domaine>* (tirés des domaines listés dans l'appel des Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents [1]).

2 Défis dans la conception de constellations

2.1 Modélisation et simulation

La phase de conception consiste à dimensionner la constellation, c'est-à-dire à déterminer le ou les modèles orbitaux, le nombre de satellites sur chaque plan orbital ainsi que leurs éléments, ainsi l'ensemble des stations au sol utilisées pour télécharger les images et les plans de mission. La nature composite, l'hétérogénéité, la dynamique et l'ouverture de la constellation EOS doivent prises en compte dans cette phase. De plus, les systèmes spatiaux sont parmi les plus exigeants en matière d'exigences fonctionnelles et de sûreté.

Par exemple, les constellations EOS contiennent un grand nombre de satellites (d'une dizaine à plusieurs centaines de satellites), qui peuvent être très hétérogènes (plate-forme,

1. https://easychair.org/cfp/jfsma2021

charge utile, orbite) et généralement conçus pour un objectif spécifique à court terme (*e.g.* mission scientifique) [18]. Si toutes les tâches peuvent être effectuées par l'ensemble des satellites, le catalogue des demandes est beaucoup plus vaste que la capacité d'observation réelle de la constellation. Le problème consiste à sélectionner le sous-ensemble de satellites de la constellation pour effectuer les tâches d'observation. Le coût d'une équipe de satellite peut-être défini comme une agrégation du coût des tâches à effectuer, qui est fonction du satellite qui effectue réellement l'observation et du temps d'inactivité de chaque satellite. On vise alors à trouver l'équipe la moins chère pour un ensemble de tâches. En suivant cette approche et en utilisant les concepts de modélisation mutli-agent, il serait possible de prendre en compte un plus large éventail de propriétés lors de la conception des équipes (par exemple, la robustesse ou les objectifs individuels si les satellites appartiennent à des gestionnaires différents) [1].

La *modélisation et la programmation multi-agent* pourraient être d'une grande aide en fournissant des concepts de modélisation (par exemple, rôles, objectifs, organisations, institutions) et des méthodologies pour développer des plateformes permettant de gérer des systèmes multi-satellites et multi-opérateurs [68, 9]. En outre, la *simulation multi-agent* (ou MABS) apparaît comme une approche à grains fins, pertinente pour mieux appréhender le fonctionnement du système, ou pour faire des prédictions sur ses performances [72, 5, 15]. Dans le domaine spatial, les simulateurs existants comme Ptolemy [49] pourraient bénéficier des concepts et des efforts du MABS, d'autant plus que l'on prévoit une plus grande autonomie des systèmes spatiaux. Toutefois, une telle intégration nécessite des efforts de recherche sur le couplage et l'interopérabilité des simulateurs [44, 17]. Enfin, comme les modèles utilisés pour évaluer les performances sont différents des modèles utilisés pour mesurer le respect des exigences et la sûreté [59], une piste s'ouvre pour les chercheurs dans le domaine du génie logiciel orienté agent.

La conception d'une constellation EOS est également un problème *multi-objectif* visant à optimiser simultanément le nombre de passages de satellites au-dessus des régions cibles, le délai de revisite d'un satellite au-dessus de ces mêmes régions et également le coût de la constellation, tout en respectant les contraintes de sécurité. Pour les modèles simples, certaines méthodes analytiques peuvent être utilisées pour optimiser la conception de la constellation [35, 51]. Pour les modèles et simulations complexes, la conception de l'architecture peut être traitée par différentes approches numériques, comme l'optimisation multidisciplinaire [15], les algorithmes génétiques [20] ou l'optimisation par essaim de particules [66]. Mais, ces techniques de type *black box* rendent difficile la compréhension de l'influence des paramètres sur les configurations résultantes. Pouvoir expliquer aux décideurs les différents composants, leur comportement et leurs interactions est un défi majeur, qui pourrait être permis par l'intégration de MABS aux méthodes d'optimisation.

➥ *Simulation multi-agent*
➥ *Langages de programmation multi-agents*
➥ *Méthodes et méthodologies multi-agents*
➥ *Organisations, Normes, Coalitions*
➥ *Vérification et validation des systèmes multi-agents*

2.2 Allocation et partage de ressources

Lorsqu'une constellation EOS est utilisée par plusieurs parties prenantes, il peut être exigé que son exploitation soit équitable ou juste, *e.g.* en fonction de l'investissement financier de chaque utilisateur. Ce problème relève du domaine de l'*allocation de ressources multi-agents* (ou MARA) [19]. Pour les constellations EOS, les utilisateurs ou clients peuvent partager différents types de biens, tels que des orbites, qui peuvent être considérés comme des biens divisibles, et obtenir l'exclusivité sur les portions d'orbite qui leur sont attribuées. Dans ce cas, les utilisateurs disposent de leur propre centre de mission et peuvent exploiter les EOS sur les portions qui leur sont attribuées. Les utilisateurs peuvent également partager des EOS en demandant une observation d'une zone géographique. Dans ce cas, les demandes sont considérées comme des biens indivisibles et les demandes d'un utilisateur donné qui sont effectivement programmées sur la constellation peuvent être considérées comme le lot de cet utilisateur.
Le cas de la division équitable soulève plusieurs défis [13]. Premièrement, l'*équité* (*fairness*) est étroitement lié aux préférences des utilisateurs car il est nécessaire de comparer les lots qui peuvent être attribués à chaque utilisateur. Représenter les préférences de manière compacte tout en étant capable de raisonner efficacement sur celles-ci est un défi en lui-même (*e.g.* CP-net pour les préférences ordinales [12]). Dans le contexte des EOS, de nombreuses caractéristiques pourraient être utilisées pour définir l'utilité d'une requête, sa priorité, sa zone d'observation et l'incertitude sur la météo [62]. La plupart des formalismes de représentation des préférences supposent que l'utilité d'un ensemble est la somme des utilités des éléments de l'ensemble. Dans le domaine spatial, les utilités des requêtes d'observation peuvent ne pas être indépendantes les unes des autres ou peuvent être assez complexes (*e.g.* requêtes périodiques), et nécessitent d'aller *au-delà de l'additivité* et d'envisager des hypothèses plus réalistes.
En outre, il existe plusieurs concepts d'équité, et peu de travaux tiennent compte de l'équité lors de la planification des activités des EOS. L'équité peut être définie comme proportionnelle à la contribution financière dans le financement de la constellation [37]. L'équité peut également être définie comme une équité *maxmin* [61, 33]. En outre, l'équité n'est généralement pas le seul critère à prendre en compte et un compromis entre plusieurs critères est souvent nécessaire (*e.g.* entre efficacité et équité). Plusieurs procédures caractérisant des allocations efficaces et équitables pour EOS ont été étudiées [37], et alternativement l'équité fait partie d'un critère bi-objectif [61]. Trouver des procédures, centralisées ou décentralisées, qui permettent d'obtenir une allocation optimale ou de bonne qualité est un réel défi technique. Dans le cas d'EOS où les orbites sont partagées entre plu-

©AFIA2021

sieurs utilisateurs, on pourrait par exemple envisager des mécanismes d'enchères [19, 8] : les utilisateurs soumettent leurs offres (*i.e.* rapporte leurs préférences) publiquement ou en privé, il peut y avoir un ou plusieurs tours et l'allocation est faite par un commissaire-priseur.

➥ *Résolution collective de problèmes*
➥ *Théorie des jeux*

3 Défis dans les opérations hors-ligne

En opération, les centres de mission calculent des plans hors ligne pour chaque EOS, à partir d'un carnet de commandes. Outre le positionnement des acquisitions, ces plans doivent également préciser quand télécharger le résultat de l'activité des EOS vers les stations au sol accessibles, afin de préserver la mémoire embarquée limitée. Ceci résulte en un ensemble de problèmes de large échelle difficiles à résoudre.

3.1 Planification des observations

Ces problèmes sont distribués par la nature, et donc partiellement ou totalement décomposables. Cela ouvre la porte aux techniques multi-agents pour la résolution des problèmes. Par exemple, les différents composants des systèmes peuvent être considérés comme faisant partie d'un marché pour trouver des accords, en utilisant un *Contract Net Protocol* étendu, afin de résoudre un problème de planification de missions multi-satellites [48]. Les techniques d'*optimisation distribuée sous contraintes* (ou DCOP) [42] peuvent également être des méthodes de résolution efficaces pour aborder des problèmes d'allocation des tâches d'observation et de communication, où les variables de décision et les contraintes sont réparties sur un ensemble d'agents. Par exemple, la recherche distribuée à grand voisinage (*Distributed Large Neighborhood Search*) [26] pourrait être appliquée à la planification multi-satellites, comme c'est le cas avec son homologue centralisé [29]. L'ajout de la distribution permettrait d'améliorer l'explicabilité (en identifiant les lieux où des conflits sérieux apparaissent), la réduction du temps de calcul (en divisant le processus de recherche en plusieurs sous-processus simultanés) et la confidentialité (dans le cas où certaines tâches sont secrètes). Cependant, le passage à l'échelle des méthodes de résolution DCOP et la présence de variables de décision à nombres entiers et mixtes sont des défis à relever, comme l'ont récemment montré des études sur les DCOP à variables continues [31].

Plus généralement encore, les problèmes d'ordonnancement des constellations peuvent être modélisés comme des problèmes multi-objectifs (*e.g.* minimisant la consommation d'énergie tout en maximisant les observations réussies) [7, 40, 39, 61, 69] et asymétriques (*e. g.* les utilisateurs peuvent ne pas avoir la même récompense si une certaine observation est effectuée), qui sont encore des modèles pour lesquels l'efficacité des méthodes de résolution distribuées reste à démontrer [21, 28]. Enfin, comme ces problèmes de planification sont à très grande échelle, les approches distribuées *heuristiques et par auto-organisation* basées sur des plans auto-adaptatifs pourraient fournir à tout moment des solutions *anytime* de manière rapide et réactive [11]. Cependant, ces techniques ne fournissent pas (encore) de garanties de qualité, qui sont pourtant des conditions préalables importantes à l'adoption de telles outils par les acteurs aérospatiaux.

➥ *Coordination, Travail en équipe, Planification*
➥ *Négociation multi-agent, consensus*
➥ *Résolution collective de problèmes*

3.2 Planification sous incertitudes

Les systèmes EOS sont soumis à deux principaux types d'incertitudes. Premièrement, certains nuages peuvent être présents lors d'une observation. Si la fraction de couverture nuageuse de l'observation est supérieure à la fraction de couverture nuageuse maximale associée à la requête, l'observation n'est pas valide. De plus, comme le plan est calculé un certain temps avant que l'acquisition ne soit effectivement effectuée, cette incertitude est irréductible. Par exemple, l'espérance de la valeur absolue de la différence entre les fractions de couverture nuageuse prévues et réelles augmente avec l'horizon de prévision atteignant 0,4 pour un horizon d'une heure [71]. Étant donné que les fractions se situent entre 0 et 1, cette valeur reflète une grande incertitude. Ainsi, il existe une incertitude non négligeable concernant le succès de chaque observation prévue.

Deuxièmement, les observations sont stockées dans la mémoire des satellites sous une forme compressée et le taux de compression est spécifique à chaque observation et n'est pas connu à l'avance. Par exemple, des taux de compression variant de 3 à 6 ont été observés sur un petit ensemble d'images [70]. Il existe donc une incertitude sur la quantité de mémoire occupée par chaque observation avant son téléchargement vers une station au sol et sur le temps de téléchargement de chaque observation. En outre, les temps de téléchargement sont également influencés par la variabilité du débit binaire et la récupération après des erreurs de transmission.

Le premier type d'incertitude est directement lié à la récompense, tandis que le second est une caractéristique de la transition d'état.

La *planification multi-agent sous incertitudes* [56] et plus spécifiquement les *processus de décision de Markov décentralisés et partiellement observables* (DEC-POMDP) [6] peut être pertinents dans ce contexte. Néanmoins, les algorithmes fournissant des solutions DEC-POMDP ne passent pas à l'échelle et le défi consiste à concevoir des solutions plus simples. En complément des approches basées sur des processus de Markov, des techniques d'optimisation distribuée traitant des incertitudes ont récemment conduit au développement des *DCOP probabilistes*. Ces techniques étendent les DCOP classiques en augmentant le résultat des fonctions de coût avec des propriétés stochastiques [4, 57, 47] ou en introduisent des variables aléatoires comme entrée des fonctions de coût, pour simuler des propriétés exogènes incontrôlables de l'environnement, et ainsi optimiser le résultat attendu en moyenne [36, 67]. Toutefois, il est également important de noter que la prévision

des mesures d'incertitude associées au succès des observations pose un problème en termes de portée du système multi-agent étudié (si l'agent prédicteur est à l'intérieur ou à l'extérieur du système), et en termes de type de mesure d'incertitude, car en effet presque toutes les techniques de planification des satellites sont basées sur des probabilités qui sont un cas particulier des *fonctions de croyance* [22] [53] pour lequel les éléments focaux sont des singletons. Le cas général des probabilités imprécises permettrait d'accroître la robustesse des décisions mais peut induire une complexité importante, impliquant par exemple le calcul de critères par intégrales de Choquet. Néanmoins, la *théorie des possibilités* [25] pour laquelle les éléments focaux sont emboîtés, pourrait permettre d'une part l'augmentation de la robustesse sans grand impact sur la complexité par un calcul de critère pessimiste relativement simple et d'autre part de maintenir un lien avec les probabilités par des transformations directes et inverses. Enfin, la définition d'une récompense déterministe qui prend en compte des demandes de différents types et priorités et qui peut facilement être combinée à la mesure d'incertitude choisie est un problème en soi.

➥ *Coordination, Travail en équipe, Planification*
➥ *Environnement (modélisation)*
➥ *Résolution collective de problèmes*

3.3 Déconfliction des requêtes utilisateurs

Les constellations de satellites impliquent de nombreux acteurs, comme les propriétaires de satellites, les opérateurs de satellites, les clients de services demandant des observations, les agences gouvernementales ou les opérateurs militaires. Le partage des ressources de la constellation entre des agents ayant des objectifs et des programmes différents implique que certains conflits peuvent survenir, qui ne peuvent être résolus de manière centralisée afin de garantir l'autonomie de décision et la préservation de la confidentialité. Ce dernier point est crucial : les EOS peuvent être utilisés à des fins de défense et de sécurité et la plupart des acteurs ne veulent pas que les autres soient informés de la façon dont ils utilisent les satellites. Par exemple, un opérateur d'un pays peut permettre à un client d'un autre pays d'utiliser son satellite pour effectuer une observation, mais ne peut pas permettre de capturer une image de son propre pays ou de savoir quelles sont les observations prévues avant et après l'observation demandée. Cela signifie que les différents utilisateurs doivent résoudre un problème dont les sous-composantes (variables de décision, contraintes ou paramètres) sont propres et privées. Les *techniques d'optimisation distribuées* comme les DCOP peuvent être considérées à nouveau, lorsque les utilisateurs visent un objectif commun (*par exemple* maximiser le nombre d'observations planifiées) [55]. En cas d'objectifs plus divergents, il est également intéressant d'envisager les approches par *optimisation de consensus* où les utilisateurs établissent des accords sur certaines variables de décision partagées [46, 45, 14]. Là encore, la présence conjointe de variables de décision discrètes et continues rend l'application de telles techniques encore plus difficile [60]. Dans des contextes plus conflictuels et non coopératifs, la *théorie des jeux* peut fournir des schémas de coordination pour résoudre ces situations conflictuelles, comme le propose un travail récent [58], ou pour concevoir des places de marché [23].

➥ *Coordination, Travail en équipe, Planification*
➥ *Négociation multi-agent, consensus*
➥ *Résolution collective de problèmes*
➥ *Théorie des jeux*

4 Défis dans les opérations en ligne

Les constellations EOS sont des systèmes dynamiques déployés dans des environnements également dynamiques. La planification hors ligne ne suffit pas pour assurer un fonctionnement pleinement efficace, lorsque les conditions météorologiques peuvent dégrader la qualité des images ou lorsque des requêtes de dernière minute arrivent. L'autonomie à bord est une dimension à prendre en compte pour doter les satellites de certaines routines d'adaptation à la volée en réponse à des événements imprévus.

4.1 Dynamique et replanification

Comme l'acquisition d'images peut échouer en raison de la présence de nuages, ou parce qu'une requête de dernière minute peut se produire, il est très important de pouvoir reprogrammer certaines observations. La reprogrammation peut être envisagée au sol ou à bord. La réparation du plan au sol est déclenchée une fois que les EOS ont téléchargé les données et que leur mauvaise qualité est identifiée par les centres de validation, qui peuvent alors demander une reprogrammation. Ici, les techniques classiques de réparation centralisée de plans peuvent être envisagées pour ajouter des tâches de manière dynamique, mais elles doivent être suffisamment rapides pour que le plan révisé soit poussé dès que possible vers le prochain EOS capable d'exécuter la tâche. Cette réparation doit être fournie de manière aussi réactive que possible par rapport à la construction d'un plan complet. Dans l'optique d'une prise de décision partiellement ou totalement embarquée, des techniques multi-agents existent pour faire face aux problèmes dynamiques, comme dans les *problèmes dynamique d'optimisation distribuée sous contraintes* (DynDCOP), où les agents coopèrent pour optimiser une série de problèmes au lieu d'optimiser une seule instance à un moment donné [30], ou pour pouvoir résoudre des problèmes qui changent au moment de l'exécution [50]. On peut également envisager, des techniques de *réparation de plans multi-agents* comme celles de la réparation embarquée [34], qui n'envisagent de modifier qu'une partie du plan pour les agents impactés au lieu de tout replanifier. Cependant, tout en fournissant des plans de bonne qualité, ces techniques souffrent encore d'une évolutivité limitée et nécessitent des communications fiables. Dans notre cas, la communication peut ne pas être persistante (*e.g.* les stations au sol ne sont pas accessibles à tout moment ou les satellites peuvent ne pas être en mesure d'interagir directement ou indirectement) [33]. Un schéma d'apprentissage distribué pour réparer les plans

©AFIA2021

multi-satellites a été proposé, par exemple, en remarquant que les informations historiques de planification des tâches coopératives auront un impact sur les résultats de la dernière planification [64]. Une autre famille de techniques candidates sont celles qui s'appuient sur la détermination de *consensus* [41, 27], où les agents négocient pour s'entendre sur certaines variables de décision (*par exemple* le choix des tâches à effectuer) tout en étant *résilient* aux perturbations de l'environnement et à l'asynchronisme [24, 50]. En outre, les EOS ont une capacité de calcul limitée, ce qui limite la gamme des techniques d'optimisation pouvant être réalisées à bord. Ainsi, les techniques d'auto-organisation, ne reposant que sur une communication limitée et nécessitant des calculs limités, semblent être des pistes pertinentes pour assurer l'adaptation des plans en cours d'exécution [11, 50, 33]. Bien que n'étant pas garantis de fournir des solutions optimales, ces techniques pourraient arbitrer entre les requêtes sur la base de critères simples (priorité) et pourraient transférer les demandes d'EOS à EOS. Cependant, pousser une telle autonomie et une telle décision à bord reste un véritable défi, qui nécessite encore de gros efforts de recherche en matière d'intelligence artificielle et de robotique pour être certifiée puis intégrée dans les systèmes opérationnels.

➥ *Commande et contrôle de système multi-agent*
➥ *Déploiement de SMA, Résistance aux pannes, Fiabilité*
➥ *Émergence, Auto-organisation, Viabilité*
➥ *Évolution, Adaptation*
➥ *Robotique collective*

4.2 Interactions et protocoles

Lorsqu'il s'agit d'opérations en ligne, l'examen des possibilités de communication est un point essentiel pour améliorer les performances du système. Pour les constellations EOS, les communications directes sont évidemment utilisées entre un centre de mission et les satellites, mais de nombreux autres types de communications peuvent également être utilisés, comme les communications directes entre deux satellites par une liaison intersatellite, les communications directes entre deux centres de mission gérant différentes parties de la constellation, les communications indirectes via des satellites relais géostationnaires ou des drones, et plus généralement les communications indirectes par un réseau de liaisons de communication. L'examen de tous ces liens de communication potentiels pour les futures constellations soulève de nombreux défis pour les opérations en ligne, tels que « quel protocole de communication doit être utilisé », « quand communiquer », « quelles données communiquer et à qui », ou « quelle est la valeur d'une information », pour n'en citer que quelques-unes. Certaines propositions ont déjà été faites pour répondre à ces questions. Par exemple, les *Delay Tolerant Networks* (DTN) peuvent être envisagés pour construire un système dans lequel un satellite donné peut avertir les autres satellites des positions terrestres où un phénomène particulier a été détecté [43]. Alternativement, chaque satellite peut maintenir une estimation de la connaissance des autres satellites en utilisant un protocole de communication épidémique entre satellites [10]. Enfin, la communication directe peut être utilisée pour la négociation et la coordination entre les agents des engins spatiaux [52, 2] et également pour acheminer les données d'observation d'un satellite à une station de réception au sol par le biais de liaisons intersatellites, de manière à réduire le temps pendant lequel les utilisateurs peuvent obtenir leurs images [16]. Ces quelques exemples montrent que les communications peuvent être utilisées à la fois pour des raisons épistémiques (apporter une information qui peut aider à prendre de meilleures décisions ou à mettre en œuvre un protocole de coordination) et pour des raisons de performance (communiquer des données d'observation et obtenir une récompense immédiate des utilisateurs), un objectif commun étant d'obtenir soit une meilleure réactivité soit un meilleur partage des tâches entre les agents.

➥ *Interaction, Communication, Protocoles*
➥ *Robotique collective*

5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons identifié plusieurs défis ouverts concernant les constellations de satellites d'observation de la Terre et leurs applications, relevant des domaines de l'intelligence artificielle distribuée et des systèmes multi-agents. En effet, la conception, le déploiement et l'exploitation de tels systèmes composés de plusieurs acteurs et ressources conviennent parfaitement au paradigme multi-agent. Toutefois, la difficulté et la nouveauté de ces problèmes constituent toujours un défi pour les méthodes existantes, ce qui ouvre de nouvelles pistes de recherche pour les années à venir, en particulier dans les domaines d'intérêt identifiés par la communauté multi-agent, allant de l'ingénierie des systèmes multi-agents à la robotique en passant par la représentation des connaissances, le raisonnement et la planification. Finalement, à notre connaissance, du fait de la nouveauté des problèmes soulevés, il n'existe pas encore de benchmark et d'instance complexe leur correspondant. Un effort de formalisation et de publication de benchmarks et instances pourrait permettre non seulement la comparaison des performances de diverses méthodes du domaine des SMA mais aussi la comparaison des approches SMA avec d'autres approches de l'Intelligence Artificielle.

Références

[1] E. Andrejczuk, J. A. Rodriguez-Aguilar, and C. Sierra. A Concise Review on Multiagent Teams : Contributions and Research Opportunities. In Natalia Criado Pacheco, Carlos Carrascosa, Nardine Osman, and Vicente Julián Inglada, editors, *Multi-Agent Systems and Agreement Technologies*, pages 31–39, Cham, 2017. Springer International Publishing.

[2] C. Araguz, A. Alvaro, I. del Portillo, K. Root, E. Alarcón, and E. Bou-Balust. On autonomous software architectures for distributed spacecraft : A local-global policy. In *2015 IEEE Aerospace Conference*, pages 1–9, 2015.

[3] C. Araguz, E. Bou-Balust, and E. Alarcón. Applying autonomy to distributed satellite systems : Trends, challenges, and future prospects. *Systems Engineering*, 21(16) :401–416, 03 2018.

[4] J. Atlas and K. Decker. Coordination for uncertain outcomes using distributed neighbor exchange. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '10, page 1047–1054, Richland, SC, 2010. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[5] G. Bastianelli, D. Salamon, A. Schisano, and A. Iacobacci. Agent-based simulation of collaborative unmanned satellite vehicles. In *2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL)*, pages 1–6, Rome, 2012. IEEE.

[6] D.S. Bernstein, R. Givan, N. Immerman, and S. Zilberstein. The complexity of decentralized control of markov decision processes. *Mathematics of operations research*, 27(4) :819–840, 2002.

[7] N. Bianchessi, J.-F. Cordeau, J. Desrosiers, G. Laporte, and V. Raymond. A heuristic for the multi-satellite, multi-orbit and multi-user management of earth observation satellites. *European Journal of Operational Research*, 177(2) :750 – 762, 2007.

[8] L. Blumrosen and N. Nisan. Combinatorial auctions. *Algorithmic game theory*, 267 :300, 2007.

[9] O. Boissier, R.H. Bordini, J.F. Hübner, A. Ricci, and A. Santi. Multi-agent oriented programming with jacamo. *Science of Computer Programming*, 78(6) :747 – 761, 2013.

[10] G. Bonnet and C. Tessier. Collaboration among a satellite swarm. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2007.

[11] J. Bonnet, M.-P. Gleizes, E. Kaddoum, S. Rainjonneau, and G. Flandin. Multi-satellite mission planning using a self-adaptive multi-agent system. In *2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, pages 11–20, Boston, 2015. IEEE.

[12] C. Boutilier, R. I. Brafman, C. Domshlak, H. H. Hoos, and D. Poole. Cp-nets : A tool for representing and reasoning withconditional ceteris paribus preference statements. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 21 :135–191, Feb 2004.

[13] S. Bouveret, Y. Chevaleyre, and N. Maudet. Fair allocation of indivisible goods. In *Handbook of Computational Social Choice*, pages 284–310, Cambridge, UK, 2016. Cambridge University Press.

[14] S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, B. Peleato, and J. Eckstein. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Found. Trends Mach. Learn.*, 3(1) :1–122, January 2011.

[15] I. A. Budianto and J. R. Olds. Design and deployment of a satellite constellation using collaborative optimization. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 41(6) :956–963, 2004.

[16] K.L. Cahoy and A.K. Kennedy. Initial Results from ACCESS : An Autonomous CubeSat Constellation Scheduling System for Earth Observation. In *31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2017.

