



Département d'évaluation  
de la recherche

CRIL-CNRS UMR 8188 Université d'Artois  
Dossier d'autoévaluation des unités de recherche

**CAMPAGNE D'EVALUATION 2018-2019**

Vague E

**Informations générales**

Nom de l'unité : Centre de Recherche en Informatique de Lens  
Acronyme : CRIL  
Domaine et sous-domaine dans la nomenclature du Hcéres : ST6\_1 Informatique  
Directeur pour le contrat en cours : Eric Grégoire  
Directeur (ou du porteur de projet) pour le contrat à venir : Pierre Marquis

**Type de demande :**

Renouvellement à l'identique

Restructuration

Création ex *nihilo*

## Établissements et organismes de rattachement

Liste des établissements et organismes tutelles de l'unité de recherche **pour le contrat en cours** et **pour le prochain contrat** (tutelles).

Contrat en cours :

- Université d'Artois
- CNRS

Prochain contrat :

- Université d'Artois
- CNRS

**Choix de l'évaluation interdisciplinaire de l'unité de recherche (ou d'une ou plusieurs équipes internes) :**

Oui

Non

## Dossier d'autoévaluation

### 1 - Présentation de l'unité

#### Introduction

**Historique, localisation de l'unité** Le CRIL est implanté dans le Pas-de-Calais à Lens, à la fois sur les sites de l'UFR des Sciences et de l'IUT de Lens, deux composantes de l'université d'Artois distantes l'une de l'autre de mille cinq cent mètres. Il constitue l'unique UMR contractualisée de façon bilatérale entre le CNRS et l'université d'Artois, université multi-polaire et multi-disciplinaire de 11 000 étudiants créée au début des années 1990. L'implantation et l'essor de structures universitaires et de recherche dans l'ancien bassin minier lensois, en particulier dans le domaine de l'informatique, constitue un outil stratégique pour la reconversion de ce territoire en situation économique délicate (la difficulté du contexte socio-économique local transparait par exemple dans le pourcentage d'étudiants boursiers à l'université d'Artois, **de l'ordre de 42% en 2017, 48% en sciences**). L'offre de formation universitaire en informatique comporte plusieurs filières corrélées : DUT, licences professionnelles et générale, master, doctorat. Parallèlement au développement des enseignements universitaires en informatique, le CRIL s'est soigneusement bâti depuis 1994 avec pour objectif de constituer un pôle d'excellence scientifique de visibilité internationale sur une thématique ciblée, l'intelligence artificielle et ses applications, complémentaire à celles des autres laboratoires de recherche en informatique de la région. Associé au CNRS avec un statut de FRE en 2002, le CRIL est devenu UMR en 2008.

**Structuration de l'unité** Avoir concentré plus de 30 enseignants-chercheurs et chercheurs permanents dans des thématiques proches résulte d'une politique volontariste de structuration de la recherche. La question d'organiser des recherches dispersées conduites par des spécialistes aux intérêts distincts ne se pose donc pas ici. Chaque chercheur de l'UMR est concerné par la recherche de ses collègues et pourrait travailler avec chacun de ceux-ci. C'est un point qui différencie le CRIL d'autres laboratoires d'informatique dont la structuration en équipes traduit la co-existence de groupes aux préoccupations scientifiques qui n'ont pas toujours une intersection large. Cette singularité du CRIL l'a conduit à se munir d'une organisation spécifique, autour de deux axes thématiques complémentaires bénéficiant d'une fertilisation croisée forte, qui sont :

- Représentation des connaissances et raisonnements (RCR),
- Algorithmes pour l'inférence et contraintes (AIC).

Ces deux axes ne constituent pas des équipes au sens premier du terme, dans la mesure notamment où certains membres du CRIL sont actifs au sein des deux axes et où des sujets de recherche sont communs. Les axes n'ont ni budget propre ni séminaires propres. La taille de chacun des axes fait que l'animation scientifique n'a pas besoin d'une formalisation particulière (et de la lourdeur qu'elle induirait), elle se fait souvent par petits groupes, suite à des discussions autour d'un café ou d'un thé (dans nos salles de convivialité, on trouve toujours un tableau blanc). La nature des axes explique pourquoi nous avons demandé à ce que ceux-ci soient évalués seulement selon les critères I (« qualité des produits et activités de recherche ») et III (« projet scientifique à cinq ans ») de l'Hcéres, mais pas selon le critère II (« organisation et vie de l'axe »). Dans le même ordre d'idée, nous ne dissertons pas non plus dans la suite du document de l'écosystème de chaque axe, ni ne présentons une analyse SWOT par axe (les éléments correspondants sont décrits au niveau du laboratoire entier et sont partagés par ses deux axes). Pour la même raison, dans l'annexe 4 de chacun des deux axes, nous n'avons pas renseigné les rubriques II et III qui traitent respectivement d'interaction avec l'écosystème et de l'implication dans la formation par la recherche (ces rubriques sont complétées seulement pour le laboratoire dans sa globalité).

Au vu de la spécificité du laboratoire et de sa taille actuelle, le CRIL est convaincu qu'en ce qui le concerne, cette structuration en axes thématiques a été et demeure plus productive que celle qui aurait pu résulter d'une éventuelle scission en équipes. Il peut être éclairant de noter que tous les enseignants-chercheurs du CRIL ont été recrutés sur la base du thème global du laboratoire (l'intelligence artificielle), indépendamment de l'axe dans lequel leurs travaux pourraient s'inscrire de manière privilégiée. Pour la lisibilité de ce rapport et afin d'éviter les répétitions, nous avons veillé néanmoins à ce que chaque membre du CRIL ne se trouve affiché dans l'organigramme qu'au sein d'un seul axe.

### Tableau des effectifs et moyens de l'unité

**Effectifs** Au 30 juin 2018, le CRIL comprend 28 enseignants-chercheurs permanents (10 PR, 18 MCF) et 4 chercheurs CNRS à temps plein (1 DR, 3 CR). Il bénéficie du soutien de 3 ITA CNRS (1 IR informatique, 1 secrétaire-gestionnaire AI et 1 secrétaire-gestionnaire TECN) et de 2 BIATSS de l'université d'Artois (1 IGE informatique et 1 secrétaire-gestionnaire ADJT à 80%). Les effectifs du laboratoire comportent également 2 PRAG (titulaires d'un doctorat en informatique), 14 doctorants, 4 post-doctorants, 3 IR ou IGR contractuels (tous titulaires d'un doctorat), ainsi qu'1 invité (comptabilisé car présent pour un an et publiant comme membre du CRIL).

Table 1: Évolution des effectifs E/C et chercheurs permanents

Date	PR	MCF	Chaire CNRS	Total E/C	DR CNRS	CR CNRS	Total C CNRS	Total
01/09/2013	10	15	1	26	1	1	2	28
30/06/2018	10	18	0	28	1	3	4	32

Table 2: Évolution des effectifs doctorants, PRAG et chercheurs non permanents

Date	Doctorants	PRAG (doctorat informatique)	autres CDD chercheurs	Total
01/09/2013	18		2	23
30/06/2018	14		2	20

Table 3: Évolution des effectifs ITA et BIATSS

Date	ITA gestion	ITA technique	BIATSS gestion	BIATSS technique	Total
01/09/2013	1 CDD AI + 1 TCN	1 IR	1 ADJT	1 IGE + 1 IGR	6
30/06/2018	1 AI + 1 TCN	1 IR	1 ADJT	1 IGE + 1 CDD IGR	6

En ce qui concerne les membres permanents du laboratoire, ces chiffres traduisent les évolutions suivantes par rapport au précédent contrat :