[17] B. Camus, T. Paris, J. Vaubourg, Y. Presse, C. Bourjot, L. Ciarletta, and V. Chevrier. Co-simulation of cyber-physical systems using a devs wrapping strategy in the mecsyco middleware. *SIMULATION*, 94(12) :1099–1127, 2018.

[18] H. Chen, S. Yang, J. Li, and N. Jing. Exact and Heuristic Methods for Observing Task-Oriented Satellite Cluster Agent Team Formation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018 :1–23, August 2018.

[19] Y. Chevaleyre, P.E. Dunne, U. Endriss, J. Lang, M. Lemaître, N. Maudet, J.A. Padget, S. Phelps, J.A. Rodríguez-Aguilar, and P. Sousa. Issues in multiagent resource allocation. *Informatica (Slovenia)*, 30(1) :3–31, 2006.

[20] C. Dai, G. Zheng, and Q. Chen. Satellite constellation design with multi-objective genetic algorithm for regional terrestrial satellite network. *China Communications*, 15(8) :1–10, 2018.

[21] F. M. Delle Fave, R. Stranders, A. Rogers, and N. R. Jennings. Bounded decentralised coordination over multiple objectives. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '11, page 371–378, Richland, SC, 2011. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[22] Arthur P Dempster. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. In *Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions*, pages 57–72. Springer, 2008.

[23] G. Denis, A. Claverie, X. Pasco, J.-P. Darnis, B. de Maupeou, M. Lafaye, and E. Morel. Towards disruptions in earth observation ? new earth observation systems and markets evolution : Possible scenarios and impacts. *Acta Astronautica*, 137 :415 – 433, 2017.

[24] S.M. Dibaji and H. Ishii. Resilient multi-agent consensus with asynchrony and delayed information. *IFAC-PapersOnLine*, 48(22) :28 – 33, 2015. 5th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems NecSys 2015.

[25] D. Dubois and H. Prade. Possibilistic logic — an overview. In Jörg H. Siekmann, editor, *Computational Logic*, volume 9 of *Handbook of the History of Logic*, pages 283 – 342. North-Holland, Amsterdam, Holland, 2014.

[26] F. Fioretto, F. Campeotto, A. Dovier, E. Pontelli, and W. Yeoh. Large neighborhood search with quality guarantees for distributed constraint optimization problems. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '15, page

©AFIA2021

1835–1836, Richland, SC, 2015. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[27] P. Franceschelli and P. Frasca. Proportional dynamic consensus in open multi-agent systems. In *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 900–905, Miami Beach, FL, USA, 2018. IEEE.

[28] T. Grinshpoun, A. Grubshtein, R. Zivan, A. Netzer, and A. Meisels. Asymmetric distributed constraint optimization problems. *J. Artif. Int. Res.*, 47(1) :613–647, May 2013.

[29] L. He, L. Xiaolu, G. Laporte, Y.-W. Chen, and Y. Chen. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling. *Computers and Operations Research*, 100 :12–25, 07 2018.

[30] K. D. Hoang, F. Fioretto, P. Hou, M. Yokoo, W. Yeoh, and R. Zivan. Proactive dynamic distributed constraint optimization. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '16, page 597–605, Richland, SC, 2016. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[31] K. D. Hoang, W. Yeoh, M. Yokoo, and Z. Rabinovich. New algorithms for continuous distributed constraint optimization problems. In *International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, AAMAS '20, page 502–510, Richland, SC, 2020. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[32] Hongwei Xia, Guangcheng Ma, Weinan Xie, and Baomin Feng. Multiple satellite formation based on multi-agent. In *2006 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pages 4 pp.–705, Harbin, China, 2006. IEEE.

[33] M. Johnston. Scheduling nasa's deep space network : Priorities, preferences, and optimization. 2020.

[34] A. Komenda, P. Novák, and M. Pěchouček. Domain-independent multi-agent plan repair. *Journal of Network and Computer Applications*, 37 :76 – 88, 2014.

[35] C. L. Korb and A.R. Korb. Methods for optimizing the performance, cost and constellation design of satellites for full and partial earth coverage, May 26 2020. US Patent 10,664,782.

[36] T. Léauté and B. Faltings. Distributed constraint optimization under stochastic uncertainty. In *Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, AAAI'11, page 68–73. AAAI Press, 2011.

[37] 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.

[38] M. Lemaître, G. Verfaillie, F. Jouhaud, J.-M. Lachiver, and N. Bataille. Selecting and scheduling observations of agile satellites. *Aerospace Science and Technology*, 6(5) :367 – 381, 2002.

[39] L. Li, H. Chen, J. Li, N. Jing, and M. Emmerich. Preference-Based Evolutionary Many-Objective Optimization for Agile Satellite Mission Planning. *IEEE Access*, 6 :40963–40978, 2018. Conference Name : IEEE Access.

[40] L. Li, F. Yao, N. Jing, and M. Emmerich. Preference incorporation to solve multi-objective mission planning of agile earth observation satellites. In *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2017*, pages 1366–1373. IEEE, 2017.

[41] Z. Li, Z. Duan, and F. L. Lewis. Distributed robust consensus control of multi-agent systems with heterogeneous matching uncertainties. *Automatica*, 50(3) :883 – 889, 2014.

[42] P.J. Modi, W.-M. Shen, M. Tambe, and M. Yokoo. Adopt : Asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees. *Artif. Intell.*, 161(1–2) :149–180, January 2005.

[43] S. Nag, A. Li, V. Ravindra, M. Sanchez Net, K.-M. Cheung, R. Lammers, and B. Bledsoe. Autonomous Scheduling of Agile Spacecraft Constellations with Delay Tolerant Networking for Reactive Imaging. In *International Conference on Automated Planning and Scheduling SPARK Workshop*, 2019.

[44] K. Ndiaye, F. Balbo, J.-P. Jamont, and M. Occello. Simulation coupling limitations with respect to shared entities constraints. In *8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 338–346. INSTICC, SciTePress, 2018.

[45] A. Nedić, A. Olshevsky, and Wei Shi. *Decentralized Consensus Optimization and Resource Allocation*, pages 247–287. Springer International Publishing, Cham, 2018.

[46] A. Nedić, A. Ozdaglar, and P. A. Parrilo. Constrained consensus and optimization in multi-agent networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(4) :922–938, 2010.

[47] D. T. Nguyen, W. Yeoh, and H.C. Lau. Stochastic dominance in stochastic dcops for risk-sensitive applications. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '12, page 257–264, Richland, SC, 2012. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[48] Peng Feng, Hao Chen, Shuang Peng, Luo Chen, and Longmei Li. A method of distributed multi-satellite mission scheduling based on improved contract net protocol. In *2015 11th International Conference on Natural Computation (ICNC)*, pages 1062–1068, Zhangjiajie, China, 2015. IEEE.

[49] Claudius Ptolemaeus, editor. *System Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II*. Ptolemy.org, Berkeley, California, USA, 2014.

[50] P. Rust, G. Picard, and F. Ramparany. Resilient distributed constraint optimization in physical multi-agent systems. In *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, pages 195 – 202, Amsterdam, Holland, 2020. IOS Press.

[51] T. Savitri, Y. Kim, S. Jo, and H. Bang. Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semianalytical approach. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017 :1235692, May 2017.

[52] T. Schetter, M. Campbell, and D. Surka. Multiple agent-based autonomy for satellite constellations. *Artificial Intelligence*, 145(1) :147 – 180, 2003.

[53] Glenn Shafer. *A mathematical theory of evidence*, volume 42. Princeton university press, 1976.

[54] V. Shah, V. Vittaldev, L. Stepan, and C. Foster. Scheduling the world's largest earth-observing fleet of medium-resolution imaging satellites. *IWPSS*, 2019.

[55] P. K. Sinha and A. Dutta. Multi-satellite task allocation algorithm for earth observation. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 403–408, New York, New York, US, 2016. IEEE.

[56] M. T. J. Spaan and F. S. Melo. Interaction-driven markov games for decentralized multiagent planning under uncertainty. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '08, page 525–532, Richland, SC, 2008. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

[57] R. Stranders, F.M. Delle Fave, A. Rogers, and N.R. Jennings. U-gdl : A decentralised algorithm for dcops with uncertainty. Project report, May 2011.

[58] C. Sun, X. Wang, and X. Liu. Distributed satellite mission planning via learning in games. In *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pages 4381–4386, New York, New York, US, 2018. IEEE.

[59] A.H. Sánchez, T. Soares, and A. Wolahan. Reliability aspects of mega-constellation satellites and their impact on the space debris environment. In *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, pages 1–5, 2017.

[60] R. Takapoui, N. Moehle, S. Boyd, and A. Bemporad. A simple effective heuristic for embedded mixed-integer quadratic programming. *International Journal of Control*, 93(1) :2–12, 2020.

[61] P. Tangpattanakul, N. Jozefowiez, and P. Lopez. A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite. *European Journal of Operational Research*, 245(2) :542–554, September 2015.

[62] A.E. Vasegaard, M. Picard, F. Hennart, P. Nielsen, and S. Saha. Multi criteria decision making for the multi-satellite image acquisition scheduling problem. *Sensors*, 20(5) :1242, 2020.

[63] J.G. Walker. Satellite Constellations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 37 :559, December 1984.

[64] C. Wang, J. Li, N. Jing, J. Wang, and H. Chen. A distributed cooperative dynamic task planning algorithm for multiple satellites based on multi-agent hybrid learning. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24(4) :493 – 505, 2011.

[65] X. Wang, G. Wu, L. Xing, and W. Pedrycz. Agile earth observation satellite scheduling over 20 years : formulations, methods and future directions. *CoRR*, abs/2003.06169, 2020.

[66] X. Wang, H. Zhang, S. Bai, and Y. Yue. Design of agile satellite constellation based on hybrid-resampling particle swarm optimization method. *Acta Astronautica*, 178 :595 – 605, 2021.

[67] Y. Wang, K. Sycara, and P. Scerri. Towards an understanding of the value of cooperation in uncertain world. In *2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, WI-IAT '11, page 212–215, USA, 2011. IEEE Computer Society.

[68] M. Winikoff and L. Padgham. *Agent Oriented Software Engineering*, chapter 13, pages 695–757. MIT Press, 01 2013.

[69] W. Yang, Y. Chen, R. He, Z. Chang, and Y. Chen. The Bi-objective Active-Scan Agile Earth Observation Satellite Scheduling Problem : Modeling and Solution Approach. In *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 1–6, July 2018.

[70] G. Yu, T. Vladimirova, and M.N. Sweeting. Image compression systems on board satellites. *Acta Astronautica*, 64(9-10) :988–1005, 2009.

[71] I. Yucel, J. W Shuttleworth, X Gao, and S Sorooshian. Short-term performance of mm5 with cloud-cover assimilation from satellite observations. *Monthly weather review*, 131(8) :1797–1810, 2003.

[72] C. Zhang, Y. Wang, and Y. Zhao. Agent-based distributed simulation technology of satellite formation flying. In *Proceedings of the 2013 Fourth World Congress on Software Engineering*, WCSE '13, page 13–16, USA, 2013. IEEE Computer Society.

©AFIA2021

Planification multi-utilisateurs de tâches d'observation dans des constellations de satellites avec portions d'orbites exclusives

Gauthier Picard

ONERA-DTIS, Université de Toulouse, France

gauthier.picard@onera.fr

Résumé

Nous étudions des techniques distribuées de planification de tâches d'observation de la Terre avec utilisateurs et satellites multiples. Nous nous concentrons sur la coordination des utilisateurs ayant réservé des portions d'orbites exclusives et d'un planificateur central ayant plusieurs demandes qui peuvent utiliser certains intervalles de ces portions exclusives. Nous définissons le problème de planification de constellations de satellites d'observation de la Terre (EOSCSP). Pour le résoudre, nous proposons des schémas multiagents de résolution distribués, notamment l'optimisation sous contraintes distribuée, où les agents coopèrent pour répartir les demandes sans partager leurs propres plans. Ces contributions sont évaluées expérimentalement sur des instances EOSCSP générées sur la base de carnets d'observation réels grande échelle ou très conflictuels.

Mots-clés

Constellation de satellites, planification, DCOP, allocation de ressources.

Abstract

We investigate the use of distributed scheduling techniques on problems related to Earth observation with multiple users and satellites. We focus on the problem of coordinating users having reserved exclusive orbit portions and one central planner having several requests that may use some intervals of these exclusives. We define this problem as Earth Observation Satellite Constellation Scheduling Problem (EOSCSP) and map it to a Mixed Integer Linear Program. As to solve EOSCSP, we propose multiagent distributed solving schemes, notably Distributed Constraint Optimization, where agents cooperate to allocate requests without sharing their own schedules. These contributions are experimentally evaluated on EOSCSP instances based on real large-scale or very conflicting observation order books.

Keywords

Satellite constellation, scheduling, DCOP, resource allocation

1 Introduction

Ces dernières années ont vu une forte augmentation du développement des constellations de satellites. Au lieu de considérer des satellites individuels, elles tirent parti d'un groupe de satellites, dont certains partagent souvent les mêmes plans orbitaux, pour fournir des services plus riches comme le positionnement, les télécommunications ou l'observation de la Terre [10]. Avec peu de satellites dans une constellation (e.g. deux dans le projet PLEIADES [4]), et en orbite terrestre basse ou moyenne (altitude inférieure à 35 000 km), toute région de la Terre n'est pas couverte par la constellation à tout moment. Ainsi, la principale motivation pour augmenter la taille de ces constellations est de permettre de capturer avec une grande réactivité n'importe quel point sur Terre, comme le fait la société Planet avec plus de 150 satellites d'observation de la Terre (EOS) [9]. Mais l'exploitation de nombreux EOS nécessite une meilleure coopération entre les ressources et une autonomie à bord afin d'utiliser au mieux le système, ce qui devient une tâche hautement combinatoire. Outre leur nombre croissant, la composition des constellations évolue également. Les récentes avancées technologiques permettent la production et le déploiement d'EOS agiles capables de changer leur orientation, et de fournir de multiples types de prises de vue avec de multiples capteurs. Tout en offrant des services plus riches à de multiples utilisateurs, cela ajoute de nombreux degrés de liberté et des variables de décision pour programmer l'activité des EOS, et ouvre de nombreux défis [11].

Parmi ces défis, nous nous concentrons sur la planification collective d'observations sur un ensemble de satellites pour lesquels certains utilisateurs ont un *accès exclusif à certaines portions d'orbite*, en utilisant des techniques distribuées et multiagents, de manière à répartir les décisions entre les différents utilisateurs de la constellation. La spécificité découlant de la gestion des exclusions et des exigences de confidentialité des tâches programmées dans les fenêtres exclusives entraîne la nécessité de recourir à des méthodes de résolution distribuées. Si la littérature sur la planification multi-satellite est riche, comme le confirme un récent article de synthèse de travaux récents [11] considérer les constellations de satellites comme des ressources partagées nécessitant la coordination d'utilisateurs multiples

©AFIA2021

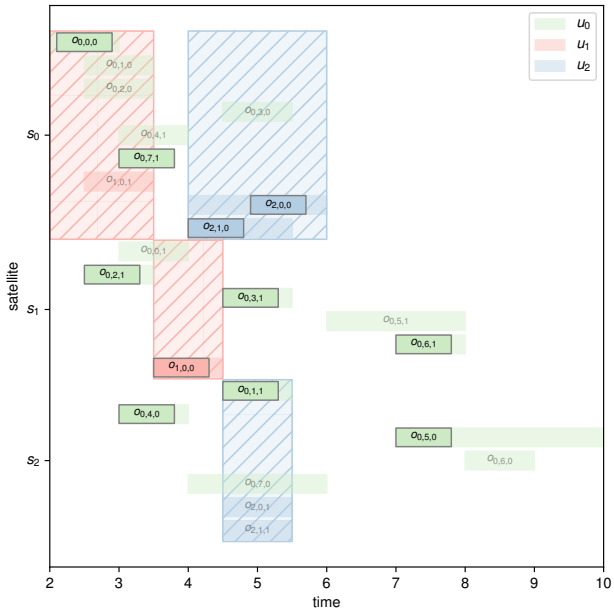


FIGURE 1 – Un exemple avec 3 satellites, 2 utilisateurs (rouge et bleu) avec des exclusives (zones hachées), et 1 utilisateur non exclusif (vert). Les fenêtres de temps d'observation apparaissent comme des surfaces transparentes. Une solution optimale est représentée par des surfaces opaques.

pour la répartition des tâches dans des portions d'orbite exclusives est un problème totalement nouveau, que nous abordons dans cet article.

La section 2 illustre et définit le problème de planification de constellation de satellites d'observation de la Terre (EOSCSP). La section 3 se concentre sur les méthodes de résolution centralisées : un programme linéaire et une approche gloutonne pour EOSCSP. La section 4 expose certaines approches distribuées pour résoudre EOSCSP, en utilisant différents schémas de communication entre les agents-utilisateurs, et la section 5 ajoute la coordination entre les utilisateurs exclusifs en utilisant des techniques d'optimisation distribuée sous contraintes (DCOP). Nous évaluons expérimentalement ces différents algorithmes en utilisant des instances générées de façon aléatoire dans la section 6. Enfin, la section 7 conclut l'article avec quelques perspectives.

2 Le modèle EOSCSP

Cette section illustre le problème que nous étudions à l'aide d'un exemple de scénario, et fournit ensuite quelques définitions de base.

2.1 Scénario illustratif

La figure 1 illustre un scénario, où nous considérons : 3 satellites, chacun ayant une période de planification donnée (par exemple, planification sur la prochaine orbite, ou sur les horizons en fonction des fenêtres de communication entre le satellite et les stations au sol) ; 1 utilisateur u_0 sans portion d'orbite exclusive ; 2 utilisateurs ayant des portions d'orbite exclusives telles que u_1 possède des exclusivités sur le satellite s_0 et sur le satellite s_1 (rouge hachuré), u_2 possède des exclusivités sur le satellite s_0 et sur le satellite s_2 (bleu hachuré) ; plusieurs requêtes à effectuer avant une date d'échéance, noté $r_{i,j}$ pour la $j$ième requête pour l'utilisateur i ; plusieurs possibilités d'observation par requête, notées $o_{i,j,k}$ pour la $k$ième observation de la $j$ième requête du $i$ième utilisateur. Une seule observation doit être planifiée pour répondre à la requête sur des créneaux temporels en fonction des orbites des satellites et de la position des zones d'intérêt (les créneaux sont représentés sous forme de zones transparentes). Plus précisément, nous considérons 2 observations par requête, de sorte que les observations $o_{1,0,0}$ et $o_{1,0,1}$ sont personnelles à u_1 (en rouge), les observations $o_{2,0,0}$, $o_{2,0,1}$, $o_{2,1,0}$ et $o_{2,1,1}$ sont personnelles à u_2 (en bleu), les observations $o_{0,j,k}$ (en vert) sont directement demandées au planificateur central u_0 par d'autres clients sans fenêtre exclusive. La solution de la figure 1, représentée par des observations surlignées, répond à toutes les requêtes, en permettant à l'utilisateur non exclusif u_0 de positionner des observations sur des portions d'orbite exclusives (par exemple $o_{0,0,0}$ sur le satellite s_0) . Une contrainte énergétique simplifiée stipule qu'un satellite ne peut pas effectuer plus de $t_{\max}$ minutes d'observation sur sa période de programmation (ici, un maximum de 4 observations est autorisé par satellite), des temps de transition minimaux entre deux observations o et p, en fonction de o et p et de la date à laquelle la transition est déclenchée sur un satellite donné.

Au niveau global, chaque utilisateur exclusif (u_1 ou u_2) peut avoir son propre système de planification pour gérer ses périodes exclusives, et un système de planification central (u_0, l'opérateur de la constellation) gère les observations $o_{0,j,k}$. En fin de compte, chaque utilisateur et le planificateur central ont un problème de planification local à résoudre. Résoudre ces problèmes séparément peut conduire le planificateur central à ne pas pouvoir réserver de créneaux sur des portions d'orbite exclusives, alors que cela pourrait améliorer la solution. Sans coordination, et avec une gestion non coopérative des créneaux exclusifs, la planification globale pourrait ne pas être optimale, du point de vue du nombre d'observations programmées possibles. Nous proposons donc ici de coordonner les processus de planification entre les utilisateurs.

2.2 Définitions et notations

Présentons maintenant les concepts fondamentaux de ce problème de planification.

Définition 1. Un *problème de planification de la constellation de satellites d'observation de la Terre avec des exclusivités* (ou EOSCSP) est défini par un tuple $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$, tel que $\mathcal{S}$ est un ensemble de satellites, $\mathcal{U}$ est un ensemble d'utilisateurs, $\mathcal{R}$ est un ensemble de requêtes, et $\mathcal{O}$ est un ensemble d'observations à programmer pour répondre aux requêtes de $\mathcal{R}$.

Définition 2. Un *satellite* est défini comme un tuple $s = \langle t_s^{\text{start}}, t_s^{\text{end}}, \kappa_s, \tau_s \rangle$ avec $t_s^{\text{start}} \in \mathbb{R}$ l'heure de début de son plan d'orbite, $t_s^{\text{end}} \in \mathbb{R}$ l'heure de fin de son plan d'orbite, $\kappa_s \in \mathbb{N}^+$ sa capacité (i. e. le nombre maximum d'obser-

vations pendant son plan d'orbite), $\tau_s : \mathcal{O} \times \mathcal{O} \to \mathbb{R}$ la fonction définissant le temps de transition entre deux observations données.

Définition 3. Un *utilisateur* est défini comme un tuple $u = \langle e_u, p_u \rangle$ avec un ensemble (éventuellement vide) de fenêtres temporelles exclusives $e_u = \{(s, (t^{\text{start}}, t^{\text{end}})) \mid s \in \mathcal{S}, [t^{\text{start}}, t^{\text{end}}] \subseteq [t_s^{\text{start}}, t_s^{\text{end}}])\} \subset (\mathcal{S} \times (\mathbb{R} \times \mathbb{R}))$, et une priorité $p_u \in \mathbb{N}^+$ (utilisée en cas de conflit). On note $\mathcal{U}^{\text{ex}}$ (resp. $\mathcal{U}^{\text{nex}}$) l'ensemble des utilisateurs possédant (resp. ne possédant pas) des exclusivités.

Nous supposons ici qu'un seul utilisateur n'a pas de portion d'orbite exclusive : le planificateur central, noté u_0, c'est-à-dire $\mathcal{U}^{\text{nex}} = \{u_0\}$.

Définition 4. Une *requête* est définie comme un tuple $r = \langle t_r^{\text{start}}, t_r^{\text{end}}, \Delta_r, \rho_r, p_r, u_r, \theta_r \rangle$, avec une fenêtre temporelle de validité définie par $t_r^{\text{start}} \in \mathbb{R}$ et $t_r^{\text{end}} \in \mathbb{R}$, une durée $\Delta_r \in \mathbb{R}$, une récompense $\rho_r \in \mathbb{R}$ si r est réalisée, une position GPS pour observer p_r, un émetteur $u_r \in \mathcal{U}$ et une liste $\theta_r \in 2^{\mathcal{O}}$ d'opportunités d'observation pour valider la requête.

θ_r est calculée dynamiquement sur la configuration actuelle de la constellation et la position GPS demandée p_r, puisque plusieurs satellites agiles, en changeant leur orientation peuvent acquérir la même position, générant ainsi plusieurs opportunités d'observation.

Définition 5. Une *observation* est définie comme un tuple $o = \langle t_o^{\text{start}}, t_o^{\text{end}}, \Delta_o, r_o, \rho_o, s_o, u_o, p_o \rangle$, avec une fenêtre temporelle de validité définie par $t_o^{\text{start}} \in \mathbb{R}$ et $t_o^{\text{end}} \in \mathbb{R}$, une requête r_o à laquelle elle contribue, une durée $\Delta_o \in \mathbb{R}$, une récompense $\rho_o \in \mathbb{R}$ (héritée de r_o), un satellite s_o sur lequel cette observation peut être planifiée, un émetteur $u_o \in \mathcal{U}$ (hérité de r_o), et une priorité $p_o \in \mathbb{N}^+$ (héritée de r_o).

Définition 6. Une *solution* à un EOSCSP est une allocation $\mathcal{M} = \{(o, t) \mid o \in \mathcal{O}, t \in [t_o^{\text{start}}, t_o^{\text{end}}]\}$ associant une heure de début à au plus une observation par requête de sorte que les utilisateurs exclusifs aient leurs observations planifiées sur leurs fenêtres exclusives respectives, et que la récompense globale soit maximisée (somme des récompenses des observations planifiées) : $\arg\max_{\mathcal{M}} \sum_{(o,t)\in\mathcal{M}} \rho_o$.

Définition 7. Un *EOSCSP pour l'utilisateur* u, noté $P[u] = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}[u], \mathcal{O}[u] \rangle$ (ou EOSCSP[u]), est un EOSCSP, sous-problème d'un autre EOSCSP $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$ limité aux requêtes et observations appartenant à l'utilisateur u, où $\mathcal{R}[u] = \{r \mid r \in \mathcal{R}, u_r = u\} \subseteq \mathcal{R}$ et $\mathcal{O}[u] = \{o \mid o \in \mathcal{O}, u_o = u\} \subseteq \mathcal{O}$.

Plus généralement, on note $P[x]$ le problème P limité aux seules composantes liées à x, x étant une requête, une observation ou un satellite. Plus tard, nous utiliserons également les notations $P[\emptyset|\mathcal{M}]$ (resp. $P[u_l, \ldots, u_m|\mathcal{M}]$) pour définir le problème (resp. sous-problème pour les utilisateurs $u_l, \ldots, u_m$) étant donné une allocation prédéfinie $\mathcal{M}$ de certaines observations. En outre, nous utiliserons la notation $\overline{P}$ pour désigner le EOSCSP P, où seules les requêtes et les observations relatives qui peuvent être planifiées en dehors de toute fenêtre d'exclusivité sont prises en compte (c'est-à-dire les observations dont les fenêtres temporelles croisent des portions d'orbite non exclusives). Enfin, on note l'union de deux problèmes $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$ et $P' = \langle \mathcal{S}', \mathcal{U}', \mathcal{R}', \mathcal{O}' \rangle$, $P \cup P' = \langle \mathcal{S} \cup \mathcal{S}', \mathcal{U} \cup \mathcal{U}', \mathcal{R} \cup \mathcal{R}', \mathcal{O} \cup \mathcal{O}' \rangle$.