- départ d'un MCF (Jean-Luc Coquidé, parti en retraite) et arrivée de 3 MCF (Jean-Marie Lagniez, Ivan Varzinczak et Zied Bouraoui) ;
- la chaire CNRS de Tiago de Lima s'est terminée le 30/08/2014 : Tiago apparaît maintenant dans les effectifs MCF ;
- arrivée de 2 CR (Stefan Mengel et Anastasia Paparrizou) ;
- départ d'une IGR (Stéphanie Roussel, recrutée à l'ONERA Toulouse). Le support financier correspondant est utilisé depuis lors pour financer un IGR contractuel : le poste d'IGR correspondant est mis au concours cette année et le CRIL en sera bénéficiaire si le concours est fructueux ;
- départ de l'administrateur du laboratoire AI (Manuel Demont) et arrivée d'une secrétaire-gestionnaire AI, maintenant administratrice du laboratoire (Virginie Delahaye). Wassila Seroutou CDD AI, a été recrutée du 1/9/2013 au 31/3/2014 sur financement INS2I pour assurer l'intérim ;
- départ d'une secrétaire-gestionnaire TECN (Nadine Kucharski, mutée) et arrivée d'un secrétaire-gestionnaire TECN (Frédéric Renard) ;
- promotion de 3 collègues MCF en PR en septembre 2013 (information déjà présentée à la dernière évaluation).

À titre de bilan, depuis le précédent contrat, le CRIL a donc vu son nombre d'enseignants-chercheurs permanents augmenter de 2 unités et son nombre de chercheurs permanents augmenter de 2 unités également, soit un doublement du nombre de chercheurs affectés au laboratoire. Cette augmentation témoigne d'un soutien clair du CNRS dont nous sommes très heureux. Le nombre de personnels techniques et administratifs est resté stable. Le nombre de doctorants (égal à 18 à la date de dépôt du rapport d'activités précédent) est resté à peu près constant lui aussi (le nombre fluctuant légèrement selon l'instant où la mesure est réalisée).

Notons aussi qu'un collègue MCF (Stéphane Cardon) est depuis plusieurs années en détachement à l'Ecole Militaire

Spéciale de St Cyr et le support correspondant revient au CRIL (sous forme d'un poste d'ATER) depuis lors. Par ailleurs, un collègue PR (Hachemi Bennaceur) en disponibilité depuis presque dix ans sera conduit à réintégrer l'université d'Artois à la rentrée 2019/2020 ou à démissionner. Son poste devrait rester en informatique et permettre un nouveau recrutement PR au CRIL. Au delà de ces postes, les possibilités de recrutements supplémentaires de permanents seront sans doute très réduites dans les années à venir.

**Moyens de l'unité** Le CRIL fonctionne sous délégation de gestion au profit du CNRS et souhaite que ce mode de fonctionnement soit reconduit.

Comme nous l'avons déjà précisé, les axes thématiques ne disposent pas de budgets spécifiques et dédiés (le conseil de laboratoire a écarté une proposition du directeur qui serait allée dans ce sens parce qu'elle aurait pu constituer involontairement un acte non souhaité dans la voie de la création d'équipes au sein du laboratoire). Les moyens financiers récurrents sont mutualisés. Les porteurs de projets et de contrats gèrent les budgets qui y sont associés. Le CRIL prélève un impôt de solidarité de 15% (hors masse salariale) sur les activités contractuelles qui l'y autorisent. Dans un souci de solidarité interne, il est demandé aux bénéficiaires de sources externes de financement d'éviter de trop solliciter le budget mutualisé.

Le budget annuel moyen consolidé pour la période 2015-2017 du CRIL s'élève à 3 803 K€/an. Le budget hors salaires, et donc mobilisable, s'est élevé annuellement en moyenne à 415 K€. Ce budget mobilisable se ventile comme suit : quinquennal Artois + BQR (30 %), DGF CNRS + opérations diverses (14 %), ANR (7 %), contrats européens (19 %), contrats avec le secteur privé et OSEO (23 %), Région (4 %), divers (3 %).

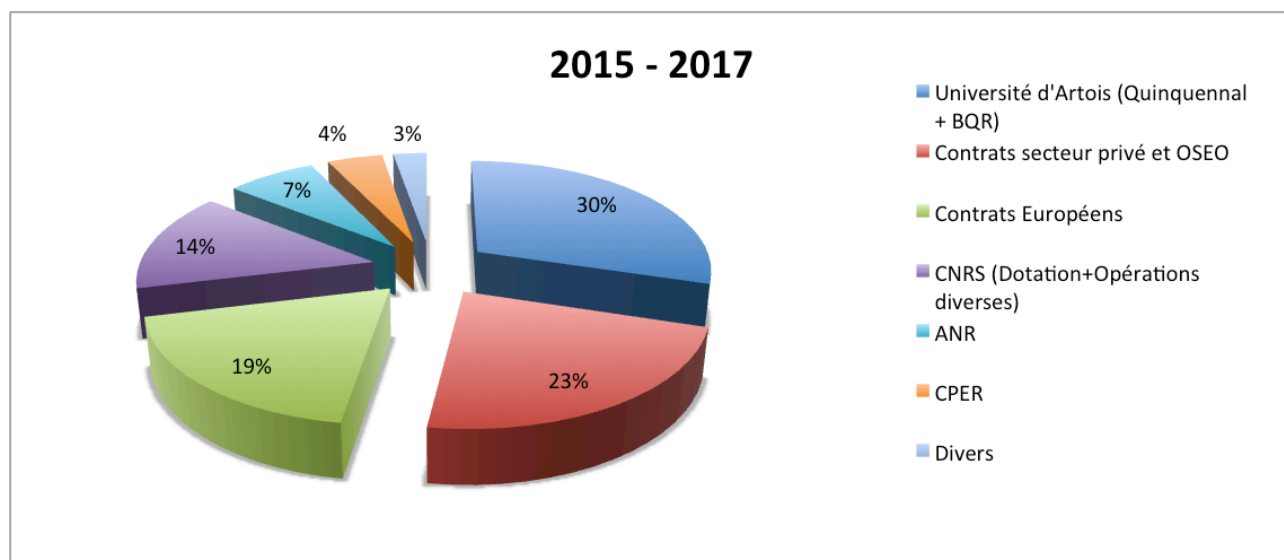


Figure 1: Recettes du laboratoire (moyenne sur 2015-2017)

En 2017, les salaires des personnels côté université d'Artois et côté CNRS se sont élevés à respectivement 2 812 K€ et 562 K€. Hors dépenses de personnels permanents et/ou prises en charge par nos tutelles, nos ressources sont affectées principalement aux frais de missions (49 %), aux salaires des personnels sur ressources propres (18 %), aux équipements (16 %) et aux petits matériels et consommables divers (17 %). La part des missions dans les dépenses peut paraître importante, notamment par rapport à la dernière évaluation (41 %). Cette différence s'explique par le fait que dans le projet AniAge (décrit ci-après) les indemnités de séjour des chercheurs accueillis dans le cadre de ce projet sont considérées comme des missions et représentent 16% des frais de mission.

Le CRIL dispose de moyens matériels suffisants pour choisir avec soin les activités de recherche contractualisées avec le secteur privé.

Le CRIL dispose en propre d'un cluster de calculs (voir annexe 2) en cours de jouvence. Ce cluster est essentiel à nos travaux expérimentaux de conception d'algorithmes performants de résolution d'instances de problèmes NP-difficiles. Les principales dépenses d'équipement dont la jouvence du cluster de calcul sont réalisées sur fonds propres du laboratoire et avec le soutien de l'université d'Artois, ainsi que d'opérations contractualisées avec la Région Hauts-de-France, le FEDER et l'État au sein des CPER.