3 Approches centralisées à EOSCSP

Nous présentons ici des approches centralisées pour résoudre EOSCSP. Chaque utilisateur ou planificateur a pour objectif de planifier certaines observations sur les satellites. Ce problème de planification des observations peut être modélisé sous la forme d'un programme linéaire en nombres mixtes (MILP). Les variables de décision sont les suivantes. $x_{s,o} \in \{0, 1\}$ est la décision d'effectuer l'observation o sur le satellite s, $t_{s,o} \in \mathbb{R}$ est la date de début de l'observation o sur le satellite s, $\beta_{s,o,p} \in \{0, 1\}$ est la précédence entre deux observations sur le même satellite, qui est égale à 1 si o est avant p sur s, sinon 0.
Nous définissons donc le programme suivant :

$$\max_{x_{s,o}} \quad \sum_{o\in\mathcal{O}, s\in\mathcal{S}} \rho_o x_{s,o} \tag{1}$$

$$\text{t.q.} \quad \forall s \in \mathcal{S}, \forall r \in \mathcal{R}, \forall o \in \mathcal{O}, \forall p \in \mathcal{O}$$

$$2 - \beta_{s,o,p} - \beta_{s,p,o} \geq x_{s,o} \tag{2}$$

$$2 - \beta_{s,o,p} - \beta_{s,p,o} \geq x_{s,p} \tag{3}$$

$$\beta_{s,o,p} + \beta_{s,p,o} \leq 3 - x_{s,o} - x_{s,p} \tag{4}$$

$$\beta_{s,o,p} + \beta_{s,p,o} \leq 1 \tag{5}$$

$$t_{s,p} - t_{s,o} \geq \tau_s(o, p) + \Delta_o - \Delta_{s,o,p}^{\max} \beta_{s,o,p}, \quad \Delta_{s,o,p}^{\max} > 0 \tag{6}$$

$$t_{s,o} - t_{s,p} \geq \tau_s(p, o) + \Delta_p - \Delta_{s,p,o}^{\max} \beta_{s,p,o}, \quad \Delta_{s,p,o}^{\max} > 0 \tag{7}$$

$$\sum_{o\in\mathcal{O}} x_{s,o} \leq \kappa_s \tag{8}$$

$$\sum_{o\in\theta(r)} x_{s,o} \leq 1 \tag{9}$$

$$x_{s,o} \in \{0, 1\} \tag{10}$$

$$t_{s,o} \in [t_o^{\text{start}}, t_o^{\text{end}}] \subset \mathbb{R} \tag{11}$$

$$\beta_{s,o,p} \in \{0, 1\} \tag{12}$$

$$\text{avec} \quad \Delta_{s,o,p}^{\max} = t_o^{\text{end}} - t_p^{\text{start}} + \Delta_o + \tau^s(o, p)$$

(2) à (7) assurent la précédence des observations et que leur distance est au moins le temps de transition nécessaire sur leur satellite. (8) fait en sorte que le nombre d'observations planifiées sur un satellite ne dépasse pas sa capacité. (9) vérifie qu'au maximum une observation par requête est planifiée. (10) à (12) sont des définitions de domaines. Ce MILP peut être résolu en utilisant des solveurs standards comme CPLEX ou Gurobi, mais ils ne s'adapteront guère à des problèmes de grande taille (par exemple, plus de 100 observations avec 3 satellites et 3 utilisateurs). Pour que les observations des utilisateurs exclusifs aient la priorité sur les observations des utilisateurs non exclusifs, leur récompense doit être fixée à une valeur élevée. Ainsi, le solveur

©AFIA2021

préférera programmer des observations exclusives sur sa fenêtre temporelle plutôt que de planifier une autre observation moins prioritaire. Bien que la solution à ce problème soit optimale, elle exige que chaque utilisateur exclusif *divulgue intégralement les informations sur les requêtes* au planificateur central.

Pour résoudre de plus grands problèmes, une approche consiste à appliquer une allocation gloutonne qui planifie d'abord les observations exclusives des utilisateurs, puis les observations plus urgentes, comme décrit dans l'algorithme 1. En pratique, c'est la technique utilisée par la plupart des opérateurs de satellites/constellations et c'est un étalon classique pour les méthodes de résolution [1, 11]. Pour ce faire, les observations sont triées par ordre croissant selon les critères de priorité et d'heure de début (ligne 2). Ensuite, pour chaque observation de cette liste triée, on trouve le premier créneau libre sur son plan d'orbite de satellite (ligne 4-8). Cet algorithme n'est pas optimal, mais fournit des solutions très rapidement. Cependant, comme pour le MILP, cette solution nécessite de *partager toutes les contraintes et informations* avec un planificateur central.

Algorithme 1 : Solveur greedy

Données : Un EOSCSP $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$
Résultat : Une allocation $\mathcal{M}$

1 $\mathcal{M} \leftarrow \{\}$
2 $\mathcal{O}^{\text{sorted}} \leftarrow \texttt{sort}(\mathcal{O})$
3 $R \leftarrow \{(s, [])\} \mid s \in \mathcal{S}\}$
4 **pour chaque** $o \in \mathcal{O}^{sorted}$ **faire**
5 $\quad t \leftarrow \texttt{first_slot}(o, P, R)$
6 $\quad$ **si** $t \neq \emptyset$ **alors**
7 $\quad\quad \mathcal{M} \leftarrow \mathcal{M} \cup \{(o, t)\}$
8 $\quad\quad \mathcal{O}^{\text{sorted}} \leftarrow \mathcal{O}^{\text{sorted}} \setminus \theta(r_o)$
9 **retourner** S

4 Approches distribuées à EOSCSP

Nous étudions ici les schémas de coordination pour résoudre le problème EOSCSP de manière collective et discutons de la mesure dans laquelle les informations sur les utilisateurs doivent être divulguées pour résoudre le problème EOSCSP.

4.1 Résolution simple par communication d'exclusifs à non-exclusif

Une approche simple pour envisager de résoudre EOSCSP de manière distribuée consiste à mettre en œuvre une version distribuée de l'algorithme glouton susmentionné, où chaque utilisateur exclusif planifie ses observations privées dans ses exclusions, puis le planificateur central rassemble les observations planifiées afin de positionner les observations restantes demandées par les autres utilisateurs. Cette approche est distribuée et rapide, mais les observations des utilisateurs exclusifs doivent être communiqués au planificateur central afin de construire le plan collectif final. L'algorithme 2 esquisse ce processus de résolution distribué, appelé ex2nex. La fonction `solve` est un raccourci vers n'importe quel solveur EOSCSP (par exemple, basé sur le MILP ou glouton) utilisé d'abord par chaque utilisateur exclusif pour obtenir une solution locale (ligne 1), et ensuite par le planificateur central u_0 pour positionner les observations restante avec la connaissance des solutions locales (ligne 2).

Algorithme 2 : Solveur ex2nex

Données : An EOSCSP $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$
Résultat : An assignment $\mathcal{M}$

1 **pour chaque** $u \in \mathcal{U}^{\text{ex}}$ **faire en parallèle**
$\quad \mathcal{M}_u \leftarrow \texttt{solve}(P[u])$
2 **retourner** $solve(P[u_0| \bigcup_{u \in \mathcal{U}^{ex}} \mathcal{M}_u])$

4.2 Résolution simple par communication non-exclusif à exclusifs

Afin de limiter la divulgation des plans des utilisateurs exclusifs, une approche symétrique à ex2nex consiste à considérer que le planificateur central planifie autant d'observations que possible en dehors des fenêtres exclusives, puis à demander aux utilisateurs exclusifs de planifier les observations restantes dans leurs fenêtres respectives (conjointement avec leurs propres observations). Ainsi, les utilisateurs exclusifs ne partagent pas leurs plans, seules les requêtes et observations non exclusives sont partagées avec les utilisateurs exclusifs intéressés. L'algorithme 3 esquisse cette approche, appelée nex2ex. Tout d'abord, le planificateur central positionne les observations non exclusives en dehors des fenêtres exclusives (ligne 1), puis chaque utilisateur exclusif planifie ses propres observations et les observations non exclusives restantes, en fonction des observations déjà planifiées (lignes 2-3). Enfin, le planificateur central rassemble toutes les observations non exclusives planifiées (lignes 4-5). nex2ex a l'avantage de *de sécuriser les informations sur les horaires des utilisateurs exclusifs*. Seules les observations des utilisateurs non exclusifs dont les fenêtres temporelles chevauchent des portions d'orbite exclusives sont partagées par le solveur central. Toutefois, cela peut conduire à des *requêtes surbookées*, c'est-à-dire des requêtes avec plus d'une observation planifiée sur différentes fenêtres exclusives. De plus, la contrainte de respect de la capacité des satellites n'est pas garantie.

Algorithme 3 : Solveur nex2ex

Données : Un EOSCSP $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$
Résultat : Une allocation $\mathcal{M}$

1 $\mathcal{M} \leftarrow \texttt{solve}(\overline{P[u_0]})$
2 **pour chaque** $u \in \mathcal{U}^{\text{ex}}$ **faire en parallèle**
3 $\quad \mathcal{M}_u \leftarrow \texttt{solve}(P[u, u_0|\mathcal{M}])$
4 $\quad \mathcal{M}'_u \leftarrow \{(o, t) \in \mathcal{M}_u | u_o \in \mathcal{U}^{\text{nex}}\}$
$\quad$ `// send` $\mathcal{M}'_u$ `to` u_0
5 **retourner** $\mathcal{M} \cup \bigcup_{u \in \mathcal{U}^{ex}} \mathcal{M}_u$

4.3 Résolution itérative

Pour éviter la surréservation de l'approche nex2ex, on peut considérer l'allocation comme un processus itératif, où les requêtes et les observations ne sont pas considérées par lots, mais une par une et envoyées à certains utilisateurs candidats. Cette approche, que nous appelons itnex2ex, est décrite dans l'algorithme 4.

Algorithme 4 : Solveur itnex2ex

Données : Un EOSCSP $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$
Résultat : Une allocation $\mathcal{M}$

1 $\mathcal{M} \leftarrow \texttt{solve}(\overline{P[u_0]})$
2 $\mathcal{O}^{\text{sorted}} \leftarrow \texttt{sort}(\mathcal{O} \setminus \{o | (o,t) \in \mathcal{M}\})$
3 **pour chaque** $o \in \mathcal{O}^{sorted}$ **faire**
4 **pour chaque** $u \in \texttt{candidates}(o, \mathcal{U}^{ex})$ **faire**
5 $\mathcal{M}_u \leftarrow \texttt{solve}(P[u, u_0 | \mathcal{M}] \cup P[o])$
6 $\mathcal{M}'_u \leftarrow \{(o,t) \in \mathcal{M}_u | u_o \in \mathcal{U}^{\text{nex}}\}$
  // envoyer $\mathcal{M}'_u$ à u_0
7 **retourner** $\mathcal{M} \cup \bigcup_{u \in \mathcal{U}^{ex}} \mathcal{M}'_u$

Comme pour nex2ex, une première solution est obtenue pour les observations qui peuvent être planifiées en dehors des fenêtres exclusives (ligne 1). Ensuite, les observations restantes sont triées, selon l'heure de début, la priorité ou tout autre critère (ligne 2). Cette liste triée est ensuite parcourue, et pour chaque observation, des utilisateurs exclusifs candidats sont choisis (ligne 4). Ce choix peut être arbitraire ou basé sur certains indicateurs comme la récompense ou la probabilité que l'observation soit de bonne qualité (si un tel modèle existe ou peut être appris). Dans cet article, nous allons considérer l'ordre lexicographique arbitraire. Chaque candidat essaie ensuite d'intégrer l'observation dans son plan (ligne 5), et envoie le résultat au planificateur central (ligne 6). Pour améliorer les performances, cela peut se faire en deux étapes : (1) essayer d'ajouter o de manière gloutonne et conservatrice, sans déplacer les observations déjà planifiées de u ; (2) réviser le plan de u pour intégrer o au cas où la première étape échouerait. Cela évite de recalculer le plan de u à chaque o interrogé. Enfin, la solution est construite en agrégeant les sous-solutions provenant d'utilisateurs exclusifs. itnex2ex *empêche la surréservation* par rapport à nex2ex en considérant itérativement certains utilisateurs candidats. La divulgation d'informations est équivalente à nex2ex, mais le calcul est synchrone et ne bénéficie pas de la distribution. Encore une fois, la contrainte de respect de la capacité des satellites n'est pas garantie.

5 Coordination par DCOP

Afin d'améliorer itnex2ex, nous étudions une approche orientée multi-agents et concevons un mécanisme de coopération entre utilisateurs exclusifs pour coordonner la planification.

5.1 À propos des DCOPs

Une façon de modéliser les problèmes de coordination entre agents consiste à les formaliser dans le cadre des problèmes d'optimisation distribuée sous contraintes (DCOP) [7].

Définition 8. Un *problème d'optimisation sous contraintes distribuées* discret (ou DCOP) est un tuple $\langle \mathcal{A}, \mathcal{X}, \mathcal{D}, \mathcal{C}, \mu \rangle$, où : $\mathcal{A} = \{a_1, \ldots, a_{|A|}\}$ est un ensemble d'agents ; $\mathcal{X} = \{x_1, \ldots, x_n\}$ sont des variables appartenant aux agents ; $\mathcal{D} = \{\mathcal{D}_{x_1}, \ldots, \mathcal{D}_{x_n}\}$ est un ensemble de domaines finis, tel que la variable x_i prend ses valeurs dans $\mathcal{D}_{x_i} = \{v_1, \ldots, v_k\}$; $\mathcal{C} = \{c_1, \ldots, c_m\}$ est un ensemble de contraintes, où chaque c_i définit un coût $\in \mathbb{R}^+ \cup \{+\infty\}$ pour chaque combinaison de l'affectation à un sous-ensemble de variables (une contrainte est initialement connue seulement des agents impliqués) ; $\mu : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{A}$ est une fonction associant chaque variable avec l'agent qui la gère ; $f : \prod \mathcal{D}_{x_i} \rightarrow \mathbb{R}$ est un objectif représentant le coût global d'une affectation complète de valeurs aux variables.

Les DCOP ont été largement étudiés et appliqués dans de nombreux domaines de référence [3]. Ils ont de nombreuses des propriétés intéressantes, comme : (i) une approche décentralisée où les agents négocient par des échanges locaux de messages ; (ii) une structuration du domaine (en l'encodant dans des contraintes) pour résoudre des problèmes complexes ; (iii) une grande variété de méthodes de résolution allant des méthodes exactes à des techniques heuristiques ou approchées ; comme, par exemple, ADOPT [6], DPOP [7], MaxSum [2], DSA [12] ou MGM [5], pour ne citer que les plus célèbres.

5.2 Étendre itnex2ex avec des DCOPs

Le problème avec itnex2ex est que la prise en compte itérative des observations (i) nécessite de choisir les candidats et leur ordre, et (ii) empêche d'exploiter la distribution de certains calculs. Nous allons donc examiner ici les requêtes de manière itérative, et laisser les utilisateurs exclusifs se coordonner pour choisir celui qui y répondra en planifiant une observation dans ses fenêtres temporelles exclusives. Ainsi, pour chaque requête provenant du planificateur central u_0, un nouveau DCOP doit être résolu par l'ensemble des utilisateurs exclusifs intéressés, afin de choisir celui qui planifiera ou non une observation. L'algorithme 5 esquisse cette méthode, appelée itnex2ex_DCOP. Tout d'abord, le planificateur central tente de positionner autant d'observations que possible en dehors des fenêtres temporelles exclusives (ligne 1). Les utilisateurs exclusifs résolvent également leur propre sous-problème local simultanément (ligne 2). Ensuite, pour chaque requête r dans la liste ordonnée des requêtes restantes (ligne 3-4), une nouvelle instance DCOP est construite collectivement entre les utilisateurs exclusifs (ligne 5), puis résolue (ligne 6) en utilisant n'importe quel solveur DCOP disponible. Une fois que toutes les requêtes ont été examinées, le planificateur central rassemble les sous-solutions pour construire sa propre solution finale (ligne 7-8).

©AFIA2021

Algorithme 5 : Solveur itnex2ex_DCOP

Données : Un EOSCSP $P = \langle \mathcal{S}, \mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{O} \rangle$
Résultat : Une allocation $\mathcal{M}$

1 $\mathcal{M} \leftarrow \texttt{solve}(\overline{P[u_0]})$
2 **pour chaque** $u \in \mathcal{U}^{ex}$ **faire en parallèle**
  $\mathcal{M}_u \leftarrow \texttt{solve}(P[u])$
3 $\mathcal{R}^{\text{sorted}} \leftarrow \texttt{sort}(\mathcal{R} \setminus \{r | (o,t) \in \mathcal{M}, o \in \theta_r\})$
4 **pour chaque** $r \in \mathcal{R}^{sorted}$ **faire**
5 $p \leftarrow \texttt{build_DCOP}(\theta_r, \mathcal{M}, \mathcal{M}_{u_1}, \ldots, \mathcal{M}_{u_n}, P)$
6 $\mathcal{M}_{u_1}, \ldots, \mathcal{M}_{u_n} \leftarrow \texttt{solve_DCOP}(p)$
7 **pour chaque** $u \in \mathcal{U}^{ex}$ **faire en parallèle**
8 $\mathcal{M}'_u \leftarrow \{(o,t) \in \mathcal{M}_u | u_o \in \mathcal{U}^{\text{nex}}\}$
  // send $\mathcal{M}'_u$ to u_0
9 **retourner** $solve(\overline{P[u_0]} | \mathcal{M} \cup \bigcup_{u \in \mathcal{U}^{ex}} \mathcal{M}_u)$

5.3 Modèle DCOP

Spécifions maintenant l'instance DCOP à construire à la ligne 5 de l'algorithme 5 pour une requête donnée r, et un plan courant $(\mathcal{M}, \mathcal{M}_{u_1}, \ldots, \mathcal{M}_{u_n})$, comme requis dans la définition 8. L'ensemble des agents est l'ensemble des utilisateurs exclusifs qui peuvent potentiellement planifier la requête actuelle r :

$$\mathcal{A} = \{u \in \mathcal{U}^{\text{ex}} | \exists (s, (t_u^{\text{start}}, t_u^{\text{end}})) \in e_u, \exists o \in \theta_r \text{ t.q. } s_o = s, [t_u^{\text{start}}, t_u^{\text{end}}] \cap [t_o^{\text{start}}, t_o^{\text{end}}] \neq \emptyset\} \quad (13)$$

On note $\mathcal{O}[u]^r = \{o \in \theta r | \exists (s, (t_u^{\text{start}}, t_u^{\text{end}})) \in e_u, \text{ t.q. } s_o = s, [t_u^{\text{start}}, t_u^{\text{end}}] \cap [t_o^{\text{start}}, t_o^{\text{end}}] \neq \emptyset\}$ ces observations liées à la requête r qui peuvent être planifiées sur les fenêtres exclusives u.
La fonction μ associe chaque variable $x_{e,o}$ à son propriétaire e.
Les contraintes doivent vérifier qu'au maximum une observation par requête est planifiée (14), que les satellites ne sont pas surchargés (15), et qu'au maximum un agent sert la même observation (16).

$$\sum_{e \in \bigcup_{u \in \mathcal{A}} e_u} x_{e,o} \leq 1, \forall u \in \mathcal{A}, \forall o \in \mathcal{O}[u]^r \quad (14)$$

$$\sum_{o \in \{o \in \mathcal{O}[u]^r | u \in \mathcal{X}, s_o = s\}, e \in \bigcup_{u \in \mathcal{A}} e_u} x_{e,o} \leq \kappa_s^*, \ \forall s \in \mathcal{S} \quad (15)$$

avec κ_s^* la capacité courante du satellite s étant données les observations déjà planifiées $\mathcal{M}, \mathcal{M}_{u_1}, \ldots, \mathcal{M}_{u_n}$.

$$\sum_{e \in \bigcup_{u \in \mathcal{A}} e_u} x_{e,o} \leq 1, \quad \forall o \in \mathcal{O} \quad (16)$$

En outre, le coût de l'intégration d'une observation dans l'emploi du temps de l'utilisateur actuel doit être évalué pour guider le processus d'optimisation. Nous ajoutons donc une contrainte souple à chaque $x_{e,o}$:

$$c(x_{e,o}) = \pi(o, \mathcal{M}_{u_o}), \quad \forall x_{e,o} \in \mathcal{X} \quad (17)$$

où π évalue le meilleur coût obtenu lors de la planification de o et toute combinaison d'observations de $\mathcal{M}_{u_o}$, afin de prendre en compte toutes les révisions possibles du plan actuel de u_o. En pratique, au lieu de calculer π à chaque fois, une compilation des contraintes peut être utilisée pour évaluer toutes ces combinaisons une seule fois. En pratique, le coût de chaque alternative parmi cet ensemble de taille exponentielle est calculé à l'aide d'un algorithme glouton polynomial.
Pour résumer, l'ensemble des contraintes du DCOP relatif à la requête r est :

$$\mathcal{C} = \{(14), (15), (16), (17)\} \quad (18)$$

6 Évaluation expérimentale

Les expérimentations visent à analyser les performances des algorithmes étudiés avec un nombre croissant de requêtes (et donc d'observations). Elles ont été développées en Python 3.7 et exécutées sur un processeur Intel(R) Xeon(R) E5-2660 v3 à 20 cœurs à 2,60 GHz et 62 Go RAM sous Ubuntu 18.04.5 LTS. Nous avons exécuté 30 instances d'EOSCSP générées de manière aléatoire avec une graine dans [0 :29] pour chaque taille de problème, et nous avons tracé la moyenne, avec un intervalle de confiance [0.05, 0.95]. La procédure `solve` utilisée dans ex2nex, nex2ex, itnex2ex et itnex2ex_DCOP est l'algorithme glouton greedy. L'algorithme DCOP utilisé par itnex2ex_DCOP est l'implémentation de DPOP [7] présente dans pyDCOP [8]. Les valeurs générées de manière aléatoire sont choisies uniformément dans les intervalles fournis.

6.1 Problèmes fortement conflictuels

Nous évaluons les algorithmes sur des problèmes très conflictuels à petite échelle (horizon de planification de 5 min). Cette conflictualité provient du faible nombre de fenêtres exclusives sur lesquelle la plupart des requêtes non exclusives peuvent être positionnées, car chaque requête est associée à 10 ooportunités. Les utlisateurs exclusifs auront donc beaucoup de décisions coordonnées à effectuer. Nous générons des EOSCSP avec 3 satellites d'une capacité de 20 observations, 4 utilisateurs exclusifs émettant 2 à 20 requêtes chacun, 8 portions exclusives chacun d'une durée aléatoire dans [15 :20], un planificateur central émettant 8 à 80 requêtes, 10 opportunités d'observation par requête d'une durée égale à 5 qui peuvent être planifiées dans une fenêtre de temps d'une durée dans [10 :20], et une récompense dans [10 :50 :10] pour un utilisateur exclusif, et dans [1 :5] pour le planificateur central. La fenêtre temporelle des satellites est [0, 300]. Les temps de transition entre les observations sont uniformément égaux à 1. Les fenêtres exclusives sont positionnées de manière aléatoire, tout en veillant à ce qu'elles ne se chevauchent pas. Les fenêtres temporelles d'observation sont positionnées de manière aléatoire, de manière à garantir qu'elles sont soit incluses dans une fenêtre exclusive, soit en dehors de toute fenêtre exclusive. Il y a beaucoup de chevauchements d'observations, et autant de requêtes provenant du planificateur central que toutes les requêtes des utilisateurs exclusifs.

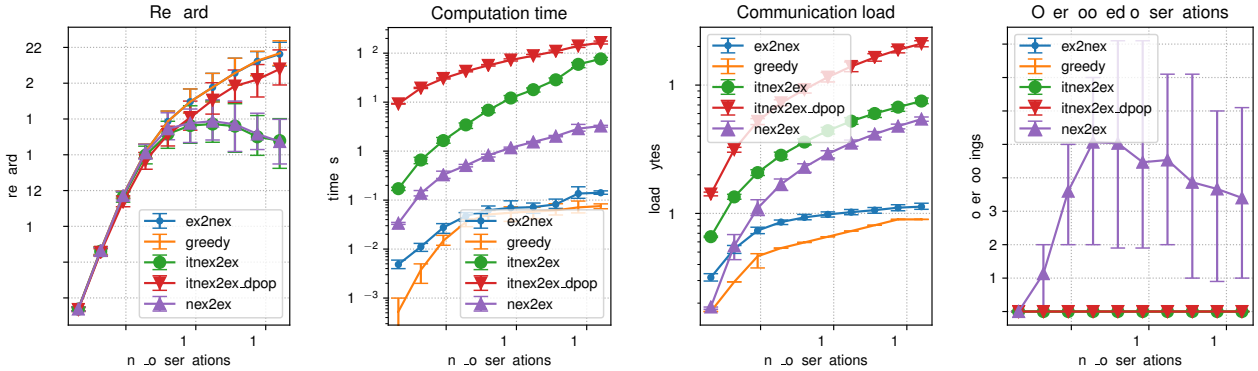


FIGURE 2 – Résultats des algorithmes étudiés sur des problèmes fortement conflictuels de petite taille.

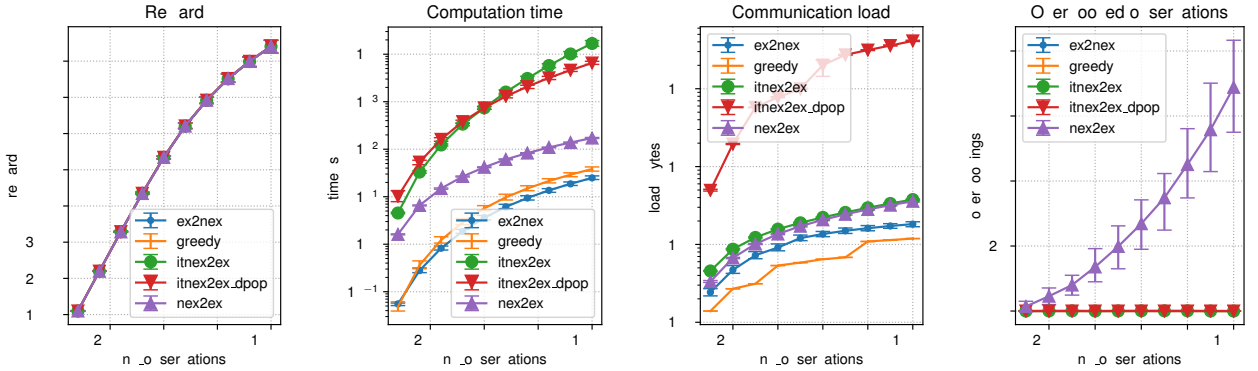


FIGURE 3 – Résultats des algorithmes étudiés sur des problèmes réalistes de grande taille.

La figure 2 montre les résultats pour cette configuration. En ce qui concerne les récompenses, itnex2ex_dpop offre des performances légèrement en-deça (environ 5.6%) des approches sans privacité (greedy et ex2nex). Les autres algorithmes avec privacité (nex2ex et itnex2ex) affichent des performances se dégradant avec une augmentation du nombre de requêtes. Ceci est dû au manque de coordination qui implique une augmentation du nombre de surbookings et de surcharge des satellites. Lorsque de tels cas surviennent, les observations en question sont retirées du plan, et donc les récompenses sont réduites. Les performances de itnex2ex_dpop sont au prix d'un temps de calcul supplémentaire, tout en restant raisonnable, contrairement à un solveur MILP (par exemple, CPLEX) qui ne peut pas résoudre les instances avec plus de 100 observations (non affiché ici). Le temps de calcul plus élevé de itnex2ex_dpop résulte de la fonction de pré-calcul π et de la procédure de résolution DPOP sous-jacente. itnex2ex_dpop génère une charge de communication supplémentaire (environ 100kB pour les instances les plus grandes) en raison du processus itératif et de l'échange de messages DPOP. En résumé, itnex2ex_dpop est un candidat pertinent qui fournit de bonnes solutions sans divulguer d'informations sur les utilisateurs exclusifs.

6.2 Problèmes réalistes

Ici, nous générons des EOSCSP de grande taille, avec des paramètres réalistes, dans le respect des carnets de commande fournis par nos partenaires, pour programmer des milliers d'observations dans un horizon de planification de 6 heures. Nous générons des instances comme précédemment mais avec 8 satellites d'une capacité de 500 observations, 5 utilisateurs exclusifs avec 10 à 150 requêtes chacun, 10 portions d'orbite exclusives chacun d'une durée dans [300 :600], 1 planificateur central avec 500 à 1000 requêtes, 5 opportunités d'observation par requête d'une durée égale à 20 qui peuvent être planifiées dans une fenêtre de temps d'une durée dans [40 :60]. L'horizon de planification est [0, 21600].

La figure 3 montre les résultats pour ce paramètrage. Tous les algorithmes fournissent des solutions de bonne qualité, équivalentes à greedy, sauf nex2ex qui est environ 1,5% en dessous. ex2nex fournit même des résultats légèrement plus rapidement que greedy. Au niveau du temps de calcul, tous les algorithmes restent en dessous de 180 minutes de calcul, ce qui permet de les utiliser entre chaque fenêtre de planification (planifier les 6 heures suivantes pendant que le plan actuel de 6 heures est exécuté), même avec un code Python non entièrement optimisé. Dans ce contexte, itnex2ex_dpop est la meilleure approche pour fournir de bonnes solutions sans divulguer les informations des utilisateurs exclusifs, mais nécessite l'échange de 30 Mo pour des instances plus grandes. Ces instances ne sont pas trop conflictuelles, ce qui explique la progression quasi-linéaire de la récompense avec l'augmentation du nombre de re-

©AFIA2021

quêtes. Cependant, les carnets de commande des années à venir devraient être de plus en plus conflictuels en raison du nombre croissant de clients de constellations EOS. Dans un tel cas, itnex2ex_dpop devient encore plus pertinent.

7 Conclusions

Ce papier étudie pour la première fois l'utilisation de techniques distribuées et multi-agents pour résoudre le nouveau EOSCSP, en gardant à l'esprit la nécessité de limiter la divulgation d'informations entre les utilisateurs. Nous avons défini les composantes essentielles de l'EOSCSP et proposé un codage MILP simple pour résoudre de manière optimale ces problèmes. Ce système est malheureusement inutilisable dans la pratique, même seulement sur de petites instances. Nous avons donc proposé un algorithme glouton et rapide pour résoudre l'EOSCSP. Nous avons conçu plusieurs algorithmes distribués (ex2nex, nex2ex, itnex2ex et itnex2ex_dcop) avec différentes propriétés, notamment concernant la divulgation d'informations. itnex2ex_dcop offre des solutions équivalentes aux meilleurs algorithmes sur des problèmes très conflictuels, tout en préservant la confidentialité des informations d'observation des utilisateurs exclusifs. Ceci est dû au schéma de communication et à l'utilisation de DCOPs pour coordonner les utilisateurs exclusifs lorsqu'ils décident des observations à planifier. Cela a un coût : une charge de communication et un temps de calcul plus élevés pour évaluer la récompense que représente l'intégration d'une observation dans un plan donné. Pourtant, cette technique est entièrement distribuable et peut tirer profit d'une exécution simultanée. Sur des problèmes réalistes à grande échelle, la qualité de la solution est également bonne, bien que ces problèmes nécessitent moins de coordination car la probabilité de chevauchement des observations est plus faible. Les instances DPOP impliquent toujours de nombreuses observations d'utilisateurs exclusifs, ce qui rend le calcul de la fonction d'évaluation π et l'exécution de DPOP encore coûteux.

Ce travail nous permet d'identifier plusieurs perspectives, notamment le développement de solveurs DCOP dédiés et adaptés à la spécificité des EOSCSP, par exemple l'utilisation de la fonction d'évaluation π, qui peut résulter d'un processus d'apprentissage, au lieu d'une évaluation systématique de chaque alternative. Deuxièmement, nous envisageons de considérer un EOSCSP comme un problème d'optimisation de consensus où les utilisateurs exclusifs et le planificateur central se coordonnent en utilisant des méthodes de décomposition duale pour converger vers un accord sur la planification des observations. Enfin, nous travaillons actuellement à l'intégration des incertitudes sur le succès des observations dans le processus de décision.

Remerciements

Ces travaux ont été menés grâce au financement du gouvernement français dans le contexte du Programme d'Investissements d'Avenir, au travers du projet BPI PSPC "LiChIE" coordonné par Airbus Defence and Space.

Références

[1] Doo-Hyun Cho, Jun-Hong Kim, Han-Lim Choi, and Jaemyung Ahn. Optimization-based scheduling method for agile earth-observing satellite constellation. *Journal of Aerospace Information Systems*, 15(11) :611–626, 2018.

[2] A. Farinelli, A. Rogers, A. Petcu, and N. R. Jennings. Decentralised coordination of low-power embedded devices using the max-sum algorithm. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'08)*, pages 639–646, 2008.

[3] F. Fioretto, E. Pontelli, and W. Yeoh. Distributed constraint optimization problems and applications : A survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 61 :623–698, 2018.

[4] M. Lemaître, G. Verfaillie, F. Jouhaud, J.-M. Lachiver, and N. Bataille. Selecting and scheduling observations of agile satellites. *Aerospace Science and Technology*, 6(5) :367 – 381, 2002.

[5] R.T. Maheswaran, J.P. Pearce, and M. Tambe. Distributed algorithms for dcop : A graphical-game-based approach. In *Proceedings of the 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems (PDCS)*, pages 432–439, 2004.

[6] P.J. Modi, W. Shen, M. Tambe, and M. Yokoo. ADOPT : Asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees. *Artificial Intelligence Journal*, 2005.

[7] 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.

[8] Pierre Rust, Gauthier Picard, and Fano Ramparany. pyDCOP, a DCOP library for IoT and dynamic systems. In *International Workshop on Optimisation in Multi-Agent Systems (OptMAS@AAMAS 2019)*, 2019.

[9] Vishwa Shah, Vivek Vittaldev, Leon Stepan, and Cyrus Foster. Scheduling the world's largest earth-observing fleet of medium-resolution imaging satellites. *IWPSS*, 2019.

[10] J. G. Walker. Satellite Constellations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 37 :559, 1984.

[11] Xinwei Wang, Guohua Wu, Lining Xing, and Witold Pedrycz. Agile earth observation satellite scheduling over 20 years : formulations, methods and future directions. *CoRR*, abs/2003.06169, 2020.

[12] 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, January 2005.

Explicit Representations of Persistency for Propositional Action Theories

Sergej Scheck Alexandre Niveau Bruno Zanuttini

Normandie Univ.; UNICAEN, ENSICAEN, CNRS, GREYC, 14000 Caen, France

sergej.scheck,alexandre.niveau,bruno.zanuttini@unicaen.fr

Résumé

Nous envisageons d'enrichir la représentation des actions en logique propositionnelle par des opérateurs syntaxiques pour représenter la persistance des variables. Ceci est motivé par le fait que le problème du cadre n'est pas résolu de manière satisfaisante par les langages propositionnels, tels que les diagrammes de décision binaires ou DNF. Nous introduisons deux de ces opérateurs, permettant de représenter différents types de persistance, et considérons les langages obtenus à partir de la logique propositionnelle en les ajoutant à n'importe quel niveau d'imbrication. Nous étudions les langages résultantes du point de vue de leur concision relative et de la complexité de la décision de successeur. Nous montrons une image intéressante de divers résultats de complexité.

Mots Clef

Planification, compilation de connaissances, théories d'actions, persistance, problème du cadre, circonscription

Abstract

We consider enriching the representation of actions in propositional logic by syntactic operators for representing the persistency of variables. This is motivated by the fact that the frame problem is not satisfactorily solved by propositional languages, such as binary decision diagrams or DNF. We introduce two such operators, allowing to represent different kinds of persistency, and consider the languages obtained from propositional logic by adding them at any level of nesting. We study the resulting languages from the point of view of their relative succinctness and the complexity of deciding successorship. We show an interesting picture of diverse complexity results.

Keywords

Planning, knowledge compilation, action theories, persistency, frame problem, circumscription

1 Introduction

In automated planning, a central aspect of the description of problems is the formal representation of actions. Such representations are needed for specifying the available actions, and for the planners to operate on them while computing a plan. **PDDL** [15] is a standard language for this. More generally, the formal representation of actions is central to reasoning about actions, programs, and change using logic. Frameworks for this include proposals as diverse as the Situation Calculus [18], the Event Calculus [13], **PDL** [9], **DL-PA** [3], and many others.

We view such languages as either *imperative* or *declarative*. Declarative languages allow one to specify the properties of situations, actions, events, while imperative languages concentrate on how the effects are brought about. In this view, the Situation and Event Calculi are declarative, as well as **PDL**, while **PDDL** and **DL-PA** are imperative.

On the other hand, a well-known question when representing action and change is how to succinctly specify the *non-effects* of actions, that is, to ensure that the specification precludes fluents to change value while this is not intended. This is known as the *frame problem*. While imperative languages naturally come with a solution to the frame problem, because operational semantics literally transform a situation into another one, the frame problem is crucial in declarative languages, and it has been thoroughly studied, in particular for the Situation Calculus [18].

We are interested here in the frame problem for actions specified in the simple language of *propositional action theories*, that is, as Boolean formulas describing the possible combinations of values for fluents *before* and *after* the action is taken. Though this language is very simple, it is indeed used in automated planning, because it makes operations on sets of states (aka *belief states*) conceptually simple [6, 5, 20].

We consider action theories represented in Negation Normal Form (NNF), which encompasses representations usually used like ordered binary decision diagrams or formulas in disjunctive normal form. Such theories are adequate for representing (purely) nondeterministic actions, which lie at the core of fully observable nondeterministic planning and conformant planning [19, 1, 10, 16, 20, 11]. Our contribution is to propose two different operators for representing the persistency of fluents, and to consider the language of NNF actions theories as enriched by one or the other. The originality of this contribution lies in the facts that (i) the language is *enriched* with an operator, which, we argue, allows one to specify the persistency of variables more naturally and succinctly than expressions in the plain underly-

 ©AFIA2021

ing logic (like successor-state axioms for the Situation Calculus), and (ii) we allow the operators to occur anywhere in the formula, including nested occurrences, which again facilitates the description of actions.
Our operators are one whose interpretation is dependent on the *syntax* of the action in its scope, and one whose interpretation depends only on its semantics (as a relation between the states before and after the action). The "semantic" one corresponds to interpreting the action in its scope under *circumscription* [14], here used as a semantics of minimal change through the action.
We consider the resulting extensions of the language of NNF action theories in the formal framework of the knowledge compilation map [7]. This framework deals with the study of formal languages under the point of view of queries (how efficient is it to answer various queries depending on the language?), transformations (how efficient is it to transform or combine different representations in a given language?), and succinctness (how concise is it to represent knowledge in each language?). We focus on queries related to automated planning (deciding whether the action can lead from a state to another one, whether it is applicable at some state) and on succinctness issues.
Naturally, there is a tradeoff between tractability of queries and succinctness of the languages. We give a complete picture for the languages which we consider. Precisely, we show that the syntactic operator can be added to NNF action theories without changing complexity of queries nor succinctness, since it can be compiled away in polynomial time; this shows that actions can be specified in the richer language without harming further calculations. On the other hand, we show that the semantic operator yields a more succinct language when allowed only at the root of expressions, and even more succinct when allowed everywhere, but that the complexity of answering queries increases accordingly.

2 Preliminaries

We consider a countable set of propositional *state* variables $\mathbb{P} = \{p_i \mid i \in \mathbb{N}\}$. Let $P \subset \mathbb{P}$ be a finite set of state variables; a subset of P is called a *P-state*, or simply a *state*. The intended interpretation of a state $s \in 2^P$ is the assignment to P in which all variables in s are true, and all variables in $P \setminus s$ are false. For instance, for $P = \{p_1, p_2, p_3\}$, $s = \{p_1, p_3\}$ denotes the state in which p_1, p_3 are true and p_2 is false. We write $\mathrm{V}(\varphi)$ for the set of variables occuring in an expression φ; note that expressions may involve both variables in $\mathbb{P}$ and variables not in $\mathbb{P}$, so in general we do *not* have $\mathrm{V}(\varphi) \subseteq \mathbb{P}$.

Actions We consider (purely) nondeterministic actions, *i.e.*, actions with which a single state may have several successors.

Definition 1. Let $P \subset \mathbb{P}$ be a finite set of variables. A *P-action* is a mapping a from 2^P to $2^{(2^P)}$. The states in $a(s)$ are called *a-successors* of s.

Note that $a(s)$ is defined for all states s. We will consider a to be *applicable* in s if and only if $a(s) \neq \emptyset$ holds.

Definition 2. An *action language* is an ordered pair $\langle L, I\rangle$, where L is a set of expressions and I is a partial function on $L \times 2^{\mathbb{P}}$ such that, when defined for $\alpha \in L$ and $P \subset \mathbb{P}$, $I(\alpha, P)$ is a P-action.

We call the expressions in L *action descriptions*, and call I the *interpretation function* of the language. Observe that those sets P's such that $I(\alpha, P)$ is defined are *a priori* not related to $\mathrm{V}(\alpha)$; α may involve auxiliary variables (not in $\mathbb{P}$) which are not part of the state descriptions, and dually, a state may assign variables of $\mathbb{P}$ which do not occur in α. If L, I, P are fixed or clear from the context, then we write $\alpha(s)$ instead of $I(\alpha, P)(s)$ for the set of all α-successors of s. In this case we call P the *scope* of α. In this article we will consider action descriptions α which are intendedly constructed to ensure that $I(\alpha, P)$ is defined.

Definition 3. A *translation* from an action language $\langle L_1, I_1\rangle$ to another language $\langle L_2, I_2\rangle$ is a function $f : L_1 \times 2^{\mathbb{P}} \to L_2$ satisfying $I_1(\alpha, P) = I_2(f(\alpha, P), P)$ for all $\alpha \in L_1$ and $P \subset \mathbb{P}$ such that $I_1(\alpha, P)$ is defined.

In words, this means that the L_1-expression α and the L_2-expression $f(\alpha, P)$ describe the same P-action. Again, when P is clear from the context, we write $f(\alpha)$ for $f(\alpha, P)$. The translation f is said to be *polynomial-time* if it can be computed in time polynomial in the size of α and P, and *polynomial-size* if the size of $f(\alpha, P)$ is bounded by a fixed polynomial in the size of α and P. Clearly, a polynomial-time translation is necessarily also a polynomial-size one, but the converse is not true in general.

Logic A Boolean formula φ over a set Q of variables is in *negation normal form* (NNF) if it is built up from literals using conjunctions and disjunctions, *i.e.*, if it is generated by the grammar $\varphi ::= q \mid \neg q \mid \varphi \wedge \varphi \mid \varphi \vee \varphi$, where q ranges over Q. Similarly to other expressions, Q may involve state variables (in $\mathbb{P}$) and other variables (not in $\mathbb{P}$).
It is important to note that a formula φ with $\mathrm{V}(\varphi) \subseteq Q$ for some set of variables Q can be viewed as a formula over Q (and the truth value of the corresponding Boolean function does not depend on the variables in $Q \setminus \mathrm{V}(\varphi)$). For a Boolean formula φ over Q and an assignment t to the variables in Q, we write $t \models \varphi$ if φ evaluates to true under the assignment t.
For readability, we sometimes use the symbols $\leftrightarrow$ and $\rightarrow$ in Boolean formulas and still call them **NNF** formulas. Indeed, it will always be the case that there are equivalent **NNF** formulas of the same size, up to a polynomial.
We always use notation $s, t, \ldots$ for states, $\alpha, \beta, \ldots$ for action descriptions, and $\varphi, \psi, \ldots$ for logical formulas.

Action theories We define the action language of (NNF) action theories, whose extensions we are going to study. To prepare the definition we associate an auxiliary variable

$p' \notin \mathbb{P}$ to each variable $p \in \mathbb{P}$; p' denotes the value of p *after* the action took place, while p denotes the value *before*.

Definition 4. An **NNFAT** *action description* is a Boolean formula α in NNF over $P_\alpha \cup \{p' \mid p \in P_\alpha\}$ for some set of state propositions $P_\alpha \subset \mathbb{P}$. The interpretation of an **NNFAT** action description α is defined for all $P \subseteq \mathbb{P}$ such that $P \supseteq \mathrm{V}(\alpha) \cap \mathbb{P}$ (that is, when all state propositions have a value) by

$$\forall s \subseteq P\colon\ I(\alpha, P)(s) = \{s' \mid (s, s') \models \alpha\}$$

where $(s, s') := s \cup \{p' \mid p \in s'\}$ is the assignment to $P \cup \{p' \mid p \in P_\alpha\}$ induced by s, s'. For $P \not\supseteq \mathrm{V}(\alpha) \cap \mathbb{P}$, $I(\alpha, P)$ is not defined. In words, an **NNFAT** expression represents the set of all ordered pairs $\langle s, s' \rangle$ such that s' is a successor of s, as a Boolean formula over variables in $\mathbb{P} \cup \{p' \mid p \in \mathbb{P}\}$.
Importantly, **NNFAT** does not assume persistency of values, so that if, for example, a variable does not appear at all in an **NNFAT** expression, then this means that its value after the execution of the action can be arbitrary.

Example 5. Let $P = \{p_1, p_2, p_3\}$, $s_1 = \emptyset$, $s_2 = \{p_1\}$, and $\alpha := p_1 \vee (p_1' \wedge p_2')$, which can be read "when p_1 is false before the action is taken, both p_1 and p_2 become true after the action, and when p_1 is true anything can occur". Then $\alpha(s_1) = \{\{p_1, p_2\}, \{p_1, p_2, p_3\}\}$, and $\alpha(s_2) = 2^P$.

Circuit representation Since we study the succinctness of languages, it is crucial to define the *size* of action descriptions. For this we use the same setting as typically used in knowledge compilation studies about propositional logic [7], and assume that all action descriptions α are represented by the directed acyclic graph, or *circuit*, obtained from the syntactic tree of α by iteratively identifying the roots of two isomorphic subexpressions to each other, until no more reduction is possible (like for binary decision diagrams [4]). Clearly, for all expressions α, the circuit associated to α in this manner is unique, and it can be computed in polynomial time from the plain expression or from a nonreduced circuit.

3 Frame operators

Our proposal is to enrich **NNFAT** with operators for expressing persistency of variable values. Operators in action languages are used to construct new action descriptions from existing ones, and they can be roughly divided into two types: the interpretation of a *syntactic* operator depends on its argument action descriptions, while that of a *semantic* operator depends on the actions but not on their description.
It is important to recall that **NNF** is a complete language for propositional logic and hence, that **NNFAT** is able to express any action. As a consequence, by *enriching* **NNFAT** we mean providing languages in which it is more convenient to express actions, as we will illustrate, but there is no action which those enriched languages can encode, that **NNFAT** cannot encode itself.

Semantic frame operator The semantic frame operator which we study builds on *circumscription* [14], which is a nonmonotonic semantics for formulas enforcing a form of closed-world assumption, and especially by *propositional* circumscription [8, 17]. However, by introducing an *operator* for this interpretation, we allow circumscription to be enforced only on some parts of an expression.
Let α be an action description and s be a P-state. For all partitions $\{X, V, F\}$ of P, we introduce the operator $\mathsf{C}_{X,V,F}$ so that $\mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha)(s)$ chooses those α-successors of s which change variables from X minimally among all states with the same values over F.
Precisely, we define a state s' to be *preferred* to a state s'' with respect to a state s and to X, V, F, which we write $s' \prec^s_{X,V,F} s''$, if $s' \cap F = s'' \cap F$ and $(s''\Delta s) \cap X \subset (s'\Delta s) \cap X$ hold, where Δ denotes symmetric difference for sets.[1]

Definition 6. The action language $\mathbf{NNFAT_C}$ is the language $\langle L_{\mathbf{C}}, I_{\mathbf{C}} \rangle$, where the expressions with scope P in $L_{\mathbf{C}}$ are defined by the grammar

$$\alpha ::= p \mid p' \mid \neg p \mid \neg p' \mid \alpha \wedge \alpha \mid \alpha \vee \alpha \mid \mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha),$$

where p ranges over P and $\langle X, V, F \rangle$ over partitions of P, and $I_{\mathbf{C}}$ is defined as for **NNFAT**, extended with

$$I_{\mathbf{C}}(\mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha), P)(s) = \{s' \in I_{\mathbf{C}}(\alpha, P)(s) \mid \nexists s'' \in I_{\mathbf{C}}(\alpha, P)(s) : s'' \prec^s_{X,V,F} s'\}$$

Example 7. Let $P = \{p_1, \ldots, p_5\}$, $X = \{p_1, p_2\}$, $V = \{p_3\}$, and $F = \{p_4, p_5\}$. Let $\alpha = (p_1' \vee p_3') \wedge (p_2' \vee p_4') \wedge (p_5')$ and $s = \emptyset$. Then $\{p_1, p_2, p_5\}$ is an α-successor, but not a $\mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha)$-successor, of s, because $s'' = \{p_2, p_3, p_5\}$ is also an α-successor of s with $s'' \cap F = \{p_5\} = s' \cap F$ and $(s''\Delta s) \cap X = \{p_2\} \subset \{p_1, p_2\} = (s'\Delta s) \cap X$. On the other hand, s'' is a $\mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha)$-successor of s even though $s''' = \{p_3, p_4, p_5\}$ changes fewer values over X, since s'' and s''' differ over F and hence are incomparable with each other.

It can be seen that the $\mathsf{C}_{X,V,F}$ operator is convenient in particular for expressing actions which involve external causes (to be put in the set F) of changes of values for variables of interest (set X), in the presence of ramifications (set V).

Example 8. Consider encoding the action of driving from work to home. A particularly succinct description is

$$\mathsf{C}_{\{\mathsf{home}\},\{\mathsf{at_work}\},\{\mathsf{flat_tire},\mathsf{engine_ok}\}} \Big((\mathsf{engine_ok}' \wedge \neg \mathsf{flat_tire}') \rightarrow \mathsf{home}') \wedge (\mathsf{home}' \leftrightarrow \neg \mathsf{at_work}') \Big)$$

Consider $s = \{\mathsf{engine_ok}, \mathsf{at_work}\}$. Minimization of change over $\{\mathsf{home}\}$ entails that when the causes are not met (for instance, when $\mathsf{engine_ok}'$ is false), among the possible successors of s only the ones with $\neg\mathsf{home}'$ are retained, ignoring the ramification $\mathsf{at_work}'$; successors with

[1] As mnemonics, variables in V may vary; those in F are fixed.

©AFIA2021

home' are not retained, reflecting the fact that there is no "proof" provided by the action that home should change value. On the other hand, due to their presence in the set F, all combinations of causes will be retained. Precisely, the successors of s are $\{\mathsf{engine_ok}, \mathsf{at_work}, \mathsf{flat_tire}\}$, $\{\mathsf{at_work}\}$, $\{\mathsf{at_work}, \mathsf{flat_tire}\}$, and $\{\mathsf{engine_ok}, \mathsf{home}\}$.