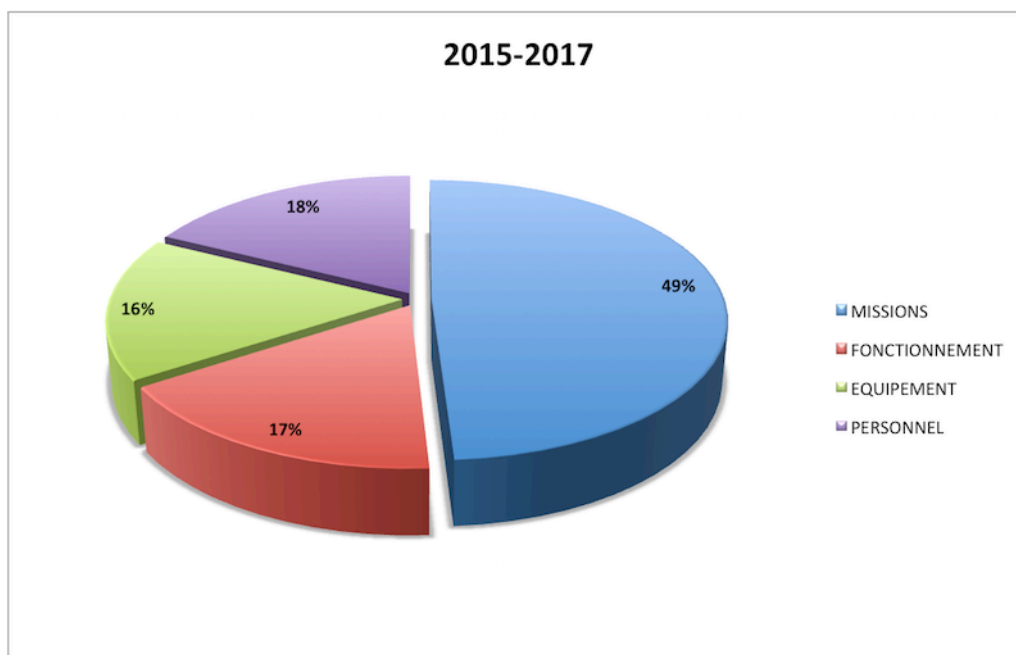


Figure 2: Dépenses du laboratoire (moyenne sur 2015-2017)

### Politique scientifique

Le profil d'activités du CRIL, depuis ses débuts, est tourné vers la recherche amont et le développement logiciel. Faisant suite aux recommandations de l'AERES en 2013, tout en gardant une orientation fortement fondamentale et une production significative de logiciels (décrites dans la suite du document), un effort notable vers des applications phares en lien avec des problèmes industriels ou sociétaux a été entrepris. On notera, en particulier, le projet H2020-MCSA-RISE 2015 « AniAge » « *High Dimensional Heterogeneous Data based Animation Techniques for Southeast Asian Intangible Cultural Heritage Digital Content* » tourné vers la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel d'Asie du Sud-Est, mais aussi le projet QDoSSI - CNRS, Défi Mastodons « Qualité des Données multi-Sources, un double défi pour les sciences Sociales et les sciences de l'Informatique » qui traite, depuis 2016, de la qualité des données des parcours migratoires, et en particulier de l'implication des réseaux de traite, des relations entre le droit des migrants et les politiques migratoires, des enjeux sociaux et politiques de la mobilité des mineur(e)s. Toujours pour aller dans le sens des recommandations reçues, le CRIL s'est également ouvert à des thématiques connexes à celles considérées jusque là pour élargir le spectre de compétences à des problématiques nouvelles, comme la fouille de données à base de contraintes ou le *General Game Playing* (pour n'en citer que deux). Les recrutements d'enseignants-chercheurs réalisés (Jean-Marie Lagniez, Ivan Varzinczak, Zied Bouraoui) et l'affectation de chercheurs CNRS dont nous avons pu bénéficier (Stefan Mengel, Anastasia Paparrizou) ont permis de renforcer les compétences existantes au CRIL et d'en apporter de nouvelles, sur plusieurs volets tant théoriques que pratiques. La politique contractuelle a aussi été diversifiée (avec le projet européen AniAge, mais également suite au financement d'un bon nombre de projets exploratoires de type PEPS).

## 2 - Présentation de l'écosystème recherche de l'unité

L'écosystème dans lequel le CRIL s'inscrit a fait l'objet d'un nombre important de mutations au cours des dernières années du contrat qui s'achève. La création de l'université de Lille (regroupant les trois universités lilloises qui existaient jusqu'alors) a modifié l'équilibre des forces au niveau régional et s'est vu accompagnée de la création d'un réseau des universités périphériques (incluant l'université d'Artois). La Région a également changé de périmètre, du Nord/Pas-de-Calais aux Hauts-de-France, conduisant à l'ajout d'acteurs importants (université de Picardie / Jules Verne, université de technologie de Compiègne) qui peuvent constituer dès à présent des partenaires intéressants pour le montage de projets. Ce changement impacte de facto aussi le rôle de la communauté d'universités et d'établissements (ComUE Lille Nord de France), qui n'inclut pas jusqu'ici ces nouveaux acteurs.

Tous ces changements s'accompagnent d'interrogations mais aussi d'opportunités à saisir et de collaborations à construire ou à renforcer. L'I-SITE (« Initiatives-Science – Innovation – Territoires – Economie ») obtenu par l'université de Lille constitue une voie possible pour développer des activités de recherche conjointes avec les collègues lillois. Les réseaux thématiques et stratégiques de recherche mis en place par la ComUE Lille Nord de France (en particulier celui portant sur les STIC et les mathématiques, auquel Pierre Marquis participe pour l'université d'Artois) auront un rôle à jouer dans la définition des futures orientations régionales de recherche. La mise en place d'une structure fédérative de recherche « Numérique et patrimoine » au niveau régional, portée par nos collègues amiénois, pourra aussi ouvrir des perspectives de recherche communes.

Diverses initiatives ont aussi vu le jour localement. À l'université d'Artois, un domaine d'intérêt majeur (DIM) portant sur l'intelligence artificielle et dirigé par un membre du CRIL (Christophe Lecoutre) a ainsi été créé. Un MuséoLab (un FabLab centré sur la muséologie et hébergé par l'incubateur Louvre-Lens Vallée) a été mis en place dans le cadre du projet CPER « MAUVE : MédiAtions VisuElles : culture numérique et création » (2014-2020) auquel le CRIL participe. Un Cluster Senior, étudiant la problématique de l'aménagement et la réhabilitation du logement des personnes âgées mais aussi celle des services permettant leur maintien à domicile, a été créé à l'initiative de la Chambre de Commerce et d'Industrie de l'Artois. Toutes ces initiatives fournissent un contexte propice au développement de recherches pluridisciplinaires auxquelles le CRIL pourra apporter ses compétences et valoriser ses travaux. Par exemple, pour le Cluster Senior, le projet prévu est de développer un logiciel de supervision et de recommandation d'activités à base d'analyse de trace et d'agenda et ayant pour finalité l'aide au suivi médical et au maintien du lien social (les recommandations émises seront des « alertes » comme « N'oublie pas de prendre ton médicament à 18h » ou « Il y a deux semaines que tu n'as pas donné de nouvelles à ton ami Lulu du club de belote ; passe-lui un petit coup de fil »).

### 3 - Produits et activités de recherche

#### Bilan scientifique

L'ensemble des publications du laboratoire pendant la période de référence est disponible en ligne.

Le CRIL est un laboratoire reconnu internationalement pour ses travaux et ses développements logiciels dans son domaine de recherche. Les chiffres montrent que l'activité de production scientifique du CRIL (publications et logiciels produits) a été soutenue pendant la période qui s'achève. Avant de les présenter, débutons par le rappel d'un fait : il est bien connu que les communautés de chercheurs relevant de sous-domaines distincts de l'informatique ont des pratiques de publication qui diffèrent. Ainsi, les chercheurs en intelligence artificielle publient typiquement beaucoup plus dans les actes de conférences que dans des revues. Les CRILiens, en tant que chercheurs en intelligence artificielle, se conforment aux usages de leur communauté scientifique. Le dernier décompte des publications du CRIL réalisé le 20 juin 2018 indiquait ainsi 58 articles dans des revues internationales et 240 communications dans les actes de conférences internationales. L'ensemble représente 298 publications internationales, ce qui pour 32 chercheurs ou enseignants-chercheurs permanents pour une période d'évaluation de 5,5 ans donne un taux de publication internationale supérieur à 1,68 par CRILien et par an (à rapprocher du taux plancher de 0,5 par enseignant-chercheur et par an ou de 1 par chercheur et par an, qui étaient fournis dans le passé par le Ministère comme des valeurs de repère pour déterminer qui est produisant et qui ne l'est pas).

Evidemment, un tel bilan quantitatif reste peu informatif, il témoigne essentiellement du fait que les CRILiens sont productifs. Toutefois, c'est la qualité qui doit compter. De ce point de vue, le choix des supports de publication retenus pour publier les résultats de nos recherches et la performance des programmes développés au CRIL lors des compétitions auxquelles ils participent témoignent de la visibilité internationale du laboratoire. Ainsi, la stratégie de publications des chercheurs et enseignants-chercheurs du CRIL consiste, pour leur très grande majorité, à viser prioritairement les supports de publication les plus prestigieux du domaine au niveau international (comme AIJ et JAIR pour les revues généralistes, Constraints, JAR, FSS et JLC pour les revues plus spécialisées, IJCAI, AAI, ECAI pour les conférences généralistes, KR, AAMAS, UAI, CP, SAT, ou encore JELIA pour les conférences plus spécialisées). Tous ces supports de publication sont classés A\* ou A dans le classement CORE 2018 pour les conférences et ERA 2010 pour les revues. Si ces classements méritent d'être relativisés (tout classement ayant forcément un côté réducteur), ceux-ci ont le double avantage d'être à la fois très en phase avec notre perception des meilleures revues et

des conférences internationales du domaine, et d'avoir été proposés par d'autres (nous évitant ainsi de devoir justifier la pertinence d'un classement *ad hoc*).

Pour respecter les contraintes imposées par l'Hcéres, nous n'avons fait figurer dans la sélection de 20% de publications donnée dans les annexes 4 (celle pour le laboratoire en entier, celle pour l'axe RCR et celle pour l'axe AIC) que des supports classés A\* ou A dans ERA 2010 / CORE 2018. Nous avons dû opérer une sélection assez sévère et finalement quelque peu arbitraire pour lister dans l'annexe 4 pour le laboratoire seulement 12 articles de revues internationales et 48 communications dans des actes de conférences internationales (en arrondissant chaque fois à l'entier supérieur). En effet, sur les 298 publications internationales mentionnées ci-avant, plus de 120 ont été publiées dans des supports A\* ou A, nous avons donc fait le choix de nous limiter en priorité aux supports classés A\*. Comme leur nombre excède encore 60 publications, nous avons laissé de côté plusieurs communications publiées dans des actes de conférence A\* parmi les plus anciennes (entre 2013 et 2015).

Notons ici que le choix opéré induit un biais certain entre les deux axes, dans la mesure où les principales conférences spécialisées où les CRILiens publient côté RCR (à savoir KR et UAI) sont évaluées A\* dans CORE 2018, alors que les principales conférences spécialisées où les CRILiens publient côté AIC (à savoir CP et SAT) sont évaluées A dans ce classement (et n'ont donc pas été retenues dans l'annexe 4). Notons enfin que pour la période de référence, 25 enseignants-chercheurs ou chercheurs du CRIL figurent parmi les auteurs d'au moins une publication dans un support de rang A\* ou A, ce qui montre que les meilleures publications du CRIL ne sont pas l'affaire de quelques-uns seulement et que le CRIL possède, via ses permanents, une assise scientifique solide.

Les travaux ayant donné lieu à l'ensemble des publications retenues sont décrits dans la suite du rapport, dans les sections dévolues aux deux axes. Afin d'éviter de donner une vue trop partielle et réductrice des activités de recherche conduites au CRIL pendant la période de référence, nous avons néanmoins opté pour décrire sommairement les travaux ayant conduit à au moins une publication de rang A\* ou A selon ERA 2010 / CORE 2018 (même si la ou les référence(s) bibliographique(s) correspondante(s) sont occultées et ne figurent donc pas dans l'annexe 4 afin de respecter les consignes). Notons enfin que les CRILiens publient aussi dans des revues ou conférences internationales moins bien classées dans ERA 2010 / CORE 2018 lorsqu'elles ont « pignon sur rue ». Nous ne négligeons pas non plus les ateliers spécialisés, qui sont des lieux de rencontre et de discussion fort utiles, et les conférences nationales.

Les logiciels développés au CRIL ont aussi un impact important dans nos communautés de recherche et au delà de celles-ci. C'est le cas par exemple de glucose, développé conjointement par des membres du CRIL et du LaBRI, qui est un des solveurs SAT étalons actuels dans la communauté SAT (avec Lingeling d'Armin Biere). C'est souvent ce solveur qui est utilisé comme moteur dans les applications basées sur SAT. C'est aussi le cas de Sat4j, qui est utilisé essentiellement comme solveur SAT dans la communauté du génie logiciel, et comme solveur de problème d'optimisation booléenne dans la communauté SAT. Son intégration dans Eclipse en juin 2008 en fait le solveur SAT le plus diffusé dans le monde. L'intérêt académique de ces logiciels est mesurable par le nombre de citations des articles les présentant : plus de 400 pour chacun d'eux.

Le CRIL a, par ailleurs, joué un rôle important dans les compétitions internationales de logiciels : de nombreuses compétitions ont été initiées, organisées par des membres du CRIL (SAT, QBF, PBO, XCSP). Régulièrement, des logiciels du CRIL sont primés dans ces compétitions. On retrouve régulièrement glucose dans les premières places de la compétition SAT depuis 2009 par exemple. On notera aussi des logiciels qui ne sont pas « juste » des solveurs de contraintes et qui ont également primés dans des compétitions internationales récentes. C'est le cas de CoQuiAAS, qui a remporté la première compétition d'argumentation en 2015 (voir aussi le fait marquant concernant le logiciel Woodstock, décrit ci-après).

La visibilité internationale du CRIL se manifeste également par la participation récurrente de ses membres aux comités de programme des conférences de référence du domaine, incluant pour la période de référence, la co-présidence de comités de programme (SAT'16), mais aussi par l'organisation de conférences ou ateliers, comme IEA/AIE'17, CP'18 et ses ateliers satellites, ou encore par l'organisation et l'élaboration du programme scientifique de l'école ACAI'15 de l'association européenne d'IA (ECCAI, maintenant EurAI). Une synthèse des participations des CRILiens aux comités de programme des principales conférences internationales en intelligence artificielle est fournie plus loin dans le document (analyse SWOT).

Du point de vue scientifique, la période 2013-2018 a été marquée par des activités de recherche sur des sujets non abordés jusqu'alors (comme déjà précisé à la section 1, paragraphe « politique scientifique ») mais aussi une évolution du prisme selon lequel les sujets sont étudiés, avec plus de travaux de nature algorithmique dans l'axe RCR (les modèles étant de mieux en mieux calés) et, pour l'axe AIC, un tournant vers la résolution de problèmes au delà de SAT/CSP, alors que SAT/CSP étaient jusqu'alors les thèmes centraux de cet axe. Les performances



pratiques des solveurs actuels pour SAT/CSP permettent, en effet, d'envisager maintenant la résolution pratique de problèmes « *Beyond NP* » (et on trouve toute une palette de problèmes d'intérêt pour les deux axes du CRIL dans cette catégorie).