Syntactic frame operator We now define a *syntactic* operator, for representing the notion of persistency of languages like **PDDL**, where a variable does not change value if there is no *explicit* reason for this. Concretely, we want an operator F such that $\{p\}$ is an $\mathsf{F}(p' \vee \neg p')$-successor of $s = \emptyset$, but not an $\mathsf{F}(q' \vee \neg q')$-successor for $q \neq p$, although $p' \vee \neg p'$ describes the same action as $q' \vee \neg q'$. Therefore we need to formalize the intuition that some change is "explicitly mentioned" in an action description.

For this, we refine the notion of successor by considering the *effects* which apply in a state, themselves decomposed into *explicit* and *implicit* effects.

Definition 9. An *effect* (over $P \subseteq \mathbb{P}$) is a quadruple $\langle e^+, e^-, i^+, i^- \rangle$ such that e^+, e^-, i^+, i^- are pairwise disjoint subsets of P. The *explicit* (resp. *implicit*) part of such an effect is the pair $\langle e^+, e^- \rangle$ (resp. $\langle i^+, i^- \rangle$).

The positive ($e^+ \cup e^-$) and negative ($e^- \cup i^-$) are similar to add- and del-lists in STRIPS: $\langle e^+, e^-, i^+, i^- \rangle$ provokes a transition from a state s to $s' = (s' \cup e^+ \cup i^+) \setminus (e^- \cup i^-)$.

We now define effects for **NNFAT** action descriptions. For combinations of effects via $\wedge$, let $\varepsilon_1 = \langle e_1^+, e_1^-, i_1^+, i_1^- \rangle$ and $\varepsilon_2 = \langle e_2^+, e_2^-, i_2^+, i_2^- \rangle$. If $e_1^+ \cup i_1^+ = e_2^+ \cup i_2^+$ holds then we write $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ and set $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 := \langle e_1^+ \cup e_2^+, e_1^- \cup e_2^-, i_1^+ \cap i_1^-, i_2^+ \cap i_2^- \rangle$. Intuitively, $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ means that they provoke exactly the same transitions, but possibly with different explicit/implicit changes, and $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ is the effect which makes explicit any change which is explicit in one of them.

Definition 10. Let α be an **NNFAT** action description and s be a state. Then the set of *effects* of α in s, written $\mathrm{E}(\alpha, s)$, is defined inductively by

$$\mathrm{E}(p, s) = \{\langle \emptyset, \emptyset, A, B \rangle \mid A, B \subseteq P\} \text{ for } s \models p,$$
$$\mathrm{E}(p, s) = \emptyset \text{ for } s \not\models p;$$
$$\text{and dually for } \mathrm{E}(\neg p, s)$$

$$\mathrm{E}(p', s) = \begin{array}{l} \{\langle \emptyset, \emptyset, A, B \rangle \mid A, B \subseteq P \setminus \{p\}\} \\ \cup \{\langle \{p\}, \emptyset, A, B \rangle \mid A, B \subseteq P \setminus \{p\}\} \end{array} \quad \text{for } s \models p,$$
$$\mathrm{E}(p', s) = \{\langle \{p\}, \emptyset, A, B \rangle \mid A, B \subseteq P \setminus \{p\}\} \text{ for } s \not\models p;$$
$$\text{and dually for } \mathrm{E}(\neg p', s)$$

$$\mathrm{E}(\alpha_1 \wedge \alpha_2, s)$$
$$= \{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \mid \varepsilon_1 \in \mathrm{E}(\alpha_1, s), \varepsilon_2 \in \mathrm{E}(\alpha_2, s), \varepsilon_1 \approx \varepsilon_2\};$$

$$\mathrm{E}(\alpha_1 \vee \alpha_2, s) = \mathrm{E}(\alpha_1, s) \cup \mathrm{E}(\alpha_2, s) \cup \mathrm{E}(\alpha_1 \wedge \alpha_2, s).$$

where A, B are always disjoint from each other.

Intuitively, the first case says that the action p is not applicable if s does not satisfy p (second line), and otherwise imposes no constraint on the successor state, but moreover does not set any value *explicitly*: a transition may occur from, say, $\{p, q\}$ to $\{r\}$, but then the positive effects $A = \{r\}$ and negative effects $B = \{p, q\}$ are considered to be *implicit*.

For atomic actions of the form p', we distinguish two cases. When s does not already satisfy p, then all effects of p' *explicitly* set p. Constrastingly, when s already satisfies p, then the action p' leaves the value unchanged, and we include both effects with an explicit setting of p (to the same value) and effects with no setting of p at all (neither implicit nor explicit). Of course, for fixed A, B, those two effects provoke a transition from s to the same successor s'. Nevertheless, including the effects which do not set p at all turns out to be necessary for $\wedge$ to behave as expected in the extension of **NNFAT** with the F operator (to be defined soon).

Finally, it is worth noting that we include the effects of $\alpha_1 \wedge \alpha_2$ in those of $\alpha_1 \vee \alpha_2$. Of course, the *transitions* of $\alpha_1 \wedge \alpha_2$ are already included in those of α_1 and in those of α_2, but not necessarily with the same explicit parts. For instance, for $\alpha_1 = p'$, $\alpha_2 = q'$, and $s = \emptyset$, $s' = \{p, q\}$ is both an α_1- and an α_2-successor of s, but the "fully" explicit effect $\langle \{p, q\}, \emptyset, \emptyset, \emptyset \rangle$ is only one of $\alpha_1 \wedge \alpha_2$.

With this in hand, we can define the *framing* operator F_X. Intuitively, $\mathsf{F}_X(\alpha)$ retains only those effects of α which include no implicit effect on variables of X. As can be seen, this is equivalent to removing variables of X from the implicit part of all effects. So we define $\mathrm{E}(\mathsf{F}_X(\alpha), s)$ to be

$$\{\langle e^+, e^-, i^+ \setminus X, i^- \setminus X \rangle \mid \langle e^+, e^-, i^+, i^- \rangle \in \mathrm{E}(\alpha, s)\}$$

Definition 11. The action language $\mathbf{NNFAT_F}$ is the language $\langle L_{\mathbf{F}}, I_{\mathbf{F}} \rangle$, where the expressions with scope P in $L_{\mathbf{F}}$ are defined by the grammar

$$\alpha ::= p \mid p' \mid \neg p \mid \neg p' \mid \alpha \wedge \alpha \mid \alpha \vee \alpha \mid \mathsf{F}_X(\alpha),$$

where p ranges over P and X over subsets of P, and $I_{\mathbf{F}}$ is defined for all α, s, $I_{\mathbf{F}}(\alpha, P)(s)$ is defined to be

$$\{(s \cup e^+ \cup i^+) \setminus (e^- \cup i^-) \mid \langle e^+, e^-, i^+, i^- \rangle \in \mathrm{E}(\alpha, s)\}$$

Example 12. Consider the action of leaving one's bike in a garage for them to repair exactly one wheel, but not knowing which one in advance.[2] The action may have two effects: making the front wheel or the back wheel ok (in both cases not affecting the other). However, in the process of repairing the back wheel, it might occur that the gear is changed. Additionally, in no case would the brakes be affected. Such an action could be encoded by

$$\mathsf{F}_{\mathsf{brakes}}\big(\mathsf{F}_{\mathsf{f_wheel_ok}}(\mathsf{b_wheel_ok}') \vee \mathsf{F}_{\mathsf{b_wheel_ok,gear}}(\mathsf{f_wheel_ok}')\big)$$

[2] *E.g.*, knowing only that they are not aligned which each other.

Importantly, in general, pushing all occurrences of F to the root of the expression changes its interpretation. For instance, in Example 12, this would yield the expression

$$\mathsf{F}_{\mathsf{brakes,f_wheel_ok,b_wheel_ok,gear}}\big(\mathsf{b_wheel_ok}' \vee \mathsf{f_wheel_ok}'\big)$$

according to which the gear can never change value.
Another important observation is that F_X is *not* a special case of $\mathsf{C}_{X,V,F}$. It might seem that F_X is nothing more than $\mathsf{C}_{X,\emptyset,P\setminus X}$. However, taking $P = \{p\}$, $\alpha = p' \vee \neg p'$, and $s = \emptyset$, it can be seen that both $\emptyset$ and $\{p\}$ are $\mathsf{F}_X(\alpha)$-successors of s, while only $\emptyset$ is a $\mathsf{C}_{X,\emptyset,P\setminus X}(\alpha)$-successor. Indeed, $\mathsf{F}_X(\alpha)$ takes into account the fact that both alternatives are explicitly mentioned in the formula, while $\mathsf{C}_{X,\emptyset,P\setminus X}(\alpha)$ considers only the semantics of α and hence, is equivalent to $\mathsf{C}_{X,\emptyset,P\setminus X}(\top)$.

Restriction on circuits In addition to $\mathbf{NNFAT_C}$ and $\mathbf{NNFAT_F}$, we will also study their natural restrictions where the operator $\mathsf{C}_{X,V,F}$ or F_X, respectively, occurs only at the root of expressions. Namely, $\mathbf{NNFAT_C}$ is **NNFAT** augmented only with expressions of the form $\mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha)$, where α is an **NNFAT** action description. We denote by $\mathbf{NNFAT_{rC}}$ the resulting language. Similarly, we define the restricted language $\mathbf{NNFAT_{rF}}$. Observe that **PDDL**, for instance, can be seen as a language without framing, together with an (implicit) operator F_P at the root of all expressions.

4 Compiling the Syntactic Operator Away

In this section, we show that the syntactic operator F_X can be eliminated from an $\mathbf{NNFAT_F}$ expression to yield an expression in **NNFAT** which has the same interpretation and size (up to a polynomial). Moreover, the elimination can be done in polynomial time. This means that $\mathbf{NNFAT_F}$ can be used as a convenient language for describing actions, still the algorithms which manipulate those descriptions (e.g. planners) need not be extended to cope with F, since all its occurrences can simply be eliminated in polynomial time and space.
Let us mention that the equivalent result is rather obvious for plain (tree-like) representations of formulas, but that we consider here *circuit representations*, in which a single subcircuit may occur in an exponential number of paths.
Our procedure essentially amounts to replacing all occurrences of F with subformulas similar to successor-state axioms. Before we show the result, we need two lemmas (the proofs are by induction on the structure of α).
The first lemma defines an expression $\mathrm{Expl}(\alpha, p)$, and shows that this expression states that if p changes its value via α, then there is at least one effect which does it explicitly. For states s, s' and action description α, write $\mathrm{E}(\alpha, s, s')$ for the set of effects which lead from s to s': $\mathrm{E}(\alpha, s, s') := \{\langle e^+, e^-, i^+, i^-\rangle \in \mathrm{E}(\alpha, s) \mid s' = (s \cup e^+ \cup i^+) \setminus (e^- \cup i^-)\}$.

Lemma 13. *Let α be a $\mathbf{NNFAT_F}$ action description with scope P, $s, s' \subseteq P$ be two states and $p \in s\Delta s'$. Then there is an effect $\langle e^+, e^-, i^+, i^-\rangle \in \mathrm{E}(\alpha, s, s')$ with $p \in e^+_e \cup e^-_e$ if and only if $(s, s') \models \mathrm{Expl}(\alpha, p)$, where the* **NNFAT** *expression $\mathrm{Expl}(\alpha, p)$ is defined to be*

- α *for* $\alpha = p'$ *or* $\alpha = \neg p'$,
- $\bot$ *for* $\alpha = q'$ *or* $\alpha = \neg q'$ *with* $q \neq p$,
- $\bot$ *for* $\alpha = q$ *or* $\alpha = \neg q$, *for all variables* q,
- $(\mathrm{Expl}(\beta, p) \wedge \gamma) \vee (\beta \wedge \mathrm{Expl}(\gamma, p))$ *for* $\alpha = \beta \wedge \gamma$,
- $\mathrm{Expl}(\beta, p) \vee \mathrm{Expl}(\gamma, p)$ *for* $\alpha = \beta \vee \gamma$,
- $\bigwedge_{x \in X \cup \{p\}} \big((x \leftrightarrow x') \vee \mathrm{Expl}(\beta, x)\big)$ *for* $\alpha = \mathsf{F}_X(\beta)$.

The second lemma states properties of sets of effects.

Lemma 14. *Let α be an $\mathbf{NNFAT_F}$ action description with scope $P \supseteq s$ and $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in \mathrm{E}(\alpha, s, s')$. Then it holds:*

1. *If $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ then $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \in \mathrm{E}(\alpha, s)$*
2. *There is at least one $\langle e^+, e^-, i^+, i^-\rangle \in \mathrm{E}(\alpha, s, s')$ such that $e^+ \cup i^+ = s' \setminus s$ and $e^- \cup i^- = s \setminus s'$*

Proposition 15. $\mathbf{NNFAT_F}$ *is translatable into* **NNFAT** *in polynomial time.*

Proof. Let α be a $\mathbf{NNFAT_F}$ action description with scope P. The translation $f(\alpha)$ is obtained by replacing each node $\mathsf{F}_X(\beta)$ (with $X \subseteq P$) of the circuit of α by $\beta \wedge \bigwedge_{p \in X} \big((p \leftrightarrow p') \vee \mathrm{Expl}(\beta, p)\big)$ and keeping the other nodes.
The circuit of $\mathrm{Expl}(\beta, p)$ can be computed in polynomial time (in each step we create a bounded amount of edges and nodes). Thus $f(\alpha)$ can be computed in polynomial time, too.
Now we show that $f(\alpha)$ describes the same action as α. Suppose that $f(\beta) \equiv \beta$ and $(s, s') \models f(\alpha) = \beta \wedge \bigwedge_{p \in X} \big((p \leftrightarrow p') \vee \mathrm{Expl}(\beta, p)\big)$. Then $s' \in \beta(s)$, and $(s, s') \models \mathrm{Expl}(\beta, p)$ for all $p \in X$. Then by lemmas 13 and 14 for every $p \in (s'\Delta s) \cap X$ there exists an effect $\langle e^+_{\beta,p}, e^-_{\beta,p}, i^+_{\beta,p}, i^-_{\beta,p}\rangle$ with $p \in e^+_{\beta,p} \cup e^-_{\beta,p}$ which mentions only variables from $s\Delta s'$ and by lemma 14 the sum $\langle e^+, e^-, i^+, i^-\rangle$ of these effects is as well in $\mathrm{E}(\beta, s, s')$ and $(s\Delta s') \cap X \subseteq e^+ \cup e^-$ and thus $\langle e^+, e^-, i^+, i^-\rangle \in \mathrm{E}(\alpha, s)$. This implies $s' \in (\mathsf{F}_X(\beta))(s)$. Conversely, if $s' \in (\mathsf{F}_X(\beta))(s)$ then there exists an effect $\langle e^+, e^-, i^+, i^-\rangle$ of β in s witnessing this with $(s\Delta s') \cap X \subseteq e^+ \cup e^-$. Therefore, by Lemma 13 all $\mathrm{Expl}(\beta, p)$ with $p \in (s\Delta s') \cap X$ from the definition of $f(\alpha)$ are satisfied by (s, s'), and for the rest the expression $p \leftrightarrow p'$ is satisfied. And β is satisfied by the inductive assumption. For $\alpha = \alpha_1 \wedge \alpha_2$ or $\alpha = \alpha_1 \vee \alpha_2$ we trivially have that $f(\alpha)$ describes the same action as α if the claim was proven for α_1 and α_2. □

©AFIA2021

5 Complexity of queries

We now turn to studying the complexity of *queries* to expressions. We concentrate on two natural queries for planning: checking the existence of a transition, and deciding applicability of an action in a state. These queries arguably are at the basis of most other reasonable queries.
Let $\langle L, I\rangle$ be a fixed action language, and let α denote an expression in L, $P \subseteq \mathbb{P}$ denote a set of variables such that $I(\alpha, P)$ is defined, and s, s' denote two P-states.

Definition 16. The decision problem SUCC takes as input α, P, s, s', and asks whether $s' \in \alpha(s)$.

Definition 17. The decision problem APPLIC takes as input α, P, s, and asks whether $\alpha(s) \neq \emptyset$.

SUCC for **NNFAT** amounts to model-checking of an NNF formula, and for $\mathbf{NNFAT_F}$ the complexity follows from Proposition 15.

Proposition 18. SUCC *is in* **P** *for* **NNFAT** *and* $\mathbf{NNFAT_F}$.

To prepare further results we introduce a notation.

Notation 19. Let $n \in \mathbb{N}$ and $X_n = \{x_1, \ldots, x_n\}$ be a set of variables. Observe that there are a cubic number N_n of clauses of length 3 over X_n. We fix an arbitrary enumeration $\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_{N_n}$ of all these clauses, and we define $P_n \subset \mathbb{P}$ to be the set of state variables $\{p_1, p_2, \ldots, p_{N_n}\}$. Write $\ell \in \gamma_i$ if the literal ℓ occurs in the clause γ_i. Then to any 3-CNF formula φ we associate the P_n-state $s(\varphi) = \{p_i \mid i \in \{1, \ldots, N_n\}, \gamma_i \in \varphi\}$, and dually, to any P_n-state s, we associate the 3-CNF formula over X_n, written $\varphi(s)$, which contains exactly those clauses γ_i for which $p_i \in s$ holds.We set $\psi_n := \bigwedge_{i=1}^{N_n}(\neg p_i \vee \bigvee_{\ell\in\gamma_i} \ell)$. In words, ψ_n is satisfied by an assignment t to $P_n \cup \{x_1, \ldots, x_n\}$ if and only if the 3-CNF over $\{x_1, \ldots, x_n\}$ encoded by $t \cap P_n$, is satisfied by the assignment to $\{x_1, \ldots, x_n\}$ encoded by $t \cap \{x_1, \ldots, x_n\}$.

Example 20. Consider an enumeration of all clauses over $X_2 = \{x_1, x_2\}$ which starts with $\gamma_1 = (x_1 \vee x_1 \vee x_2), \gamma_2 = (x_1 \vee x_1 \vee \neg x_2), \gamma_3 = (x_1 \vee \neg x_1 \vee x_2), \ldots$ Then $\varphi = (x_1 \vee x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee \neg x_1 \vee x_2)$ is encoded by $s(\varphi) = \{p_1, p_3\}$.

For a formula ψ over the variables $\{q_i \mid j \in J\}$, write ψ' for the formula obtained by replacing all variables q_j by q'_j.

Proposition 21. SUCC *is* $\mathbf{coNP}$*-complete for* $\mathbf{NNFAT_{rC}}$.

Proof. We reduce the non-satisfiability of a 3-CNF to SUCC. Using Notation 19 for P_n and ψ_n, let $\alpha_n = C_{X_n,\emptyset,P_n}(\psi'_n \vee (\bigwedge_{i=1}^n x'_i))$. Take a 3-CNF φ over X_n which is not satisfied by the assignment "$\forall i : x_i = \top$". If φ is unsatisfiable, then for all $t \subseteq X_n$, $(s(\varphi) \cup t)$ falsifies ψ'_n, hence the only model m via $\psi'_n \vee (\bigwedge_{i=1}^n x_i)$ which respects $m \cap P_n = s(\varphi)$ is $s(\varphi) \cup X_n$. Conversely, if φ is satisfiable then let $t \subseteq X_n$ be a satisfying assignment. By assumption we have $t \neq X_n$ and hence, $t \subsetneq X_n$. On the other hand, by definition of ψ_n (Notation 19), $s(\varphi) \cup t$ satisfies α_n, and it follows that $s(\varphi) \cup t$ cannot be minimal over X_n. We have shown that φ is unsatisfiable if and only if $s(\varphi) \cup X_n$ is an α_n-successor of $\emptyset$. □

Proposition 22. SUCC *is* **PSPACE**-*complete for* $\mathbf{NNFAT_C}$.

Proof. We modify Notation 19 by introducing for every variable x_j two variables q_j, r_j and write $q_j \in \gamma_i$ if $x_j \in \gamma_i$, and $r_j \in \gamma_i$ if $\neg x_j \in \gamma_i$. We set $Q_n := \{q_j, r_j \mid 1 \leq j \leq n\}$. $S_n := Q_n \cup \{p_1, \ldots, p_{N_n}\}$. We obtain β^n_{n+1} by replacing all x_j in ψ_n by q'_j and all $\neg x_j$ by r'_j and then define recursively

$$\beta^n_i := \mathsf{C}_{\{q_i,r_i\},\emptyset,S_n\setminus\{q_i,r_i\}}\big((q_i \wedge r_i) \vee (q_i \wedge \beta^n_{i+1}) \vee (r_i \wedge \beta^n_{i+1})\big)$$

Let $\Phi := \forall x_1 : \exists x_2 : \ldots : \forall x_n : \varphi$, which is equivalent to $\forall x_1 : \neg(\forall x_2 : \neg(\ldots \neg(\forall x_n : \varphi)\ldots)$, be a quantified Boolean formula with a 3-CNF φ. Deciding the validity of such formulas is obviously **PSPACE**-complete. We claim that Φ is true if and only if $s(\varphi) \cup Q_n \in \beta^n_1(s(\varphi))$. Indeed, first observe that for all i and all states $s \subseteq S_n \setminus \{q_i, r_i\}$, $t \subseteq \{p_1, \ldots, p_{N_n}\}$: $s \cup \{q_i, r_i\} \in \beta^n_i(t) \Leftrightarrow s \cup \{q_i\}, s \cup \{r_i\} \notin \beta^n_{i+1}(t)$. We set $V_i := \{q_j, r_j \mid i \leq j \leq n\}$ and $W_i := \{q_i, r_i\}$ and it follows with $t := s(\varphi)$

$$\begin{aligned}
& s(\varphi) \cup Q_n \in \beta^n_1(s(\varphi)) \\
\Leftrightarrow & s(\varphi) \cup V_2 \cup \{q_1\}, s(\varphi) \cup V_2 \cup \{r_1\} \notin \beta^n_2(s(\varphi)) \\
\Leftrightarrow & \forall z_1 \in W_1 : \neg(s(\varphi) \cup V_2 \cup \{z_1\} \in \beta^n_2(s(\varphi))) \\
& \quad \ldots \\
\Leftrightarrow & \forall z_1 \in W_1 : \neg\big(\forall z_2 \in W_2 : \neg(\forall z_3 \in W_3 : \neg \ldots \\
& \quad (s(\varphi) \cup \{z_1, \ldots, z_n\} \in \beta^n_{n+1}(s(\varphi)))))\big)
\end{aligned}$$

$s(\varphi) \cup \{z_1, \ldots, z_n\} \in \beta^n_{n+1}(s(\varphi))$ in the last line is equivalent to φ being true under the assignment defined by $x_i := (z_i = q_i)$. We have proven the claim and thus **PSPACE**-hardness of SUCC. For membership: SUCC can be reduced to deciding the truth of a fully quantified boolean formula (because $s' \in \mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha)(s) \Leftrightarrow \forall s'' : ((s''\Delta s) \cap X \subsetneq (s'\Delta s) \cap X \wedge s'' \cap F = s' \cap F \Rightarrow s'' \notin \alpha(s)))$. □

Proposition 23. APPLIC *is* $\mathbf{NP}$*-complete for* **NNFAT** *and* $\mathbf{NNFAT_{rC}}$ *and* **PSPACE**-*complete for* $\mathbf{NNFAT_C}$.

Proof. Satisfiability of a 3-CNF φ can be reduced to applicability in **NNFAT** by replacing each x by x' and checking whether the obtained action description describes an action which is applicable in $s = \emptyset$.
For $\mathbf{NNFAT_{rC}}$ we observe that $\mathsf{C}_{X,V,F}(\alpha)$ is applicable in s if and only if α is applicable in s.
For **PSPACE**-hardness in $\mathbf{NNFAT_C}$: $s' \in \alpha(s)$ if and only if $\alpha \wedge \bigwedge_{p\in s'} p' \wedge \bigwedge_{p\notin s'} \neg p'$ is applicable in s. For membership: to check for applicability of α in s we need to check for all s' whether $s' \in \alpha(s)$. □

6 Succinctness

Recall that all languages are fully expressive, so we use the following definition [7].

Definition 24. A language $\mathbf{L}_1$ is *at least as succinct as* $\mathbf{L}_2$ if there exists a polynomial-size translation from $\mathbf{L}_2$ into $\mathbf{L}_1$.

Our separation results rely on yet unproven assumptions on nonuniform complexity classes. Recall that $\mathbf{P/poly}$ (resp. $\mathbf{coNP/poly}$) is the class of all decision problems such that for all $n \in \mathbb{N}$, there is a polytime algorithm (resp. a nondeterministic polytime algorithm for the complement) which decides the problem for all inputs of size n [2]. The assumptions $\mathbf{coNP} \not\subseteq \mathbf{P/poly}$ and $\mathbf{PSPACE} \not\subseteq \mathbf{coNP/poly}$ which we use are standard ones; in particular, $\mathbf{coNP} \subseteq \mathbf{P/poly}$ would imply a collapse of the polynomial hierarchy at the second level (Karp-Lipton theorem), and $\mathbf{PSPACE} \subseteq \mathbf{coNP/poly}$ would imply a collapse at the third level [21].
We first observe that since $\mathbf{NNFAT}$ is translatable into $\mathbf{NNFAT_F}$ via the identity function, and $\mathbf{NNFAT_F}$ is a superlanguage of $\mathbf{NNFAT}$, so they are equally succinct.

Proposition 25. *If* $\mathbf{coNP} \not\subseteq \mathbf{P/poly}$ *then* $\mathbf{NNFAT_{rC}}$ *is strictly more succinct than* $\mathbf{NNFAT}$.

Proof. Recall from the proof of proposition 21 that $s(\varphi) \cup X_n$ is an α_n-successor of $s(\varphi)$ if and only if φ (assumed not to be satisfied by assigning $\top$ to all variables) is unsatisfiable, and that α_n depends only on the number n of variables in φ (not on φ itself). Now suppose that there exists a poly-size translation f from $\mathbf{NNFAT_{rC}}$ into $\mathbf{NNFAT}$. Then we can check whether φ is unsatisfiable by checking if it is not satisfied by the all-$\top$ assignment, and whether $s(\varphi) \cup X_n$ is an $f(\alpha_n)$-successor of $s(\varphi)$. This gives a nonuniform polytime algorithm (Proposition 18) for non-satisfiability, which is a $\mathbf{coNP}$-complete problem. □

The next proposition says that nesting of $\mathsf{C}_{X,V,F}$ operators contributes to succinctness. The proof is very similar to that of Proposition 25 .