Pour conduire ses activités, le CRIL s'appuie notamment sur ses doctorants (dont l'effectif se situe typiquement entre 15 et 20 au premier janvier de chaque année), qu'il s'agit de former à la recherche par la recherche. Vingt-neuf thèses encadrées par des CRILiens ont ainsi été soutenues pendant la période de référence, avec une durée moyenne de 40,6 mois. Nous nous efforçons de préparer au mieux les doctorants que nous accueillons au laboratoire, en fonction de leurs objectifs professionnels, et nous les accompagnons si possible au quotidien sur la voie de la recherche. Nous poussons nos doctorants à une certaine exigence et au choix de la qualité sur la quantité. Nous les conseillons sur le choix des supports où il convient de publier (et surtout sur l'identification de ceux qu'il faut éviter). Factuellement, nous ne connaissons aucun cas d'ancien doctorant qui, intéressé par une carrière académique et candidat à la qualification aux fonctions de maître de conférences en section informatique (CNU 27) aurait essuyé un échec à une demande de qualification entre 2013 et 2018. Un autre indicateur qualitatif est le nombre de doctorants qui ont publié pendant la préparation de leur thèse dans un support classé A\* ou A dans ERA 2010 / CORE 2018 et qui se monte à dix-huit (sachant que parmi les onze doctorants restants, cet objectif a parfois été atteint après la soutenance et que les onze doctorants en question ont été en grande majorité des étudiants ayant préparé leur doctorat dans le cadre d'une co-tutelle et qu'étant forcément moins présents pour cette raison, ils ont aussi moins bénéficié du soutien et des conseils de leur(s) encadrant(s) côté CRIL). Pour nos doctorants, la participation aux conférences nationales d'intelligence artificielle nous semble un point important. Les permanents du CRIL participent d'ailleurs très largement et depuis longtemps tant aux comités de programme que d'organisation de ces conférences. Ces conférences nationales (mais aussi les écoles thématiques) permettent aux doctorants de connaître et de se faire connaître par la communauté nationale de leur domaine de recherche, de nouer des contacts avec d'autres chercheurs, confirmés ou non, de se faire repérer par de futurs employeurs. Nous incitons ainsi (et finançons de façon récurrente) nos doctorants à participer à de tels événements, même dans les rares cas où ils n'ont pas de communications à y présenter. Nous accueillons également au CRIL chaque année des étudiants de master, tout particulièrement ceux du master d'informatique, parcours IA de l'université d'Artois, qui a été créé par des collègues du CRIL et est encore aujourd'hui piloté par des CRILiens. Dans le cadre de leur formation, ces étudiants réalisent un stage de recherche au laboratoire, qui compte pour la réussite au master et leur permet de se faire une idée de la nature d'un travail de recherche. Ce stage permet également aux encadrants d'évaluer les aptitudes des étudiants à cet exercice. Les meilleurs d'entre eux alimentent chaque année en partie notre vivier de doctorants.

Nous donnons maintenant quelques éléments d'explication sur la façon dont ce document d'évaluation a été conçu (et qui impacte forcément la lecture que l'on peut en avoir) : pour l'agrément du lecteur, nous nous sommes efforcés de minimiser les redites entre les parties concernant le laboratoire dans sa globalité (par exemple, nous ne reprenons pas parmi les points forts dans l'analyse SWOT les faits marquants listés ci-après), mais aussi celles qui résulteraient naturellement des liens d'hyponymie existant entre le laboratoire et ses axes. Une exception à ce principe est l'annexe 4 dont le contenu est de toute façon, par nature, factuel et énumératif. Ainsi, l'annexe 4 pour le laboratoire est essentiellement la somme des annexes 4 de chacun des deux axes (auxquelles sont quand même ajoutées les rubriques II - Interaction avec l'environnement, impacts sur l'économie, la société, la culture, la santé et III - Implication dans la formation par la recherche).

## Faits marquants

Voici quelques faits notables pour la période de référence. Nous nous limitons ici comme il se doit à des événements marquants et ponctuels.

- 2018 : un quatrième domaine d'intérêt majeur (DIM), portant sur l'intelligence artificielle, est créé à l'université d'Artois. Le CRIL y joue un rôle central. Le DIM IA est piloté par un enseignant-chercheur du CRIL (Christophe Lecoutre).
- 2017 : Pierre Marquis devient membre senior de l'Institut Universitaire de France.
- 2016 : le logiciel Woodstock développé au CRIL devient champion du monde de « *General Game Playing* »
- 2015 : le CRIL a le plaisir de voir un de ses membres (Salem Benferhat) devenir *EurAI Fellow*. Cette distinction honore un nombre restreint de chercheurs européens en IA (au plus 3% du nombre total d'adhérents de la société savante participant à l'association européenne d'IA - pour la France, il s'agit de l'association française pour l'intelligence artificielle - AFIA).

- 2015 : un accord de coopération internationale est établi avec le *National Institute of Informatics*, Tokyo. Il fait suite aux travaux conduits avec Inoue-sensei (Prof. Katsumi Inoue) et son équipe, et offre un cadre formel pour une collaboration plus poussée.
- 2015 : le CRIL est sélectionné par l'EurAI pour organiser son école d'été « *Advanced Course on Artificial Intelligence* » (ACAI) et élaborer son programme scientifique. **L'école s'est déroulée du 26 au 30 octobre 2015 à Lille.**

## 4 - Organisation et vie de l'unité

### Pilotage, animation, organisation de l'unité

Les instances du laboratoire comportent un conseil de laboratoire et une assemblée générale, laquelle se réunit au moins une fois par an. Les décisions importantes sont prises par le directeur après avis du conseil de laboratoire. Le CRIL fonctionne sous délégation de gestion au profit du CNRS, expérience absolument positive dont nous demandons la reconduction. L'ensemble des personnels ITA et BIATSS sont regroupés dans les services communs suivants, sous l'autorité du directeur de laboratoire, Éric Grégoire. Le directeur est épaulé par deux directeurs délégués : Pierre Marquis et Lakhdar Saïs.

**Services administratifs.** Les services administratifs du CRIL (secrétariat et la comptabilité/gestion) sont dirigés par une ITA AI (Virginie Delahaye), administratrice du laboratoire, épaulée par un ITA TECHN (Frédéric Renard) et une BIATSS ADJT (Sandrine Saitzek).

**Service informatique.** Deux enseignants-chercheurs, Bertrand Mazure et Olivier Roussel, chapeautent le service informatique.

- Développement logiciel et valorisation : Fabien Delorme (IR CNRS), Emmanuel Lonca (IGR CDD université d'Artois) et Thomas Caridroit (IGR CDD CPER Data) sont chargés des missions de valorisation. Leur principal rôle est d'accomplir des missions de développement de logiciels (de durées de 3 à 6 mois) choisies par arbitrage du directeur parmi les demandes remontées en réponse à des appels internes spécifiques. Ces demandes concernent prioritairement la finalisation ou la professionnalisation de prototypes valorisables. L'action du service de valorisation concerne également la participation, en renfort aux autres membres du laboratoire, aux actions de sensibilisation, de vulgarisation scientifique et d'interface pro-actif avec notre environnement socioéconomique et culturel.
- Système, réseau et gestion du cluster : François Chevallier (IGE) assure ce service au laboratoire.

**Hygiène et sécurité.** François Chevallier est l'assistant de prévention du laboratoire.

**Communication** La communication du laboratoire est sous la responsabilité d'un enseignant-chercheur, Daniel Le Berre. Un travail important a été réalisé sur le sujet de la communication pendant le contrat qui s'achève. D'abord, le site web du CRIL a été entièrement refondu, l'ancien site basé sur SPIP avec le kit CNRS a été remplacé par un site statique généré chaque nuit pour des raisons de sécurité. Les pages principales ont été traduites en anglais et en allemand. Des fiches synthétiques de présentation du laboratoire (dont **la fiche laboratoire DR18**) mais aussi de plusieurs sujets de recherche abordés (Compile!, DecMining, Sat4j, GGP) ont été conçues. Elles se présentent sous forme des feuilles recto/verso (recto en français, verso en anglais) à destination de nos visiteurs, scientifiques ou institutionnels. La dernière période a aussi été marquée par un nombre important de sollicitations de journalistes travaillant pour des médias locaux et nationaux ou encore d'autres acteurs (rencontres parlementaires) au sujet de l'intelligence artificielle. Un press book a été mis en place pour assurer la conservation de ce « patrimoine ». La communication interne, dans nos locaux, à destination de nos visiteurs mais aussi de nos étudiants, n'a pas été oubliée. Un écran a été installé à la Faculté des Sciences pour permettre la diffusion d'informations diverses de l'université et des informations spécifiques au CRIL, dont des faits marquants. Des supports pour posters ont également été mis en place dans les couloirs du 3ème étage de la Faculté de Sciences (là où une partie du CRIL est installée), permettant l'affichage de résultats de recherche récents.

**Séminaires** Un séminaire de laboratoire, concernant les deux axes de recherche du laboratoire, a été mis en place il y a longtemps déjà. Le créneau retenu le plus souvent pour les présentations au séminaire est le jeudi en début d'après-midi, là où il y a en général moins de contraintes d'enseignement. Ceci permet au plus grand nombre de CRILiens d'assister à ces présentations et d'y retrouver ses collègues pour un moment de discussion. Les étudiants du master d'informatique, parcours intelligence artificielle, de l'université d'Artois sont aussi conviés à y assister. Un budget est dégagé chaque année pour permettre d'inviter des collègues d'autres laboratoires à donner des présentations. Tiago de Lima a assuré la gestion des séminaires durant la période de référence jusqu'en septembre 2017. Srdjan Vesic a repris cette activité alors. Entre le 1er janvier 2013 et le 5 juin 2018 (date à laquelle nous avons réalisé le dernier comptage), 71 séminaires se sont tenus et les exposés donnés concernaient dans 41 cas des collègues extérieurs au CRIL.

## Parité

Commençons par un bilan chiffré : le CRIL compte quatre enseignantes-chercheuses et une chargée de recherche CNRS. Du côté des personnels administratifs et techniques, le CRIL compte deux femmes pour trois hommes. Enfin, chez les doctorants, le CRIL compte cinq femmes pour neuf hommes.

Le CRIL n'a jusqu'ici conduit aucune action spécifique dans le laboratoire sur le sujet de la parité. Il y a, en effet, peu d'assemblées propres au CRIL dans lesquelles la question de la parité se pose, la seule assemblée réglementaire étant le conseil de laboratoire (composé à ce jour de quatorze hommes et une femme). Evidemment, d'autres critères doivent aussi présider à la composition de ce conseil (équilibre permanents / non permanents, équilibre collègue A / collègue B, équilibre entre les deux axes de recherche du laboratoire). Par ailleurs, nos collègues femmes sont déjà très sollicitées par l'établissement et d'autres structures. Par exemple, deux d'entre elles sont vice-présidentes de l'université (en charge du numérique pour l'une et de la politique du personnel pour l'autre). Enfin, leur petit nombre et les règles de parité qui s'appliquent dans différentes instances les conduisent déjà à être présentes dans les différents conseils de l'établissement, dans des comités de sélection, etc. Elles ne se portent donc pas systématiquement candidates quand une élection a lieu.

Pour autant, la représentation féminine à ce conseil reste à un pourcentage trop faible (1/14) et qui est très en deçà de la part des collègues femmes parmi les permanents du laboratoire (7/37). Il faudra donc remédier à cet état de fait par des nominations lors du prochain renouvellement du conseil de laboratoire.

Pour progresser sur le sujet de la parité, il est clairement nécessaire d'intervenir en amont et de former des femmes en informatique, à tous les niveaux de diplômes. Il serait bon d'atteindre dans nos promotions de licence et master le bon équilibre existant au niveau des doctorants. Nous réfléchissons actuellement au sein des équipes pédagogiques à trouver différents moyens d'encourager les étudiantes à se diriger vers notre discipline.

## Intégrité scientifique

Les mesures mises en place au CRIL pour veiller au respect de l'intégrité scientifique sont diverses pour tenir compte des formes variées que l'intégrité scientifique revêt. Il s'agit d'abord de respecter la charte nationale de déontologie (votée par nos deux tutelles). Il s'agit aussi d'assurer une certaine pérennité, robustesse et reproductibilité de nos résultats. Quand il s'agit de résultats « sur papier », nos collègues sont encouragés à déposer sur leurs pages web ou dans des archives ouvertes des versions étendues des communications les décrivant, contenant en particulier toutes les preuves des théorèmes mis en avant et/ou des résultats expérimentaux supplémentaires qui viennent étayer les conclusions avancées. Quand il s'agit de développement logiciel, nos collègues sont encouragés à mettre en ligne le code exécutable produit et les benchmarks utilisés. L'exigence de reproductibilité des résultats nous conduit également à conserver des nœuds de calcul « assez anciens » dans notre cluster. Pour ce qui est du code co-produit, le laboratoire dispose d'un serveur subversion depuis plus de 10 ans et une instance de GitLab (la forge de l'université) est disponible depuis septembre 2013. Leur utilisation est préconisée pour le développement. Le principe est que, sauf exception spécifiée et faisant l'objet d'un accord préalable entre les co-auteurs et la direction du laboratoire, chaque co-auteur détient les droits moraux de la production commune (le droit patrimonial restant la possession des employeurs comme les textes réglementaires le prévoient).

## Protection et sécurité

La conservation des résultats et des programmes réalisés dans le laboratoire passe par la mise en place de procédures classiques d'archivage et de copies, en utilisant en particulier le serveur subversion du laboratoire ou la forge de l'université d'Artois, une instance locale du logiciel **GitLab**. Quand la diffusion des logiciels se fait dans le cadre de licences libres, nous utilisons aussi une **organisation github**. C'est dans ce cadre par exemple qu'est diffusé Gophersat, un prouveur SAT pour le langage Go.

## 5 - Analyse SWOT

### Points forts

**Niveau de la production scientifique (publications, logiciels)** En section 3, nous avons mis en avant tant le caractère soutenu et qualitatif de la production scientifique que la sélectivité de la stratégie de publications des chercheurs et enseignants-chercheurs du CRIL, déjà d'actualité lors des précédents contrats. Nous avons aussi indiqué les logiciels primés pour le présent contrat.

Le tableau suivant précise la quantité de publications dans les conférences de premier plan pour les années du contrat en cours. Les – indiquent que la conférence n'a pas lieu cette année-là.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
IJCAI	7	-	7	6	8	7
AAAI	1	4	3	3	4	2
ECAI	-	4	-	8	-	<i>cf IJCAI</i>
SAT	2	3	0	2	1	1
CP	1	1	2	2	4	3
KR	-	2	-	6	-	4
AAMAS	0	2	3	0	0	1

Les nombres dans ce tableau placent le CRIL comme 1er laboratoire français en terme de publications à la conférence IJCAI pour les années 2013 à 2018 et donc globalement sur la période de référence. Il faut ajouter à ce bilan sur les communications présentées en conférences, 16 articles publiés dans des revues A\* parmi les 58 articles de revues internationales produits durant la période 2013-2018.

Cet indicateur doit être mis en balance avec notre effectif de recherche (32 chercheurs ou enseignants-chercheurs permanents), mais la normalisation induite nous est encore favorable (le CRIL a un effectif significativement plus réduit que les départements d'IA de nos compétiteurs en France, et inclut en général parmi ses membres beaucoup moins de chercheurs à temps plein que ces derniers).