Proposition 26. *If* $\mathbf{PSPACE} \not\subseteq \mathbf{coNP/poly}$ *then* $\mathbf{NNFAT_{rC}}$ *is strictly less succinct than* $\mathbf{NNFAT_C}$.

Proof. We use β_1^n from the proof of Proposition 22. Suppose there exists a poly-size translation f from $\mathbf{NNFAT_C}$ into $\mathbf{NNFAT_{rC}}$. Then like in the proof of Proposition 25, by checking whether $s(\varphi) \cup Q_n$ is an $f(\alpha_n)$-successor of $s(\varphi)$ we decide the validity of a QBF with a nonuniform $\mathbf{coNP}$ algorithm, implying $\mathbf{PSPACE} \subseteq \mathbf{coNP/poly}$. □

7 Conclusion

We studied extensions of $\mathbf{NNF}$ action theories with operators expressing two different types of persistency of variables, with the goal of enriching the language. We gave a picture of the resulting languages *à la* knowledge compilation map. It turns out that using a frame operator resembling that of PDDL at any level of nesting does not change time nor space complexity; hence this operator can be used when specifying actions, then compiled away efficiently so as to use algorithms designed for (standard) NNF action theories. The languages resulting for our second operator (related to the interpretation of formulas under circumscription) are more succinct but also have a greater complexity for basic queries.
Our results raise new open knowledge compilation-related questions. For example, we are interested in comparing these new languages to already well-known languages like variants of $\mathbf{PDDL}$ or $\mathbf{DL\text{-}PPA}$ [12] in terms of succinctness. We are also interested in the complexity of queries other than studied here, e.g. whether all successors of a state via a given sequential plan satisfy some property. Our long-term goal is to study action description languages as defined by allowed operators or constructs, so as to get a complete picture.

Acknowledgements

This work has been supported by the French National Research Agency (ANR) through project PING/ACK (ANR-18-CE40-0011).

References

[1] Alexandre Albore, Héctor Palacios, and Hector Geffner. Compiling uncertainty away in non-deterministic conformant planning. In *Proc. 19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2010)*, volume 215, pages 465–470, 2010.

[2] Sanjeev Arora and Boaz Barak. *Computational complexity: a modern approach*. Cambridge University Press, 2009.

[3] P. Balbiani, A. Herzig, and N. Troquard. Dynamic logic of propositional assignments: A well-behaved variant of pdl. In *2013 28th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, pages 143–152, 2013.

[4] Randal E Bryant. Symbolic boolean manipulation with ordered binary-decision diagrams. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 24(3):293–318, 1992.

[5] Daniel Bryce, Subbarao Kambhampati, and David E. Smith. Planning graph heuristics for belief space search. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 26:35–99, 2006.

[6] Alessandro Cimatti and Marco Roveri. Conformant planning via symbolic model checking. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 13:305–338, 2000.

[7] Adnan Darwiche and Pierre Marquis. A knowledge compilation map. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 17:229–264, 2002.

©AFIA2021

[8] Thomas Eiter and Georg Gottlob. Propositional circumscription and extended closed-world reasoning are πp2-complete. *Theoretical Computer Science*, 114(2):231–245, 1993.

[9] Michael J. Fischer and Richard E. Ladner. Propositional dynamic logic of regular programs. *Journal of Computer and System Sciences*, 18(2):194 – 211, 1979.

[10] Hector Geffner and Blai Bonet. *A Concise Introduction to Models and Methods for Automated Planning*. Morgan & Claypool Publishers, 2013.

[11] Tomas Geffner and Hector Geffner. Compact policies for fully observable non-deterministic planning as SAT. In *Proc. 28th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2018)*, pages 88–96, 2018.

[12] Andreas Herzig, Frédéric Maris, and Julien Vianey. Dynamic logic of parallel propositional assignments and its applications to planning. In *Proc. 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2019)*, pages 5576–5582, 2019.

[13] Robert A. Kowalski and Marek J. Sergot. A logic-based calculus of events. *New Gener. Comput.*, 4(1):67–95, 1986.

[14] John McCarthy. Circumscription—a form of non-monotonic reasoning. *Artificial intelligence*, 13(1-2):27–39, 1980.

[15] Drew McDermott. PDDL–the planning domain definition language. Technical Report CVC TR-98-003/DCS TR-1165, Yale Center for Computational Vision and Control, 1998. Available at: `www.cs.yale.edu/homes/dvm` (consulted on 2020/03/16).

[16] Christian J. Muise, Sheila A. McIlraith, and Vaishak Belle. Non-deterministic planning with conditional effects. In *Proc. 24th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2014)*, pages 370—374, 2014.

[17] Gustav Nordh. A trichotomy in the complexity of propositional circumscription. In *International Conference on Logic for Programming Artificial Intelligence and Reasoning*, pages 257–269. Springer, 2005.

[18] R. Reiter. The frame problem in the situation calculus: A simple solution (sometimes) and a completeness result for goal regression. In *Artificial and Mathematical Theory of Computation*, 1991.

[19] Jussi Rintanen. Complexity of planning with partial observability. In *Proc. 14th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2004)*, pages 345–354, 2004.

[20] Son Thanh To, Tran Cao Son, and Enrico Pontelli. A generic approach to planning in the presence of incomplete information: Theory and implementation. *Artificial Intelligence*, 227:1–51, 2015.

[21] Chee K Yap. Some consequences of non-uniform conditions on uniform classes. *Theoretical computer science*, 26(3):287–300, 1983.

Éthique et IA : analyse et discussion

C. Tessier[1]

[1] ONERA/DTIS, Université de Toulouse

catherine.tessier@onera.fr

Résumé

La profusion de documents ainsi que d'instances créées pour traiter de « l'éthique de l'IA » amène à s'interroger sur les raisons pour lesquelles l'IA est devenue un objet particulier d'attention, pourquoi cet objet est spécifiquement regardé sous un angle dit « éthique » et de quelle éthique il s'agit. L'examen des textes révèle notamment une interprétation sémantique des notions qui peut prêter à confusion, et des postulats susceptibles d'affecter les réflexions. Des tensions et paradoxes peuvent être mis en évidence, que nous illustrons sur le principe du « contrôle humain ». Nous insistons en conclusion sur les risques de dévoiement de l'éthique et la nécessité d'une véritable réflexion éthique accompagnant les évolutions techniques et applicatives en matière d'IA.

Mots-clés

Intelligence artificielle, éthique, tensions, contrôle humain.

Abstract

The high number of documents as well as bodies created to deal with « the ethics of AI » leads us to wonder why AI has become a particular object of attention, why AI is specifically looked at from the « ethics » point of view and which ethics is at stake. A review of documents reveals a semantic interpretation of notions that can lead to confusion, and some postulates that can be misleading. Tensions and paradoxes can be highlighted, which we illustrate on the principle of "human control". In conclusion, we insist on the risks of misuse of ethics and the need for a true ethical reflection going with the technical and applicative evolutions in AI.

Keywords

Artificial Intelligence, Ethics, Tensions, Human control

1 Introduction

Le rapport annuel *Artificial Intelligence Index 2019* [14]-(page 273) de l'université de Stanford recensait cinquante-huit documents, toutes sources confondues (organisations officielles et gouvernementales, universités, sociétés savantes, industries, *think tanks*) associant « intelligence artificielle (IA) » et « éthique ». L'observatoire de l'intelligence artificielle créé par l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) propose sur son site une base de données interactive des documents de politiques et initiatives en matière d'IA [22], dont ceux qui traitent d'« éthique ». Quant au rapport de l'Université de Harvard [11], il analyse trente-six documents traitant de principes pour l'IA : les principes les plus souvent invoqués sont la protection de la vie privée, la répartition des responsabilités (*accountability*), la sûreté et la sécurité, la transparence et l'explicabilité, l'équité (*fairness*) et la non-discrimination, le contrôle humain, la responsabilité des professionnels, le respect des valeurs fondamentales.

La profusion de documents ainsi que d'instances créées pour traiter de « l'éthique de l'IA » amène à s'interroger sur les raisons pour lesquelles l'IA est devenue, depuis quelques années, un objet particulier d'attention, pourquoi cet objet est spécifiquement regardé sous un angle dit « éthique » et de quelle éthique il s'agit. L'examen des textes révèle notamment une interprétation sémantique des notions qui peut prêter à confusion, et des postulats susceptibles d'affecter les réflexions. Des tensions et paradoxes peuvent être mis en évidence, que nous illustrerons en particulier sur le principe du contrôle humain. Nous insisterons en conclusion sur les risques de dévoiement de l'éthique et la nécessité d'une véritable réflexion éthique accompagnant les évolutions techniques et applicatives en matière d'IA.

L'analyse qui suit est fondée principalement sur les textes européens émanant du Groupe d'experts indépendants de haut niveau sur l'intelligence artificielle, du Parlement et de la Commission ; sur le texte provisoire de l'UNESCO rédigé par le Groupe d'experts *ad hoc* ; sur la Déclaration de Montréal ; sur les textes de l'OCDE.

2 De quoi parle-t-on ?

2.1 Intelligence artificielle

Le vocable « intelligence artificielle », mal choisi [17], fait l'objet, y compris chez les scientifiques, de dérives de langage qui amènent à personnifier l'IA et à attribuer aux logiciels des caractéristiques équivalentes à celles d'un être vivant : « *une IA* fait ceci ou cela ». On observe également l'emploi de « IA » en tant que synonyme de « logiciel », « machine » ou « système », même si ceux-ci comprennent des techniques qui ne relèvent pas de l'IA.

L' « autonomie » d'un « agent » ou d'un robot crée

©AFIA2021

également des confusions, des fantasmes et des erreurs de raisonnement, y compris au sein d'instances internationales de négociation (par exemple les négociations à la Convention sur certaines armes classiques (CCAC) à Genève au sujet des systèmes d'armes létaux dits « autonomes »). De même le terme « déléguer », employé pour exprimer le fait que certaines fonctions habituellement dévolues à un être humain sont programmées dans une machine [15] sous-entend que l'être humain transfère une partie de ses responsabilités à la machine, celle-ci étant ainsi susceptible d'être dotée d'une existence morale ou juridique.

En outre, si « intelligence artificielle » est définie correctement en préambule des documents étudiés, c'est-à-dire en expliquant la diversité des approches rassemblées sous ce vocable (comme figurée sur le « diamant de l'IA » de l'AFIA [4]), le vocable est largement entendu dans le corps des textes comme un synonyme de « apprentissage machine ». Cela apporte d'autant plus de confusion que les recherches se concentrent actuellement sur l'hybridation d'approches statistiques et symboliques, ces dernières relevant de l'intelligence artificielle dans son sens premier.

Ces ambiguïtés dans le vocabulaire et les définitions contribuent à créer plusieurs écueils :

- L'objet du discours n'est pas clair : dans les textes relatifs à l'« éthique de l'IA », est-il question de l'ensemble des approches relevant de l'IA ou spécifiquement de celles qui sont fondées sur l'apprentissage machine ?
- L'anthropomorphisation de l'IA peut conduire à une surestimation des possibilités et des risques [28] : les machines pourraient ainsi « décider par elles-même » ou « prendre des initiatives » comme par exemple, pour un véhicule dit « autonome », « choisir » de renverser telle personne plutôt que telle autre ;
- Le vocabulaire employé peut laisser croire que les machines et les programmes pourraient être mis sur le même plan moral que l'être humain, voire être des « machines morales » (en particulier lorsque des connaissances ou des comportements relevant de concepts de la morale ou de l'éthique normative y sont modélisés [9]). Cela peut être renforcé par des applications qui brouillent les repères en faisant passer des machines pour des humains (imitation de l'aspect physique, de la voix, d'interactions sociales).

En ce qui concerne les deux derniers points, le texte provisoire de l'UNESCO [7]-(alinéa 126) indique que : *« Les États membres devraient instaurer des politiques visant à sensibiliser à l'anthropomorphisation des technologies d'IA, notamment en ce qui concerne les termes utilisés pour les désigner, et évaluer les manifestations, les conséquences éthiques et les possibles limites de ce phénomène [...] »*. Parmi ces conséquences figurent d'autres ambiguïtés concernant les termes qui qualifient les systèmes d'IA dont il est question dans les documents relatifs à l'« éthique de l'IA ».

2.2 Éthique

L'examen des documents produits par les groupes d'experts, comités, instances nationales ou internationales au sujet de l'« éthique de l'IA » montre que la possibilité de s'interroger sur le fait de ne pas développer ou de ne pas utiliser des systèmes visant à automatiser les processus de décision ou fondés sur l'apprentissage machine n'est évoquée que de manière très marginale. De tels systèmes existent ou vont exister et il s'agit, d'une certaine manière, de les cautionner, en rappelant que des principes doivent être respectés, en énonçant des précautions à prendre, et en suggérant une approche fondée sur une évaluation des risques. Cette démarche que Marc Hunyadi qualifie de *« petite éthique »* s'inscrit dans une logique du fait accompli, où chacun dispose d'une liberté de plus en plus limitée de choisir de ne pas posséder ou de ne pas utiliser certains objets, et qui construit petit à petit *« des modes de vie imposés par personne en particulier et auxquels tout le monde adhère »* [13]. De plus, les questionnaires d'auto-évaluation qui sont proposés de manière institutionnelle [24] ou par des organisations privées, ou les comités *ad hoc* qui sont constitués, risquent de généraliser un blanchiment éthique (*ethics washing*) en promouvant une « conformité éthique » dont la valeur et le sens peuvent être discutables. Il est question en effet d'*« IA éthique »* [8], de *« conformité éthique des systèmes d'IA »* [7], de *« certificat européen de conformité éthique »* [27], voire d'*« éthicité »* des systèmes [16]. Ceci appelle les remarques suivantes :

- Un objet, un programme ou une technique ne peut pas être « éthique » en soi et ne peut être qualifié d'« éthique ». L'adjectif « éthique » (par définition [1] : qui concerne la morale) ne peut être associé qu'à une démarche, une délibération, une réflexion, une question, un principe, une valeur, etc.
- De même une conformité ne peut être « éthique » et il ne suffit pas de dire ce qu'il convient de faire ou ne pas faire. Ce qui relève de l'éthique est instable, singulier, et a à voir avec des dilemmes qui justement vont conduire à des solutions partiellement non conformes, qui ne vérifient pas toutes les propriétés (voir 4). La conformité dont il s'agit est une conformité technique à certaines exigences, énoncées dans un cahier des charges et vérifiées, y compris les éventuels compromis, par des simulations, des expérimentations, des campagnes de vérification, des processus d'homologation.
- Le concept d'« éthique par conception » (*"ethics by design"*) [27], calqué sur celui de respect de la vie privée dès la conception (*"privacy by design"*) [2],

1. TLF et Larousse
2. En Europe, il s'agit de concevoir les systèmes qui traitent des données à caractère personnel de manière conforme au Règlement général pour la protection des données (RGPD).

et compris comme l'intégration de principes allant au-delà des exigences légales dans la conception de systèmes d'IA [11], se heurte aux deux premières remarques. En particulier, *« éthique et état de droit dès la conception »* signifient dans [8]-(alinéas 98 à 101) : conformité aux normes, explicabilité, essais et validation, ce qui ne relève pas *a priori* de la réflexion éthique. Il existe de plus une ambiguïté sur l'expression française « éthique par conception » où « éthique » peut être compris en tant qu'adjectif – l'objet serait « éthique » (*ethical*) par conception – ou en tant que substantif (*ethics*) – de l'éthique serait prise en compte dès la conception de l'objet. Les auteurs de [28] indiquent qu'il serait préférable de concevoir des machines qui nous aident à agir mieux d'un point de vue éthique plutôt que d'envisager des machines comme des agents moraux ou se comportant conformément à des règles morales.

D'autre part, l'expression *« IA digne de confiance »* ou *« IA de confiance »* (*"trustworthy AI"*) qui selon l'Europe est définie par les trois caractéristiques : *« IA licite »*, *« IA éthique »* et *« IA robuste »* [8] est problématique. La confiance ne se décrète pas et une machine ou un système ne peut pas porter, en soi, la confiance. C'est bien l'expérience d'une personne qui utilise un système, l'examen de la manière dont il a été conçu et les garanties démontrées de conformité technique qui sont fournies qui vont amener cette personne à avoir confiance, ou non, dans ce système pour répondre à ses besoins. Comme l'affirme J. Bryson [5], *"No one should trust IA"*.

3 Les postulats

Les textes étudiés se fondent explicitement ou implicitement sur des postulats qui peuvent être discutables et occulter des éléments de réflexion. Nous relevons trois de ces postulats.

3.1 Les systèmes d'IA sont inéluctables

Aucun des documents étudiés n'envisage que les systèmes d'IA fassent l'objet de questionnements relatifs à leur existence même, à leurs raisons d'être. C'est une approche conséquentialiste fondée sur les risques et les précautions qui est adoptée, accompagnée de la nécessité d'un *« contrôle humain »* (voir 5) des systèmes d'IA, en particulier pour ceux qui sont estimés *« à haut risque »* [10, 27]. Le document de l'UNESCO [7] envisage cependant des interrogations sur l'utilisation des systèmes d'IA, en notant que celle-ci revêt un *« caractère facultatif »* (alinéa 20) et qu'une analyse devrait être menée pour évaluer si *« l'adoption de l'IA est appropriée »* (alinéa 58).

3.2 Les systèmes d'IA contribuent au bien-être

Les systèmes d'IA sont conçus dans l'*« objectif d'améliorer le bien-être et la liberté des êtres humains »*, constituent *« un moyen prometteur d'accroître la prospérité humaine, en renforçant ainsi le bien-être individuel et de la société ainsi que le bien commun »*, sont *« susceptibles d'apporter des avantages considérables aux individus et à la société »* [8]. L'IA « promet d'améliorer le bien-être des individus » [21]. *« Le développement et l'utilisation des systèmes d'intelligence artificielle doivent permettre d'accroître le bien-être de tous les êtres sensibles »* [1]-(principe 1).

L'Organisation mondiale de la santé mentionne toutefois que la notion de bien-être est multidimensionnelle, comprend des éléments subjectifs, culturels, et n'a pas de définition claire [25]. Selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee), contribuent au bien-être : les conditions de vie (logement, contraintes financières), la santé physique et émotionnelle, les liens sociaux, la sécurité, les risques psychosociaux au travail, les revenus, la composition du logement, l'âge, le diplôme [3].

3.3 Les systèmes d'IA sont une solution à tout

Dans le prolongement du postulat précédent, les systèmes d'IA peuvent contribuer à *« promouvoir l'égalité entre les sexes et lutter contre le changement climatique, rationaliser notre utilisation des ressources naturelles, améliorer notre santé, notre mobilité et nos processus de production, et nous aider à surveiller nos progrès par rapport à des indicateurs de durabilité et de cohésion sociale »* [8] ; il peuvent favoriser *« le renforcement des capacités humaines et le renforcement de la créativité humaine, l'inclusion des populations sous-représentées, la réduction des inégalités économiques, sociales, entre les sexes et autres »* [21] ; ils peuvent *« amélior[er]les conditions de vie, la santé et la justice, en créant de la richesse, en renforçant la sécurité publique ou en maîtrisant l'impact des activités humaines sur l'environnement et le climat »* [1].

A contrario, les contributeurs à l'atelier Quality of AI [17] de l'ERCIM (European Research Consortium for Informatics and Mathematics) soulignent que l'IA est souvent largement surestimée, mais qu'il est difficile de décrire tout ce qu'elle permet de réaliser sans laisser à penser qu'elle constitue une solution universelle. À titre d'exemple, les motivations qui justifient le déploiement de véhicules à conduite automatisée – amélioration de la sécurité routière, fluidification du trafic, réduction de la dépense énergétique, accès à la mobilité en particulier en zones rurales – sont en réalité *« peu documentées »* et assorties de fortes incertitudes [2]-(pages 20–22).

4 Tensions et paradoxes

4.1 Tensions entre principes

Les principes et exigences énoncés dans les documents ne peuvent pas être simultanément satisfaits, des compromis sont donc nécessaires [20]. Ces compromis, bien qu'ils constituent justement l'objet de la réflexion éthique, sont évoqués de manière très succincte, par exemple : *« Des tensions pourraient survenir entre les principes [...], pour lesquelles il n'existe pas de solution unique. [...] Il faut [...] aborder les dilemmes et arbitrages éthiques*

©AFIA2021

selon une réflexion raisonnée et fondée sur des éléments probants. [...] Il pourrait toutefois exister des situations dans lesquelles aucun arbitrage acceptable du point de vue éthique ne peut être déterminé » [8]-(alinéa 54) ; *« Si toutes les valeurs et tous les principes [...] sont souhaitables en soi, dans tout contexte réel, il y a inévitablement des compromis à faire, ce qui exige de procéder à des choix complexes concernant la hiérarchisation des contextes, sans pour autant compromettre d'autres principes ou valeurs »* [7]-(alinéa 11).

Quelques exemples de tensions sont proposés ci-dessous :

- Transparence / sécurité
  La transparence, l'explicabilité et la prédictibilité des systèmes d'IA peuvent présenter l'inconvénient d'une moindre sécurité et de possibles dérives d'usages si ces propriétés sont promues par l'ouverture des algorithmes voire des codes [3]. D'autre part, la transparence doit être évaluée au regard de la préservation de la propriété industrielle.
- Précision / protection de la vie privée
  Un système d'IA fondé sur l'analyse de données est d'autant plus précis et pertinent (*accurate*) que ces données sont précises, variées, riches et peuvent discriminer des situations particulières, voire rares, ce qui peut entrer en conflit avec la protection de la vie privée et des données à caractère personnel (données de santé ou de surveillance par exemple), voire la préservation des droits fondamentaux dans le cas des systèmes de reconnaissance faciale [18].
- Précision / préservation de l'environnement
  La précision d'un système d'IA fondé sur l'analyse de données nécessite de grands ensembles de données dont la collecte, le stockage et l'exploitation sont susceptibles d'avoir un fort impact sur l'environnement.
- Performance / Autonomie humaine
  Un système d'aide à la décision ou un système « autonome », conçu pour aider l'être humain ou le remplacer dans certaines tâches, est susceptible de porter atteinte à l'autonomie humaine, en influençant la décision de la personne, voire en s'y substituant. D'autre part, l'augmentation des capacités de ces systèmes, de leur pertinence et de leur fiabilité peut conduire à une dégradation, voire à la perte, de certaines compétences ou expertises humaines.

En outre et de manière paradoxale, les systèmes d'IA doivent être conçus de manière à respecter des principes et dans le même temps constituent une menace pour ces mêmes principes, ou bien être conçus pour un objectif qu'ils contribuent également à mettre en danger. Ainsi ils doivent être conçus dans le respect des droits fondamentaux et sont susceptibles de menacer ces droits ; ils peuvent améliorer le bien-être et abaisser la qualité de vie ; réduire les inégalités et les exacerber ; renforcer les capacités humaines et contraindre les choix des individus et des groupes ; renforcer la sécurité et ouvrir de nouvelles brèches de sécurité ; contribuer à lutter contre le changement climatique et affecter les écosystèmes, l'environnement et le climat [1, 8].

4.2 Équité et biais

Le principe d'équité (*fairness*) peut faire référence aux notions d'impartialité, d'égalité, de non-discrimination et de justice et suppose un idéal d'égal traitement des individus ou des groupes [24].

« Les biais et la discrimination sont des risques inhérents à toute activité sociétale ou économique » [10], cependant il est demandé aux acteurs de l'IA de *« réduire au maximum et éviter de renforcer ou de perpétuer des biais sociotechniques inappropriés basés sur les préjugés liés à l'identité »* [7]-(alinéa 29), de corriger les biais éventuels [10], de veiller à l'absence de *« biais injustes »* [8].

Dans le même temps il est demandé de réfléchir à la définition de l'équité [24]. Il semble en particulier nécessaire de situer la définition d'une propriété d'un logiciel ou des résultats qu'il est susceptible de fournir par rapport à la notion d'équité dans le sens commun. On peut constater d'abord que la nature n'est pas équitable en soi – *"unfairness is natural"* [4], que la société véhicule de nombreux biais et que les êtres humains, consciemment ou non, ont des comportements discriminatoires. Que signifie alors de réduire les biais ou d'éviter de les renforcer dans les systèmes d'IA, sous-entendu essentiellement ceux qui sont fondés sur l'analyse de données ?

On pourrait se demander ce que serait un objet logiciel sans biais, voire « neutre » et si des résultats de calcul qui seraient moralement neutres, équitables, seraient adaptés à la société ou à la nature. D'autre part, comment formaliser sous forme mathématique, donc programmable, un raisonnement ou une décision « juste » ou « équitable » ? Il semble que ces questions ne puissent être envisagées dans l'absolu : il convient de s'interroger sur la raison d'être et les objectifs de l'utilisateur du système d'IA ainsi que les valeurs qu'il souhaite promouvoir, et comment ces objectifs et valeurs orientent la conception du système. Par exemple, un processus automatisé de sélection de CV pour une embauche pourrait être fondé sur un tirage au sort ou sur l'historique des profils des personnes qui ont « réussi » au poste concerné. La première méthode, qui ne nécessite pas de système d'IA, peut être considérée – si toute personne a la possibilité de présenter son CV – comme « sans biais », mais a de grandes chances d'être inadaptée. La seconde est susceptible de perpétuer l'embauche de personnes ayant toujours les mêmes caractéristiques, sauf à diversifier la notion de « réussite », qui dépend des valeurs que l'organisation qui cherche à recruter veut renforcer

3. Softbank Robotics Webinar on Responsible Robotics and AI : Concrete solutions, Feb. 2021

4. J. Bryson, Softbank Robotics Webinar on Responsible Robotics and AI : Concrete solutions, Feb. 2021

grâce à cette embauche.