Un autre indicateur de reconnaissance de la qualité des activités de recherche conduites au CRIL est le nombre de PEDR (ou PES) et de délégations CNRS obtenues par des enseignants-chercheurs du laboratoire entre 2013 et 2018. Nous considérons la situation au 1er janvier de l'année.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
PEDR	11	12	14	14	13	14
DELEGATION	1	2	0.5	1	1	0

19 collègues ont ainsi bénéficié de la PES/PEDR durant la période de référence.

**Visibilité internationale** Nous avons déjà évoqué en section 3 la participation récurrente des membres du CRIL dans les comités de programme des principales conférences d'IA et leur implication dans l'organisation de conférences ou ateliers. Le tableau ci-dessous synthétise la participation des membres du CRIL dans les conférences majeures du domaine, qu'elles soient généralistes ou spécialisées.

Table 6: Implication des membres du CRIL dans des comités de programme internationaux (PC / Senior PC / Area Chair)

Conférence	2013	2014	2015	2016	2017	2018
IJCAI	6 / 3	-	6 / 2 / 1	7 / 2	12 / 1	12 / 3 / 1
AAAI			4	3	4	9
ECAI	-	10 / 1	-	3	-	<i>cf IJCAI</i>
SAT	3	1	2	3	1	3
CP	2 / 1	2	0 / 1	3	1 / 1	1
KR	-	2	-	3	-	5
AAMAS	1	3	3	1	1	1

Par ailleurs, entre 2013 et 2018, le CRIL a conduit une politique volontariste visant à augmenter sa visibilité (et ses coopérations) avec l'Asie, et tout particulièrement avec le Japon, la Chine et avec l'Asie du sud-est. Cela s'est traduit concrètement par la signature d'un accord cadre (MOU) entre le CRIL et le *National Institute of Informatics* (NII), Tokyo, l'accueil de Takehide Soh (université de Kobe) pour un an entre 2017 et 2018, des visites de chercheurs du CRIL au *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* (AIST), Tokyo, au NII, Tokyo, à l'université de Kobe, à Macao, ou encore à l'université de Nankin (avec laquelle l'université d'Artois a une relation privilégiée, passant par un Institut Confucius commun). Un séminaire commun entre les laboratoires de recherche en informatique de l'université d'Artois et de l'université de Nankin a ainsi été organisé au CRIL en juin 2016. Durant l'année universitaire 2016/17, nous avons aussi accueilli pour six mois une doctorante de l'université de Nankin (Tingting Zhai) avec un financement ERASMUS+. Les collaborations en place avec nos collègues japonais sont maintenant bien établies ; de nombreux meetings se sont tenus (certains au CRIL, la plupart au Japon). Dans le cadre du projet H2020 AniAge, le CRIL reçoit des chercheurs et doctorants de laboratoires du Viêt Nam, de Thaïlande, et de Malaisie. Réciproquement, des chercheurs et doctorants du CRIL ont été accueillis dans les laboratoires de nos partenaires dans ces pays. Ces collaborations variées ont donné lieu à des publications communes et d'autres sont encore dans les cartons (en particulier, avec nos partenaires chinois).

**Implication forte dans l'écosystème (local et national)** Ces dernières années ont vu une augmentation tout à fait considérable de l'implication de membres du CRIL dans leur écosystème. Ainsi, à l'université d'Artois, au delà des responsabilités « naturelles » des filières (département informatique de l'IUT) et diplômes en informatique (licences, master) assurées depuis toujours par des CRILiens, sont venues s'ajouter des responsabilités plus lourdes encore, avec la participation de plusieurs collègues à la direction de l'établissement. Le CRIL compte ainsi à ce jour en son sein 3 vice-président.e.s de l'université, un chargé de mission délégué, et le directeur de l'UFR des Sciences. Au plan national, en sus des responsabilités importantes d'Eric Grégoire au Ministère qui se sont poursuivies lors du contrat arrivant à échéance, il faut ajouter le travail considérable fourni par Sébastien Konieczny pour bâtir le pré-GdR IA (maintenant GdR IA), qui implique aussi dans ses structures (conseil de direction, conseil scientifique, groupes de travail) d'autres membres du CRIL. Sébastien Konieczny a aussi été lourdement sollicité par le CNRS à l'occasion de la mise en place du plan #FrancelA. On notera enfin la participation de CRILiens comme membres nommés au CNU, section 27 (Christophe Lecoutre) et au CoNRS, CID 53 (Pierre Marquis) mais aussi l'implication forte de collègues du CRIL dans des sociétés savantes ou professionnelles, en particulier l'AFPC (Cédric Piette) et SPECIF Campus (Pierre Marquis puis Daniel Le Berre).

**Qualité des derniers recrutements** L'arrivée de nouveaux entrants (chercheurs affectés au CRIL et enseignants-chercheurs pendant le contrat) témoigne du soutien fort de nos tutelles. Le haut niveau des publications qui résulte d'une activité scientifique soutenue des collègues concernés montre l'attractivité de notre laboratoire et constitue un gage important quant à la pérennité de la performance en recherche du CRIL. Les compétences supplémentaires apportées par les collègues en question créent également des opportunités d'ouverture du CRIL à des sujets de recherche qui n'étaient pas abordés jusqu'alors dans le laboratoire.

### Points à améliorer

**Augmentation du nombre d'enseignants-chercheurs non producteurs** Le nombre d'enseignants-chercheurs non producteurs (évalué ici comme celles et ceux ayant moins de 3 publications internationales dans des revues ou des conférences sur la période de référence) a augmenté significativement en comparaison à la période précédente, pour passer maintenant à huit. Ce point faible est pour beaucoup d'entre eux le revers du point fort « implication forte dans l'écosystème » décrit ci-avant. Toutefois, parmi celles et ceux qui ne sont pas impliqués dans des responsabilités fortes au sein de l'établissement ou de filières d'enseignement, nous n'avons relevé aucun non-publiant « sec », c'est-à-dire sans aucune publication entre 2013 et 2018. La direction du laboratoire a pris la mesure du problème et, par sa politique d'allocation de financements de thèse, donné un coup de pouce aux collègues non producteurs qui souhaitent reprendre une activité de recherche plus soutenue en favorisant leur participation à l'encadrement pour les thèses débutant à la rentrée 2018/2019. Par ailleurs, la direction du CRIL a sollicité un entretien individuel avec chacun des collègues concernés de façon à connaître ses intentions pour le prochain contrat. Un bilan à mi-parcours sera également réalisé. L'objectif poursuivi est de minimiser le nombre de collègues non producteurs lors du contrat à venir.

**Contrats et nombre de financements doctoraux** Le CRIL dispose d'un financement de thèse 100% Artois par an, et peut prétendre à un co-financement Région-Artois si le sujet remonté par le laboratoire est sélectionné par la Région. Les co-tutelles forment une part importante des thèses.

Si le CRIL a obtenu un nombre conséquent de projets CNRS PEPS (en comparaison avec le contrat précédent), le nombre de projets ANR et le volume de contrats industriels auxquels le CRIL participe est resté stable. Cela n'a pas permis de faire progresser de façon notable le nombre de doctorants du laboratoire qui reste en deçà de nos possibilités et de nos attentes. Ainsi, le nombre de financements de thèse sur projet n'a pas été très élevé (5 sur la période). Le nombre de financements CIFRE est resté très faible (un seul dans la période de référence).