Remarque : Fairlearn[5] n'utilise pas le terme de « biais » et définit l'équité sur la base de deux types d'impacts des systèmes d'IA sur les personnes : préjudices d'affectation et préjudices de qualité de service.

5 Exemple : le contrôle humain

Il y a un consensus international sur le principe de « contrôle humain » des systèmes d'IA, qui se traduit dans les textes par des *« garanties et des mécanismes, tels que l'attribution de la capacité de décision finale à l'homme, qui soient adaptés au contexte et à l'état de l'art »* [21], le fait de pouvoir décider de ne pas utiliser un système d'IA afin de conserver des niveaux de jugements humains, ou d'assurer la possibilité que la décision de l'humain prime sur celle calculée par le système [24]. Pour les applications dites à « haut risque » (comportant des risques d'atteinte aux individus ou à la société), l'Europe préconise une garantie de *« participation adéquate de l'être humain »* [10], de supervision humaine à tout moment, et une reprise en main humaine quand nécessaire [27], et *« qu'à tout moment, une personne humaine ait la possibilité de corriger [le système], de l'interrompre ou de [le] désactiver en cas de comportement imprévu, d'intervention accidentelle, de cyberattaques, d'ingérence de tiers dans une technologie fondée sur l'IA ou d'acquisition par des tiers d'une telle technologie »* [26].

Cette notion de « contrôle humain » reste cependant floue en particulier parce qu'elle englobe plusieurs types d'interventions humaines : en effet, elle peut concerner le fait qu'une personne ou une organisation humaine décide d'utiliser ou non le système d'IA, la nature des décisions qui restent dévolues à l'humain, la supervision, les possibilités de reprise en main, les validations humaines des résultats fournis.

Par ailleurs se pose la question de l'évaluation de la présence du contrôle humain : comment et par qui cette évaluation est-elle réalisée ? Que signifie techniquement la garantie de supervision humaine « à tout moment » ? Comment garantit-on que l'intervention humaine est pertinente ?

5.1 Un paradoxe

Les raisons pour lesquelles on souhaite automatiser des fonctions décisionnelles dans le cadre d'une application ou d'ensembles d'applications sont multiples, par exemple : les tâches à réaliser dépassent les capacités humaines (le contexte demande par exemple d'envisager une combinatoire élevée ou un espace de recherche de solutions très grand) ; elles mettent en cause la sécurité ou la santé de l'humain (le contexte est dangereux ou hostile) ; l'automatisation est plus économique ; l'automatisation est plus sûre (elle permet de pallier l'erreur humaine).

5. A Python package to assess and improve fairness of machine learning models : `https://github.com/fairlearn/fairlearn`

Il y a donc un paradoxe entre les raisons qui motivent l'automatisation et le fait d'exiger un contrôle humain des fonctions automatisées : se pose en effet la question de la capacité de l'humain à exercer effectivement ce contrôle. De plus, la notion de contrôle humain sous-entend que le point de vue de l'humain est pertinent et correct, et qu'il doit prévaloir sur les résultats des calculs de la machine. Enfin, le contrôle humain nécessite qu'il y ait effectivement un humain présent et disponible – par exemple il est indiqué dans [23]-(section 9) que les services publics européens doivent être largement fondés sur des systèmes numériques à base d'IA, mais que le recours à un interlocuteur humain doit toujours être possible.

5.2 Limites du contrôle humain

L'humain doit disposer d'informations et de temps, qui soient compatibles avec le contrôle à exercer. En particulier, l'humain ne peut pas être considéré comme le recours ultime dans n'importe quelle situation ou quand les fonctions automatisées « ne savent pas faire ». Par exemple, il est illusoire d'envisager le transfert du contrôle de la conduite d'un véhicule « autonome » des automatismes vers l'utilisateur si celui-ci, comme on le voit dans certaines publicités de constructeurs automobiles, est occupé à d'autres activités : une bonne conscience de situation, incluant prédiction et anticipation, est indispensable pour élaborer des décisions et des actions adaptées. Même la procédure d'arrêt en sécurité (*"stop button"*) [24] que l'être humain pourrait engager est complexe à envisager de manière opérationnelle en toutes circonstances.

En outre, les automatismes altèrent les mécanismes de contrôle classiquement utilisés par l'humain : moindre engagement dans la tâche, augmentation de la divagation attentionnelle, moindre aptitude à détecter des erreurs. En particulier s'il est novice, fatigué ou stressé, l'humain est susceptible de se reposer sur ce que préconise la machine et d'être ainsi enfermé dans des choix restreints ou erronés. Enfin, le manque d'informations ou au contraire un flot trop abondant d'informations, ou les schémas que l'humain a en tête, peuvent entraîner une mauvaise compréhension du comportement de la machine ou des résultats qu'elle propose, et entraîner des décisions humaines inadaptées.

5.3 Envisager un partage de l'autorité

Le fait d'assurer la possibilité que la décision de l'humain prime sur celle calculée par le système d'IA, qui est l'une des options de la surveillance humaine [24] suppose que l'humain est infaillible.

Il ne s'agit pas d'opposer l'humain et la machine ou les logiciels, mais de répartir les bonnes compétences aux bons endroits dans le cadre d'une approche système incluant les mécanismes humains mis en jeu, et en *analysant les besoins* : la machine doit être conçue pour aider ses utilisateurs et remplir un service bien identifié en préservant l'essence même de ce qui est important pour prendre des

©AFIA2021

décisions et en endosser la responsabilité. D'un point de vue technique, des critères concrets permettant de spécifier et de vérifier la façon dont la machine permet à l'humain d'exercer ses mécanismes de contrôle doivent être définis. En outre il faut s'interroger sur ce que seront les capacités cognitives de demain, certaines capacités étant susceptibles de décroître pendant que d'autres se développent ; il faudra certainement adapter les systèmes à ces capacités différentes.

5.4 La question de l'annotation

Un type particulier de « contrôle humain » est la nécessaire annotation ou transcription des données pour alimenter les systèmes d'apprentissage. Si l'Europe recommande la mise en place d'outils souverains en la matière, dans le respect des législations [23], la question de l'annotation des données et de la transcription d'échanges verbaux n'apparaît pas en tant que préoccupation éthique dans les documents étudiés. Pourtant, ce contrôle humain est largement effectué par des « micro-travailleurs » précaires, sous-rémunérés et dépourvus de couverture sociale, ou bien par des employés de sous-traitants des grandes entreprises du numérique exposés en permanence à des données personnelles sensibles ou des à propos dérangeants. Il faut certainement s'interroger sur la tension entre performances des logiciels fondés sur les données et dignité et intégrité des personnes qui contribuent à ces performances.

6 Conclusion

6.1 Des risques de dévoiement de l'éthique

On ne peut pas laisser penser qu'« une IA éthique » serait possible, et que cela consisterait à vérifier une conformité à des critères et à des normes, traduits en exigences techniques. En effet les instruments normatifs [7], les standards (IEEE P7000™ et suivants), les grilles d'évaluation (auto-évaluation « éthique » pour les projets européens), les audits éthiques [20], qui relèvent essentiellement d'une bonne gestion et de bonnes pratiques, présentent le risque d'être substitués à une véritable réflexion éthique, permanente et toujours en chantier. Par exemple, s'il est nécessaire de vérifier la conformité d'un projet d'identification biométrique [6] au Règlement général pour la protection des données (RGPD), il est tout aussi nécessaire de réfléchir aux raisons pour lesquelles ce projet est mené et, au fur et à mesure des performances constatées, de se demander s'il faut le poursuivre et dans quelles directions, et quels dilemmes se présentent.

Le risque est un dévoiement de l'éthique qui, *via* des labels ou des certificats, pourrait à la fois donner bonne conscience et servir d'argument de vente. En ce sens, *une éthique de l'éthique de l'IA* [28] est à construire.

6.2 Une indispensable réflexion éthique

« Le premier danger que présente le développement de l'intelligence artificielle consiste à donner l'illusion que l'on maîtrise l'avenir par le calcul. [...] Mais dans les affaires humaines, demain ressemble rarement à aujourd'hui, et les nombres ne disent pas ce qui a une valeur morale, ni ce qui est socialement désirable. » [1]

Outre une approche conséquentialiste fondée sur l'analyse des risques, il s'agit également de questionner l'existence même de l'objet (logiciel, robot), sa raison d'être, et se demander si cet objet est désirable et au nom de quelles valeurs. La référence étant des moyens existants ou l'être humain, l'objectif peut être de faire effectuer des tâches plus rapidement, à plus grande échelle, de manière plus précise, plus sûre, voire plus « inventive » ; de réduire des coûts ; de proposer des solutions plus simples, plus commodes, plus ludiques. On peut aussi interroger la pertinence de ces critères : pourquoi vouloir aller plus vite, etc., et éloigner toujours plus l'être l'humain, et ce de manière paradoxale car le contrôle humain est considéré comme impératif ?

Une analyse des besoins, à mettre en regard de l'évolution des capacités techniques, permettrait de distinguer usages et technologies, d'envisager les usages problématiques et les glissements insidieux vers de tels usages, d'interroger la légitimité d'utiliser certaines techniques, d'identifier des nouveaux besoins susceptibles d'être créés de toutes pièces, ou de questionner l'utilisation des technologies pour traiter des effets de dérives plutôt que de remédier aux dérives elles-mêmes (par exemple la relecture d'articles par les pairs assistée par « IA » pour faire face à l'inflation de propositions de publications [6]). Il s'agirait plus d'« embarquer » l'éthique dans la recherche et l'ingénierie relatives à l'IA plutôt que dans l'IA elle-même, c'est-à-dire la considérer pour ce qu'elle est, un processus de réflexion continu qui concerne des tensions entre principes et des questions sans « bonne solution » [19]. Il pourrait être imposé par exemple une discussion éthique dans les articles scientifiques [12]. Ce n'est pas l'« IA » qui va évoluer toute seule vers de nouvelles capacités et applications, comme peut le laisser croire la façon dont on personnifie cet ensemble de techniques, mais bien les humains qui doivent décider collectivement de ce qu'il convient ou non de faire, en analysant si ces progrès technologiques vont nécessairement vers un progrès moral.

Liens d'intérêt

L'autrice a été membre du Groupe d'experts *ad hoc* de l'UNESCO pour l'élaboration d'un avant-projet de recommandation sur l'éthique de l'intelligence artificielle [7].

Références

[1] La Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'Intelligence Artificielle, 2018. https://www.declarationmontreal-iaresponsable.com/la-declaration.

[2] Développement des véhicules autonomes - Orientations stratégiques pour l'action publique. Ministère de

6. https://www.cnil.fr/fr/biometrie

la transition écologique, 2018. https://www.ecologie.gouv.fr/developpement-des-vehicules-autonomes-orientations-strategiques-laction-publique.

[3] M.-H. Amiel, P. Godefroy, and S. Lollivier. Qualité de vie et bien-être vont souvent de pair. Technical report, Insee, 2013. https://www.insee.fr/fr/statistiques/1281414.

[4] Association française pour l'Intelligence Artificielle. Domaines de l'IA. https://afia.asso.fr/domaines-de-lia/.

[5] J. Bryson. AI & Global Governance : No One Should Trust AI. United Nations University, Centre for Policy Research, 2018. https://cpr.unu.edu/publications/articles/ai-global-governance-no-one-should-trust-ai.html.

[6] A. Checco, L. Bracciale, P. Loreti, S. Pinfield, and G. Bianchi. AI-assisted peer review. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8 :25, 2021. https://doi.org/10.1057/s41599-020-00703-8.

[7] Groupe d'Experts ad hoc (GEAH) de l'UNESCO. Avant-projet de recommandation sur l'éthique de l'Intelligence Artificielle, 2020. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373434_fre.

[8] Groupe d'Experts Indépendants de Haut Niveau sur l'Intelligence Artificielle. Lignes directrices en matière d'éthique pour une IA digne de confiance. Commission européenne, 2019. https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/d3988569-0434-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/prodSystem-cellar/language-fr/format-PDF.

[9] Projet EthicAA. Livre Blanc - Éthique et agents autonomes. Projet ANR-13-CORD-0006, 2018. https://ethicaa.greyc.fr/media/files/ethicaa.white.paper.pdf.

[10] Commission européenne. Livre Blanc : Intelligence artificielle - Une approche européenne axée sur l'excellence et la confiance, 2020. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/commission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020_fr.pdf.

[11] J. Fjeld, N. Achten, H. Hilligoss, A.C. Nagy, and M. Srikumar. Principled Artificial Intelligence : Mapping Consensus in Ethical and Rights-based Approaches to Principles for AI. Technical report, The Berkman Klein Center for Internet & Society, Harvard University, 2020. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3518482.

[12] E. Gibney. The battle to embed ethics in AI research. *Nature*, 577 :609, 2020. https://media.nature.com/original/magazine-assets/d41586-020-00160-y/d41586-020-00160-y.pdf.

[13] M. Hunyadi. *La Tyrannie des modes de vie – Sur le paradoxe moral de notre temps*. Le Bord de l'eau, 2015.

[14] Stanford Human Centered Artificial Intelligence. Artificial Intelligence Index - 2019 Annual Report. Stanford University , 2019. https://hai.stanford.edu/research/ai-index-2019.

[15] Journal Officiel. Loi 2019-1428 d'orientation des mobilités, chapitre II, section 1 « Véhicules autonomes et véhicules connectés », 24 décembre 2019. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039666574.

[16] Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). Évaluer les intelligences artificielles, 2021. https://www.lne.fr/fr/on-en-parle/evaluer-intelligence-artificielle-ia.

[17] B. Levin and P. Kunz. ERCIM Workshop on Quality of AI. *ERCIM News*, 123 :4–5, 2020. https://ercim-news.ercim.eu/en123/joint-ercim-actions/ercim-workshop-on-quality-in-ai.

[18] P. Marks. Can the Biases in Facial Recognition Be Fixed ; Also, Should They ? *Communications of the ACM*, 64 :3 :20–22, 2021. https://cacm.acm.org/magazines/2021/3/250698-can-the-biases-in-facial-recognition-be-fixed-also-should-they/fulltext.

[19] B. Mittelstadt. Principles alone cannot guarantee ethical AI. *Nature Machine Intelligence*, 1 :501–507, 2019. https://doi.org/10.1038/s42256-019-0114-4.

[20] J. Mokander and L. Floridi. Ethics-Based Auditing to Develop Trustworthy AI. *Minds and Machines*, 2021. https://doi.org/10.1007/s11023-021-09557-8.

[21] OCDE. Recommandation du Conseil sur l'intelligence artificielle OECD/LEGAL/0449, 2019. https://legalinstruments.oecd.org/fr/instruments/OECD-LEGAL-0449.

[22] OECD.AI. Countries & initiatives overview, 2020. https://www.oecd.ai/countries-and-initiatives.

[23] Independent High-Level Expert Group on Artificial Intelligence. Policy and Investment Recommendations for Trustworthy AI. Commission européenne, 2019. https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/policy-and-investment-recommendations-trustworthy-artificial-intelligence.

[24] Independent High-Level Expert Group on Artificial Intelligence. The Assessment List for Trustworthy Artificial Intelligence (ALTAI). Commision européenne, 2020. https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/assessment-list-trustworthy-artificial-intelligence-altai-self-assessment.

©AFIA2021

[25] World Health Organization. Measurement of and target-setting for well-being : an initiative by the WHO Regional Office for Europe, 2012. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/181449/e96732.pdf.

[26] Parlement européen. Intelligence artificielle : questions relatives à l'interprétation et à l'application du droit international. Résolution du 9 janvier 2021. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0009_FR.html.

[27] European Parliament. Framework of ethical aspects of artificial intelligence, robotics and related technologies, 2020. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0275_EN.html.

[28] T.M. Powers and J.-G. Ganascia. The Ethics of the Ethics of AI. In M.D. Dubber, F. Pasquale, and S. Das, editors, *The Oxford Handbook of Ethics of AI*. Oxford University Press, 2020.

Activité AFIA

1er août 2019 – 31 juillet 2021

Éditeurs : Conseil d'Administration de l'AFIA – Année 2021

Table des matières

Flyer AFIA 2021.
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.
2020 et 2021 xxv

Bulletins Trimestriels.
Résumé des numéros 106 à 113 xxvii

Journées propres.
PDIA 2019, Hommage à Jacques Pitrat, FIIA 2020, EFIA 2021, PDIA 2021 xxix

Journées communes.
Période : de août 2019 à juillet 2021 xxxv

Plates-formes IA.
Affiches PFIA 2020 & 2021 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 2019 Toulouse, PFIA 2020 Angers, PFIA 2021 Bordeaux) 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 2021 héberge du 28 juin au 2 juillet 2021 à Bordeaux, outre les 24e CNIA, 19e RJCIA et 7e APIA, les 32es IC, les 16es JFPDA, les 29es JFSMA, les 15e JIAF, trois journées thématiques (Défense & IA, Jeux & IA, Santé & IA) et une section de six tutoriels accessibles à tous les inscrits à la plateforme.

Forte du soutien de ses 340 adhérents à jour de leur cotisation en 2020, 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 2020),
- Une journée Enseignement intitulée « Enseignement et Formation en IA » (EFIA 2021),
- Une journée Recherche sur les « Perspectives et Défis en IA » (PDIA 2021),
- 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 octobre 2016),
  - Collège Technologies du Langage Humain (depuis juillet 2019) ,
  - Collège Compétitions (depuis octobre 2018)
- La parution trimestrielle des bulletins de l'AFIA, en accès libre à tous depuis le site web,
- 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 en 2021 : TAL&IA, IHM&IA et EGC&IA. D'autres journées sont en cours de préparation.

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 2020

Président	Yves DEMAZEAU	GT Bureau, GT Communication, GT Plateforme
V.-Présidente	Domitile LOURDEAUX	Parrainages, Collège Industriel, Représentation
Trésorière	Catherine FARON	GT Bureau, GT Enseignement, Collèges, PFIA 2020
Secrétaire	Sandra BRINGAY	GT Journées, Prix Thèse
Webmestre	Emmanuel ADAM	GT Web&Mail, Brèves, Réseaux sociaux, Bulletin
Rédacteur	Dominique LONGIN	GT Bulletins, GT Communication, PFIA 2020
Membres	Alain BERGER	Collège Industriel, Journées, Communication
	Grégory BONNET	GT Bulletins, FIIA 2020
	Elise BONZON	GT Collèges, Parrainages
	Gaël DIAS	Ecole de Printemps, Dossier n°107
	Pierre FEILLET	Collège Industriel, Réseaux Sociaux, Dossier n°109
	Thomas GUYET	Journées
	Marie LEFEVRE	Adhésions, Collèges, Dossier n°108, Journées
	Christophe LEROUX	Journées
	Frédéric MARIS	GT Plateforme
	E. Mephu NGUIFO	GT Journées, Dossier n°110
	Gauthier PICARD	GT Enseignement, EFIA 2020, Tutoriels PFIA 2020
	Valérie REINER	Collège Industriel, Représentation, Journées
	Céline ROUVEIROL	Cartographie, Collège Industriel
	Laurent SIMON	Dossier n°111, Bulletin, Réseaux Sociaux
	Olivier SIMONIN	Journées
	Charlotte TRUCHET	GT Web&Mail, Dossier n°111, Communication

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
Secrétaire	Grégory BONNET	GT Rédaction, Prix Thèse, Grand Public
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
	Gaël DIAS	GT Enseignement, Ecole de Printemps
	Catherine FARON	EFIA 2021
	Pierre FEILLET	Collège Industriel, Réseaux Sociaux
	Thomas GUYET	GT Plateforme, PFIA 2021
	Marie LEFEVRE	GT Web&Mail, Adhésions, Collèges
	Frédéric MARIS	PFIA 2021
	E. Mephu NGUIFO	GT Journées, Dossier n°114
	Gauthier PICARD	GT Enseignement, EFIA 2021, Tutoriels PFIA 2021
	Valérie REINER	Collège Industriel, Ecole de Printemps
	Céline ROUVEIROL	Collège Industriel, Cartographie, Grand Public
	Laurent SIMON	Dossier n°111
	Charlotte TRUCHET	GT Collèges, Dossier n°111, Grand Public

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Collège Industriel

Objectif du Collège

Si l'AFIA représente plutôt bien la communauté académique française en Intelligence Artificielle (IA), cela n'est pas le cas de sa représentation de la communauté des industriels acteurs ou juste intéressés par l'IA. 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 :

- 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.
- Pouvoir faire état ses relations académiques (cartographie annuelle des relations académiques-industrielles) et leurs recherches de partenariat académique sur des problématiques ciblées.
- 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).
- Proposer aux Collèges Thématiques de L'AFIA (C2A Apprentissage Automatique, I&H Interaction avec l'Humain, R&R Représentation et Raisonnement, SIC Science de l'Ingénierie des Connaissances, SMAA Systèmes Multi-Agents et Agents autonomes, TLH Technologies du Langage Humain) des actions intéressant les membres du Collège Industriel et les faire inviter lors de réunions ciblées.
- Pouvoir discuter avec les autres sociétés adhérentes au Collège, de problématiques dans le domaine de l'IA, de partager des solutions, en garantissant la confidentialité des échanges entre les sociétés.
- Organiser des actions de lobbying au niveau français auprès des ministères, des pôles de compétitivité, de l'ANR et tout autre organisme, également au niveau Européen.

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

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.

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.

En 2021, le Collège Industriel est composé de :

- Stephan Brunessaux, Bruno Carron et Frédéric Perlant
  AIRBUS, Elancourt

- Alain Berger
  ARDANS, Montigny-le-Bretonneux

- Mustapha Derras, Youssef Miloudi et Valérie Reiner
  BERGER-LEVRAULT, Boulogne Billancourt

- Stéphane Durand et Bruno Patin
  DASSAULT Aviation, Saint-Cloud

- Bruno Berstel Da Silva, Giulia Burchi et Issam Mahzoud
  DECISIONBRAIN, Paris

- Pierre Feillet et Christian de Sainte-Marie
  IBM FRANCE, Gentilly

- Ghislain Atemezing et Christophe Prigent
  MONDECA, Paris

- 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 et Céline Rouveirol
  CA AFIA, Grenoble

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.

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

- Pierre Feillet, feillet@fr.ibm.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

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

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
- 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
- François Portet
  Grenoble INP, LIG, Grenoble
- 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

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

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 2020

Le Jury

- Président : Philippe Mathieu (Université de Lille)
- Membres : Salem Benferhat, Isabelle Bloch, Pierre Boulet, Jean-Gabriel Ganascia, Salima Hassas, Andreas Herzig, Jérôme Lang, Pierre Marquis, Marie-Christine Rousset, Thomas Schiex, Michèle Sebag.

Les Lauréats

- 1er Prix: Ghouthi Boukli Hacene "Processing and Learning Deep Neural Networks on Chip". 03/10/19. Dir. : Michel Jezequel (MILA, IMT Atlantique, Brest).
- Accessit (ex-aequo): Soumia Dermouche "Leveraging the Dynamics of Non-Verbal Behaviors: Modeling Social Attitude and Engagement in Human-Agent Interaction". 27/06/19. Dir. : Catherine Pelachaud (ISIR, Sorbonne Université, Paris).
- Accessit (ex-aequo): Éloi Zablocki "Multimodal Machine Learning: Complementarity of Textual and Visual Contexts". 14/10/19. Dir: Patrick Gallinari, Benjamin Piwowarski, and Laure Soulier (LIP6, Sorbonne Université, Paris).

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).

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, ou 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, suite à la démission de Claire Lefèvre, celle-ci a été remplacée par Gaël Lejeune.

Bulletin 106 **Dossier « PFIA 2019 »** **octobre 2019**

- Le dossier, dirigé par E. Mephu Nguifo, est consacré à PFIA 2019 qui s'est déroulé du 1er au 5 juillet 2019 à Toulouse et qui a hébergé pas moins de 11 événements (APIA, Cap, CNIA, IC, JFPDA, JFSMA, JIAF, RJCIA, TALN-RECITAL France@International et la compétition DriveToGaether) en plus de démonstrations et posters, de tutoriels, et de 3 prix AFIA de thèse.
- Ce bulletin comporte en outre un compte rendu sur le camp d'été « Recherche MIDI » en IA, la journée « Classification & IA », et le séminaire national sur les « Aspects sociétaux des véhicules autonomes ». Il contient également les thèses et HDR du 3e trimestre 2019.

Bulletin 107 **Dossier « I.A. et Technologies du Langage Humain»** **janvier 2020**

- Le dossier, sous la direction de Gaël Diaz, recense 20 équipes de recherche académiques ou industrielles françaises menant des travaux à l'intersection du traitement automatique des langues, de la recherche d'information, de la communication parlée et de l'intelligence artificielle.
- Ce bulletin débute par un hommage à Jacques Pitrat, l'un de nos plus anciens et fidèles adhérents, pionner de l'IA en France. Il contient également les comptes rendus de la 4e journée MACS&IA, la 3e journée RI&IA, ainsi de la Nuit de l'Info 2019, en plus des thèses et HDR du dernier trimestres 2019 dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 108 **Dossier « I.A. et Education »** **avril 2020**

- Le dossier, dirigé par Marie Lefèvre, présente 15 structures francophones de France, Belgique et Suisse (équipe de recherche académique ou industrielle, laboratoire, projet ou chaire de recherche) travaillant actuellement à l'intersection de l'IA et de l'éducation, ainsi que les projets en cours.
- Ce bulletin complété par le compte rendu de la journée Philosophie des Sciences & IA qui s'est tenue sous le thème « Prédire et expliquer les phénomènes sociaux », ainsi que les thèses et HDR soutenues pendant le 1er trimestre 2020 et dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 109 Dossier « Equipes Industrielles en I.A. » juillet 2020

- Le dossier recense des équipes industrielles travaillant sur des thématiques de l'IA. Il est dirigé par Pierre Feillet.
- Ce bulletin inclut liste des thèses et HDR soutenue lors du 2nd trimestre 2020 et dont nous avons eu connaissance.

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 « Santé & IA » 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.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

PDIA 2019

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa sixième journée PERSPECTIVES ET DEFIS DE l'IA sur le thème des CONTRAINTES. "La Programmation par Contraintes (PC) représente une des meilleures avancées que l'informatique ait jamais réalisée pour se rapprocher du Graal de la programmation : l'utilisateur décrit le problème, l'ordinateur le résout" [Freuder 97]. Beaucoup de progrès ont été effectués depuis dans cette direction et il existe dorénavant des techniques et des solveurs permettant de résoudre des problèmes de grande complexité avec de nombreuses applications industrielles. La journée PDIA 2019 vise à présenter les grandes avancées de ces dernières années tout en présentant les grands défis du domaine et les limites des outils et approches actuels. La journée est construite autour d'exposés accessibles, de retours d'expériences et de tables rondes favorisant une grande interaction.

Date et Lieu

- Date : 10 octobre 2019
- 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 Laurent Simon (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 09h00 « SAT4J : Satisfaisabilité booléenne et au-delà » par Daniel le Berre (*U. Artois, Lens*)
- 09h30 « Le formalisme de contraintes XCSP3 » par Gilles Audemard (*U. Artois, Lens*)
- 10h00 Pause
- 10h30 « La PC chez Cosling : vision et applications » par Jean-Guillaume Fages (*Cosling, Nantes*)
- 10h50 « Panorama des utilisations de la PC à DecisionBrain » par David Gravot (*DecisionBrain, Paris*)
- 11h10 « Applications de la PC à Dassault Aviation » par Philippe Walter et André Chamard (*Dassault Aviation, Saint-Cloud*)
- 11h30 Table ronde « L'expertise de la PC : dans l'encodage ou dans les outils ? »
- 12h30 Buffet
- 14h00 « Contraintes en Continu » par Marie Pelleau (*U. Nice Sophia Antipolis*)
- 14h30 « CP Optimizer pour la planification et l'ordonnancement » par Philippe Laborie (*IBM France, Gentilly*)
- 15h00 « Satisfaisabilité booléenne et compilation de connaissances » par Jean-Marie Lagniez (*Huawei, Boulogne Billancourt*) et Laurent Simon (*U. Bordeaux*)
- 15h30 « Compilation de connaissances à Renault » par Jean-Marc Astesana (*Renault, Guyancourt*)
- 16h00 Pause
- 16h30 Table ronde « La PC face aux problèmes au-delà de NP (comptage, minimisation, …) »
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Philippe Laborie (*IBM France, Gentilly*), Jean-Marie Lagniez (*Huawei, Boulogne Billancourt*) et Laurent Simon (*U. Bordeaux*) pour l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres de l'AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-pdia/. Le déjeuner est offert aux personnes qui se seront inscrites à PDIA 2019 avant le 07/10/19, et seulement à celles-ci.

Institut des Systèmes Complexes

cnrs

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Hommage à Jacques Pitrat

Jacques Pitrat est décédé le 14 octobre 2019. Diplômé de l'X, Ingénieur de l'Armement, Directeur de Recherche au CNRS, Jacques Pitrat a consacré sa vie à promouvoir et favoriser le développement de l'IA en France. Pionnier de l'Intelligence Artificielle Forte et auteur de nombreuses publications, père de l'Intelligence Artificielle en France et formateur de nombreux collègues dans le domaine de l'IA, membre actif de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle, c'est à cet homme généreux, admirable et respecté de tous, que la communauté nationale en IA souhaite rendre hommage ici à travers de nombreux témoignages.

Date et Lieu

- Date : 06 mars 2020
- Lieu : Sorbonne U., CICSU, salle 108, Couloir 44-45 (accès T44), 4 place Jussieu, 75005 Paris

Programme

- 08h30 Accueil
- 08h45 Ouverture de Bernadette Bouchon-Meunier *(CNRS Paris)* et Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Alain Berger (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 09h00 « Jacques Pitrat : ses activités de directeur de laboratoire » par Bernadette Bouchon-Meunier (*CNRS Paris*)
- 09h15 « Jacques Pitrat: directeur de recherche, directeur d'équipe » par Monique Grandbastien (*U. Lorraine*) et Monique Baron (*Sorbonne U.)*
- 09h45 « Démonstration automatique, métathéorèmes, connaissances déclaratives » par Dominique Pastre (*U. Paris Descartes Honoraire*)
- 10h15 « Connaissance, béchamel au chocolat » par Marie Odile Cordier (*U. Rennes 1*)
- 10h30 Pause
- 11h00 « Jacques Pitrat et le Traitement du Langage Naturel » par Hélène Giroire (*Sorbonne U.*)
- 11h30 « IA et les jeux » par Tristan Cazenave (*U. Paris-Dauphine*)
- 12h00 « La prise en compte des symétries dans CAIA » par Jean-Yves Lucas (*EDF Saclay*)
- 12h30 Buffet
- 14h00 « Bootstrapping et métaconnaissance » par Marc Porcheron (*EDF Saclay*)
- 14h30 « CAIA... et au-delà (refpersys.org) » par Basile Starynkevitch (*CEA Saclay*)
- 15h00 « Le point de vue de Jacques Pitrat sur l'apport d'une conscience artificielle à l'IA » par Gérard Sabah (*CNRS Honoraire*)
- 15h30 « L'œuvre scientifique de Jacques Pitrat, une perspective historique » par Jean-Paul Haton (*U. Lorraine*) et Henri Prade (*CNRS Toulouse*)
- 16h00 Pause
- 16h30 Session mémorielle, avec les interventions de Michel Buthion (*Transports Publics Lausanne*), Joël Courtois (*EPITA Kremlin-Bicêtre*), Jean-Luc Dormoy (*VESTA Paris*), Claude Roche (*Consultant Paris*), et les autres contributions depuis la salle.
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Alain Berger, Sandra Bringay et Yves Demazeau pour 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/journee-hommage-j-pitrat/ . Le déjeuner est garanti à toutes les personnes qui se seront inscrites avant le 03/03/20, et seulement à celles-ci.

LIP6

SORBONNE UNIVERSITÉ

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 Paris Ile-de-France

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

Classification & IA 2019

La classification est au cœur des activités humaines ; lorsque l'on pense le monde, on l'organise et l'on classe les éléments qui le composent. En tant que discipline s'étant initialement fixés pour objet les phénomènes constitutifs de l'intelligence humaine, l'IA s'est naturellement emparée de cette problématique et a produit de très nombreuses approches pour des problèmes variés. Selon les communautés, on distingue la classification de la discrimination, la classification non supervisée de la classification supervisée. La première s'ancre dans la longue tradition de la taxonomie. La seconde, plus récente, est associée à l'essor de l'apprentissage automatique.

Cette deuxième journée CLASSIFICATION et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, organisée conjointement par l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle et la Société Francophone de Classification dans le cadre des Rencontres de la SFC 2019, vise à faire le point sur des avancées récentes aux frontières de ces communautés.

Date et Lieu

- Date 04 septembre 2019
- Lieu Centre INRIA Nancy, 615 rue du Jardin Botanique, 54600 Villers-lès-Nancy

Programme

- 13h00 Présentations de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle, par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA) et* de la Société Francophone de Classification par Mohamed Nadif *(Président de la SFC).*
- 13h30 « Structure de Treillis : panorama des aspects structurels et algorithmiques » par Karell Bertet *(Université de La Rochelle).*
- 14h30 « Construction de variables pour la classification par échantillonnage de motifs » par Lamine Diop *(Université Gaston Berger, Saint-Louis, Sénégal)*, Cheikh Talibouya Diop, Arnaud Giacometti, Dominique Li et Arnaud Soulet.
- 15h00 « Classification croisée de données tensorielles » par Rafika Boutalbi *(Université Paris 5)*, Lazhar Labiod et Mohamed Nadif.
- 15h30 « Towards a Constrained Clustering Algorithm Selection » par Guilherme Alves *(Université de Lorraine)*, Miguel Couceiro and Amedeo Napoli.
- 16h00 Pause
- 16h30 « Apprentissage et classification par méthodes collaboratives : comment choisir ses collaborateurs et qu'échanger avec eux ? » par Antoine Cornuéjols *(AgroParisTech Paris).*
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Amedeo Napoli pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Miguel Couceiro pour la Société Francophone de Classification (SFC).

Inscriptions

Les inscriptions se font via le site : https://project.inria.fr/sfc2019/inscription/.

Loria
Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications

Inria

MACS & IA 2019

Cette quatrième journée entre le GdR MACS et l'AFIA est consacrée à l'INGENIERIE / MODELISATION D'ENTREPRISE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

La journée est organisée en trois sessions consacrées à l'Industrie 4.0, aux Systèmes de Santé, et à la Dynamique de Mobilité. Les domaines d'applications des entreprises visées incluent plus particulièrement le domaine manufacturier, et ceux des transports, des services, et de la santé.

Date et Lieu

- Date 7 Novembre 2019
- Lieu Amphithéâtre De Dietrich – INSA Strasbourg – 24 boulevard Victoire – 67000 Strasbourg

Programme

- 08h30 Accueil
- 09h00 Présentations de l'AFIA par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA)* et du GdR Modélisation, Analyse et Conduite de Systèmes, par Isabelle Queinnec *(Directrice du GdR MACS)*. Introduction de la journée par Virginie Goepp, Jean-Paul Jamont, et Néjib Moalla.
- 09h25 « AI for the industry of the future: an interoperability perspective » par Hervé Panetto *(Université de Lorraine, Nancy)*
- 10h10 « CPPS et IA » par Ali Siadat *(ENSAM Metz)* et Virginie Goepp.
- 10h55 « Big Data and AI for Industry 4.0: feedbacks and lessons learned » par Rafiqul Haque *(Cognitus Paris)*
- 11h40 « Approche orientée données pour améliorer l'adhésion des patients au traitement de la PPC durant la phase d'initiation » par Jensen-Selwyn Joymangul *(Linde HomeCare France)*
- 12h25 « Ethique et IA » par Grégory Bonnet *(Université de Caen-Normandie)*
- 13h10 Déjeuner
- 14h30 « Transport Intelligent » par Flavien Balbo *(EMSE Saint Etienne)*
- 15h15 « L'IA au service de la maintenance intelligente ferroviaire : le cas du SurferLab » par Damien Trentesaux *(UPHF Valenciennes)* et Yves Sallez.
- 16h00 « Emotion artificielle et processus cognitifs de résilience » par Clément Raïevsky *(UGA Valence)*
- 16h45 Conclusions
- 17h00 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Jean-Paul Jamont pour le Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), Virginie Goepp et Néjib Moalla pour le Groupe de Travail INE (INgénierie d'Entreprise) du GdR Modélisation, Analyse et Conduite de Systèmes (MACS).

Inscriptions

L'inscription à la journée, gratuite mais obligatoire, inclut la participation au déjeuner (dans la limite des places disponibles) et est à prendre sur le site https://enquetes.univ-lyon2.fr/index.php/414923?lang=fr .

RI & IA 2019

Cette troisième journée RECHERCHE D'INFORMATION et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE prolonge les discussions entre les deux communautés sur le thème des bases de connaissances et plus particulièrement des réseaux sémantiques, graphes qui décrivent les entités du monde réel ainsi que les relations qui les lient, sans thématique particulière, autour desquels les problématiques sont nombreuses.

Date et Lieu

- Date 02 décembre 2019
- Lieu Sorbonne Université, Salle 108, Barre 44-45, 4 place Jussieu 75005 Paris

Programme

- 09h00 Accueil
- 09h30 Présentations de l'AFIA, par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA) et* de l'ARIA par Benjamin Piwowarski *(Président de ARIA).* Présentation de la journée par Haifa Zargayouna *(Université Paris 13)* et Karen Pinel-Sauvagnat *(Université Toulouse 3).*
- 09h40 « Deep learning for knowledge graphs and it's applications » par Mehwish Alam *(FIZ Karlsruhe).*
- 10h40 Pause-café
- 11h00 « Raffinement de graphes de connaissances: découverte de clés et invalidation de liens d'identité » par Fatiha Saïs *(Université Paris 11).*
- 12h00 « Amélioration de l'extraction de relation par l'utilisation de la validation de relation avec une architecture siamoise » par Jose Moreno *(Université Toulouse 3).*
- 12h30 Déjeuner
- 13h45 « Unsupervised Learning with Text » par Ludovic Denoyer *(Facebook Paris).*
- 14h45 « IDELIANCE MENTAL : Les réseaux sémantiques comme outil de travail quotidien » par Jean Rohmer *(ESILV).*
- 15h15 « Supervised Learning for the ICD-10 Coding of French Clinical Narratives » par Clément Dalloux *(Université de Rennes 1)* et al.
- 15h45 Pause-café
- 16h05 « Ancrage conceptuel du texte pour l'apprentissage de représentation: application à la recherche d'information » par Laure Soulier *(Sorbonne Université).*
- 17h05 « Construction de graphes de connaissances à partir des publications scientifiques » par Davide Buscaldi *(Université Paris 13).*
- 17h35 « Détection d'intention : application industrielle d'un projet de recherche » par Christophe Servan *(QWANT Paris).*
- 18h05 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Haifa Zargayouna pour l'AFIA et Karen Pinel-Sauvagnat pour l'ARIA, avec le soutien du Projet FUI PCU et le projet ANR COST.

Inscriptions

Les inscriptions se font sur https://ia-ri.sciencesconf.org/. L'inscription est gratuite mais obligatoire. Elle inclut la participation aux pause-café.

PS & IA 2020

La société de Philosophie des Sciences (SPS) et L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) se retrouvent pour une deuxième journée PHILOSOPHIE DES SCIENCES ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème de la prédiction et de l'explication des phénomènes sociaux.

Date et Lieu

- Date : 06 février 2020
- Lieu : TOTEM / Institut des Systèmes Complexes Paris IdF, 11 Place Nationale, 75013 Paris

Programme

- 08h30 Accueil des participants
- 09h00 Présentations de l'AFIA par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA)* et de la SPS par Francesca Merlin *(Présidente de la SPS)*. Présentation de la journée par Isabelle Drouet (*Sorbonne Université, Paris*), Robin Lamarche-Perrin *(CNRS Paris)* et Marion Worms (*Université Panthéon-Sorbonne, Paris*).
- 09h10 « Silicone prophète. L'IA face aux défis de la prédiction en sciences sociales » par Henri Galinon (*Université Clermont-Auvergne*)
- 10h10 Pause
- 10h30 « Les défis d'une aide à la décision intelligente : de la modélisation des jugements humains à l'explication des recommandations » par Wassila Ouerdane (*CentraleSupélec, Paris*)
- 11h30 « Comprendre et prédire : étude de cas sur la prédiction du vote à l'aide de modèles statistiques du langage » par Denis Bonnay (*Université Paris Nanterre*)
- 12h30 Pause
- 14h00 « Justice & Intelligence artificielle : qu'est-ce que l'informatique se propose d'apporter au droit ? » par Fabien Tarissan (*CNRS Paris*)
- 15h00 « Le succès des algorithmes prédictifs remet-il en cause notre notion de connaissance scientifique ? » par Anouk Barberousse (*Sorbonne Université Paris*)
- 16h00 Pause
- 16h30 « Pourquoi la société ne se laisse pas mettre en équations » par Pablo Jensen (*CNRS Lyon*)
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Robin Lamarche-Perrin pour l'Association Française pour Intelligence Artificielle (AFIA) et Isabelle Drouet et Marion Worms pour la Société de Philosophie des Sciences (SPS).

Inscriptions

L'inscription est gratuite mais obligatoire sur le site : https://iscpif.fr/upcomingevents/journee-philosophie-des-sciences-et-intelligence-artificielle/ . L'inscription inclut la participation aux pause-café.

Santé & IA 2020

Cette quatrième journée INFORMATIQUE MEDICALE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE fait se rencontrer les deux disciplines autour du thème de la SANTE. Les thématiques de la journée concernent le traitement intelligent de données et des connaissances en santé, les représentations et les méthodes de l'IA.

Cette journée Santé et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2020 (PFIA 2020).

Date et Lieu

- Date : 29 juin 2020
- Lieu : ESEO, 10 boulevard Jean Jeanneteau, 49100 Angers (*)

Programme

- 09h00 Ouverture de P. Staccini (*Président de AIM*) et Y. Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Fl. Mougin (*U. Bordeaux*) et L. Soualmia (*U. Rouen Normandie*)
- 09h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Apprentissage et fouille de données pour l'optimisation combinatoire: deux études de cas » par Jin-Kao Hao (*U. Angers*)
- 10h00 Pause
- 10h30 « Elémentaire mon cher Watson ? » par Jean Charlet (*APHP Paris*) et Xavier Tannier.
- 11h00 « Utilisation des graphes pour la représentation spatio-temporelle lors d'un examen d'IRM fonctionnelle cérébrale » par Aurélie Leborgne (*U. Strasbourg*) et al.
- 11h30 « Towards a mobile conversational agent for COVID-19 post quarantine psychological assistance » par Nourchene Ouerhani (*U. La Manouba*) Ahmed Maalel et Henda Ben Ghézela
- 12h00 « Diviser pour mieux classifier » par Yves Mercadier (*U. Montpellier*) Jérôme Azé et Sandra Bringay.
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « La stratégie nationale pour l'intelligence artificielle (2018-2022) : premiers bilans – engager la deuxième étape » par R. Vedel (*MINEFI Paris*)
- 15h00 Pause
- 15h30 « Literature triage services to support biocuration: from neXtProt to COVID-19 » par Patrick Ruch (*HEG/HESS Genève*)
- 16h00 « Predictive Patient Care: Visualize and Interpret Models Decisions Application to Medication Adherence » par Thomas Janssoone (*SEMEIA Paris*) et al.
- 16h30 « Exploitation de documents médicaux par les techniques d'embedding : application au typage automatique de documents » par Mikaël Dusenne (*CHU Rouen*) et al.
- 17h00 « Graph clustering for hospital communities » par Tu Ngo (*CHU Montpellier*) et al.

Organisation

Cet événement est organisé par Fleur Mougin (*U. Bordeaux*) et Lina Soualmia (*U. Rouen Normandie*) pour *l'Association Française d'Informatique Médicale (*AIM*)* et pour le Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances (SIC) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (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 : http://pfia2020.fr/home/inscriptionauxsessions/.

Internet des Objets & IA 2020

L'AFIA, en partenariat avec l'IMT, organise sa première journée « INTERNET DES OBJETS ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE » sur le thème des objets connectés aux intelligences connectées. L'objectif de cette journée est de faire le point sur l'utilisation de l'IA dans le contexte de l'Internet des Objets.

Cette journée Internet des Objets et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2020 (PFIA 2020).

Date et Lieu

- Date : 30 juin 2020
- Lieu : ESEO, 10 boulevard Jean Jeanneteau, 49100 Angers (*)

Programme

- 08h30 Ouverture de J.-Ph. Lagrange (*Directeur de la Recherche IMT*) et Y. Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par P. Albers (*ESEO Angers*) et O. Boissier (*EMSE St Etienne*).
- 09h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « *A hitchhiker's guide to Ontology* » par Fabian Suchanek (*Telecom ParisTech*).
- 10h00 Pause
- 10h30 « Reinforcement learning for telecommunication network: from Opportunistic Spectrum Access to IoTs » par Raphaël Féraud (*Orange Rennes*).
- 11h00 « IoT for Supervision and Control of Water Distribution Systems » par Henrique Donâncio (*INSA Rouen*) et L. Vercouter.
- 11h30 « SiCoPAD : Suivi interactif et connecté de patients hospitalisés à domicile » par Salma Ben Dhaou (*Normandie U. Caen*), M. Bourgais, G. Bonnet, L. Vercouter, et B. Zanuttini.
- 12h00 « Vers des collectifs d'objets connectés » par Jean-Paul Jamont (*U. Grenoble Alpes Valence*).
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Harnessing Complex Systems with Agent-based Modeling, Machine Learning and High-performance Computing » par Jonathan Ozik (*ANL Chicago*).
- 15h00 Pause
- 15h30 « Reconnaissance d'actions basée sur des modèles de segmentation » par Catherine Huyghe (*Yncréa et U. Lille*), N. Ihaddadene, Th. Haessle, et Ch. Djeraba.
- 16h00 « Context-Aware Interoperability: Application to the Path Finding Problem » par Taboada-Orozco Adrian (*U. Bourgogne Franche-Comté Dijon*), Y. Kokou et N. Christophe.
- 16h30 « Le Projet ANR CoSWoT (Constrained Semantic Web of Things) » par Frédérique Laforest (*INSA Lyon*) et M. Lefrançois.
- 17h00 « Enriching the oneM2M platform with generic AI capabilities; a proof of concept » par Emmanuel Darmois (*CommLedge Viroflay*)

Organisation

Cet événement est organisé par Patrick Albers (*ESEO Angers*) et Olivier Boissier (*EMSE St Etienne*) pour l'Institut Mines Telecom (IMT) et pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (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 : http://pfia2020.fr/home/inscriptionauxsessions/.

Agronomie & IA 2020

L'AFIA, en partenariat avec l'INRAE, organise sa première journée « AGRONOMIE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ». L'objectif de favoriser les échanges autour des applications dans les domaines de l'agriculture et de l'agroalimentaire qu'offrent les méthodes d'intelligence artificielle.

Cette journée Agronomie et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2020 (PFIA 2020).

Date et Lieu

- Date : 01 juillet 2020
- Lieu : ESEO, 10 boulevard Jean Jeanneteau, 49100 Angers (*)

Programme

- 08h30 Ouverture de H. Monod (*Chef du Département MathNum INRAE*) et Y. Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Th. Guyet (*Institut Agro Rennes*) et D. Rousseau (*U. Angers*).
- 09h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Experiences in Setting up Ontology Governance Models with Multiple Stakeholders » par Oscar Corcho (*U. Politecnica Madrid*).
- 10h00 Pause
- 10h30 « Livre Blanc sur le numérique en agriculture » par Ludovic Brossard (*INRAE Rennes).*
- 11h00 « Programmation par contraintes appliquée aux problèmes agro-environnementaux » par Philippe Vismara (*Montpellier SupAgro*).
- 11h30 « AgroPortal: a Vocabulary and Ontology Repository for Agronomy » par Clément Jonquet (*U. Montpellier*).
- 11h50 « Représentation des itinéraires culturaux en maraîchage » par Florence Amardeilh (*Elzeard.co Pessac*).
- 12h10 « D2KAB project taking off: Data to Knowledge in Agronomy and Biodiversity » par Sophie Aubin (*INRAE Versailles*) et al.
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Traitement des réseaux de neurones profonds sur puce » par Ghouthi Boukli Hacene (*IMT Atlantique Brest*).
- 15h00 Pause
- 15h30 « Apprentissage Automatique et imagerie agricole embarquée » par Christian Germain (*Bordeaux Science Agro*) et al.
- 16h10 « Remontée automatique du comportement des vaches laitières » par Lucile Riaboff (ESEOTech/*Terrena innovation Angers*) et al.
- 16h50 « Apprentissage profond pour la cartographie de l'occupation du sol à partir de séries temporelles d'image satellitaires » par Dino Ienco (*INRAE Montpellier*)

Organisation

Cet événement est organisé par Thomas Guyet (*Institut Agro Rennes*) et David Rousseau (*U. Angers*) pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), en partenariat avec l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'Alimentation, et l'Environnement (INRAE) et son département MathNum.

Inscriptions

(*) Pour raisons sanitaires, cet événement est finalement virtualisé, et la session d'ouverture, annulée. L'inscription est gratuite mais obligatoire sur le site : http://pfia2020.fr/home/inscriptionauxsessions/.

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/.

PFIA 2020
Plate Forme Intelligence Artificielle
Angers
29 juin - 3 juillet 2020
Conférences et événements hébergés
• Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA)
Présidents : Stephan Brunessaux (Airbus Defense and Space) & Amal Elfallah-Seghrouchni (LIP6)
• Conférence Nationale en Intelligence Artificielle (CNIA)
Présidente : Isabelle Bloch (Télécom ParisTech)
• Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC)
Président : Sébastien Ferré (IRISA)
• Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage (JFPDA)
Président : Frédéric Maris (IRIT)
• Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)
Président : Nicolas Sabouret (LIMSI)
• Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA)
Président : Alexandre Niveau (GREYC)
• Tutoriels
Responsable : Gauthier Picard (EMSE)
• Journées thématiques pluridisciplinaires
Responsable : Sandra Bringay (LIRMM)
©Angers Loire Tourisme
Organisée par
AfIA
ESEO
LERIA
université angers
pfia2020.fr

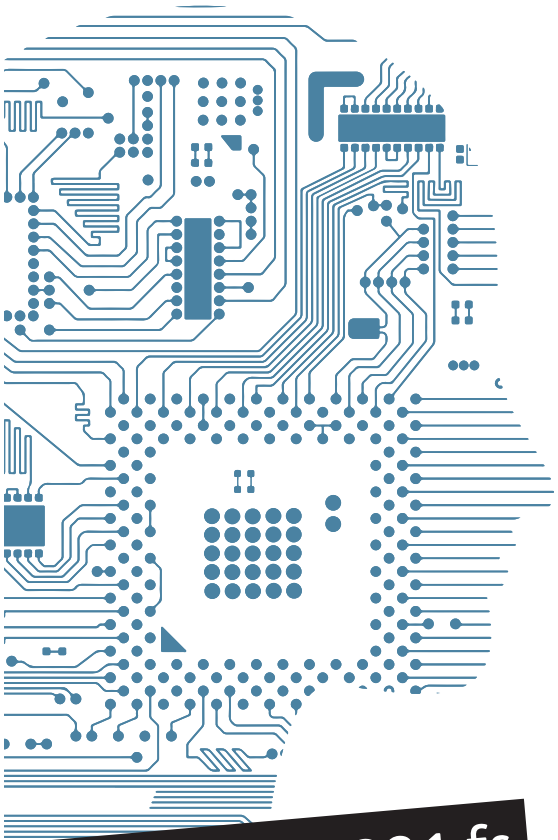
BORDEAUX 2021

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

En partenariat avec