Cette situation peut s'expliquer par le profil d'activités « historique » du CRIL (plutôt tourné vers des recherches de type « amont » que vers des actions de valorisation depuis sa création), mais aussi par le contexte socio-économique local (alors que la métropole lilloise accueille de nombreuses start-ups, le bassin minier n'a pas eu cette chance jusqu'ici). Pour remédier à cette situation, nous pensons réaménager l'activité des IR/IGR de la cellule de développement et de valorisation du CRIL pour qu'ils puissent consacrer plus de temps à prospecter des contacts industriels. Le boom actuel concernant l'IA pourra servir de catalyseur. Nous avons déjà quelques pistes de financement CIFRE pour la rentrée 2018. Par ailleurs, nous comptons profiter de la présence d'anciens étudiants recrutés récemment dans des services R&D d'entreprises de la Région pour construire avec eux des projets qui pourront conduire à des thèses. Enfin, notre implication dans plusieurs initiatives en Artois (Louvre-Lens Vallée, MuséoLab, Cluster Senior, etc.) ainsi que le développement d'un centre « Euratechnologies bis » dans le bassin minier (comme annoncé par le président de Région) devraient nous permettre de progresser dans cette direction.

**Nombre d'habilitations à diriger des recherches soutenues pendant le contrat** Aucune habilitation à diriger des recherches n'a été soutenue entre 2013 et 2018. Cela peut s'expliquer par la pyramide des âges du laboratoire et par la raréfaction du nombre de postes (en particulier de PR). Ceci n'est malheureusement pas une singularité du laboratoire. Néanmoins, plusieurs projets d'HdR, concernant des collègues MCF depuis moins de 10 ans, sont en préparation (la politique d'allocation de financements de thèse ayant permis aux collègues en question de participer à des encadrements). Nous espérons donc voir au moins 5 HdRs soutenues pendant le prochain contrat. Notons enfin que le nombre d'habilités dans le laboratoire n'a pas posé de problème d'encadrement (le CRIL comporte à ce jour 12 habilités pour 14 doctorants).

### Possibilités offertes par le contexte

Localement, à l'université d'Artois, la création en 2018 d'un domaine d'intérêt majeur (DIM) spécifique à l'intelligence artificielle mais favorisant les collaborations avec d'autres acteurs de l'université constitue une opportunité intéressante pour de nouvelles coopérations en interne à l'établissement. En particulier, ce DIM qui débute ouvre pour le CRIL et pour le contrat qui arrive, des perspectives de collaboration interdisciplinaire avec des chercheurs du secteur SHS qui viendront compléter et soutenir les développements concernant l'IA explicable et interprétable que nous souhaitons réaliser lors du prochain contrat.

Au delà de son périmètre propre, l'université d'Artois est partenaire de l'I-SITE Lille Nord-de-France (I-SITE LNF). A ce titre, le CRIL peut répondre aux appels à projets de l'I-SITE, en particulier via les actions « *Expand* » qui

concernent les partenaires du second cercle. Les coopérations entre partenaires de l'I-SITE sont encouragées par ce dispositif. Il va donc falloir déposer des projets dans ce cadre. Quoique la pression soit assez élevée (8 lauréats pour 47 candidatures au premier appel), les actions « *Expand* » constituent une opportunité intéressante pour permettre le développement des activités de recherche commune avec nos collègues lillois qui ont germé ces dernières années et ont déjà donné lieu pour certaines à des publications communes. Citons par exemple le projet Alloy@Scale (financé par le CPER Data) entre des membres du CRIL et des membres de l'équipe INRIA Spirals. D'autres projets conjoints avec CRISAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal, et Automatique de Lille, UMR 9189) sur la thématique de la compilation de connaissances sont également en cours et pourraient aboutir à une demande de financement institutionnel.

Une autre opportunité majeure dans le contexte régional est celle du montage commun d'un Institut Interdisciplinaire d'Intelligence Artificielle (3IA), comme décrit dans le rapport Villani et annoncé par le Président de la République dans la foulée le 29 mars 2018. Des discussions sont en cours avec les partenaires de Lille, Amiens et Compiègne au sujet de l'organisation à dégager dans l'objectif de profiter d'effets de levier et de jouer sur les synergies possibles entre nos compétences. Nous comptons collectivement sur un soutien fort de la Région Hauts-de-France dans cette opération. Un projet commun d'école universitaire de recherche (EUR) sur la thématique de l'intelligence artificielle pourrait aussi émerger.

### Risques liés à ce contexte

Le principal risque que nous identifions tient à la situation du CRIL, qui reste un petit centre de recherche (en nombre de permanents) à une époque où la massification est de mise, sans que l'on sache très bien les économies d'échelle ou les bénéfices scientifiques qui en résultent (ni même si cela sera évalué un jour). Pour une structure comme la nôtre où la mutualisation des moyens techniques n'est pas un enjeu véritable, l'ajout des lourdeurs administratives, la mobilisation du temps et de l'énergie qui en résultent, ainsi que la perte d'autonomie possible des choix de nos sujets de recherche que les regroupements pourraient impliquer, ne nous font pas rêver. Les succès du CRIL tiennent à la fois au temps laissé à ses membres pour faire de la recherche et à la liberté laissée à ceux-ci de décider des recherches à conduire.

Le CRIL est jusqu'ici très soutenu par l'université d'Artois. Si un système d'universités à plusieurs vitesses se met en place en France avec d'un côté des universités dites de recherche intensive et de l'autre celles qui restent (dont l'université d'Artois) et si la puissance publique instaure un financement différencié selon la catégorie, un risque notable d'une perte importante de ses moyens existe pour l'université d'Artois. Si cette perte est avérée, elle impactera fatalement le CRIL par ricochet.

## 6 - Projet scientifique à cinq ans

Notre projet scientifique pour les cinq ans à venir concerne le développement de concepts et d'algorithmes permettant la construction de systèmes d'IA dont les résultats sont explicables et interprétables par l'humain. C'est le fil directeur que nous avons retenu parce qu'il porte une problématique tout à fait actuelle (et largement non triviale) et parce qu'il se décline aussi en un ensemble de problèmes variés pour lesquels nos compétences pourront être utiles pour progresser dans leur résolution.

Il est, en effet, important aujourd'hui de penser à « ouvrir les boîtes noires de l'IA », pour reprendre les mots du rapport Villani (partie 6) : « À long terme, l'explicabilité des technologies de l'intelligence artificielle est l'une des conditions de leur acceptabilité sociale. C'est pourquoi la puissance publique doit agir de différentes manières : [point 1)] développer la transparence et l'audit des algorithmes [alinéa b)] en soutenant la recherche sur l'explicabilité de l'IA. Pour cela, il faut investir autour de trois axes de recherche : la production de modèles plus explicables, la production d'interfaces utilisateurs plus intelligibles, et enfin la compréhension des mécanismes à l'œuvre pour produire une explication satisfaisante. »

Ce besoin devient même une exigence légale : le règlement (UE) 2016/679 du parlement européen et du conseil du 27 avril 2016, relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données (alias règlement général sur la protection des données) qui s'applique depuis le 25 mai 2018, précise dans ses considérations liminaires (n° 71) que « en tout état de cause, un traitement de ce type [automatisé de données à caractère personnel] devrait être assorti de garanties appropriées, qui devraient comprendre une information spécifique de la personne concernée ainsi que le droit d'obtenir une intervention humaine, d'exprimer

son point de vue, d'obtenir une explication quant à la décision prise à l'issue de ce type d'évaluation et de contester la décision. », mais aussi dans ses articles 14, paragraphe 2, alinéa g) et 15, paragraphe 1, alinéa h) que « l'existence d'une prise de décision automatisée, y compris un profilage, visée à l'article 22, paragraphes 1 et 4, et, au moins en pareils cas, des informations utiles concernant la logique sous-jacente, ainsi que l'importance et les conséquences prévues de ce traitement pour la personne concernée. », ou encore dans son article 22, paragraphe 1. que « la personne concernée a le droit de ne pas faire l'objet d'une décision fondée exclusivement sur un traitement automatisé, y compris le profilage, produisant des effets juridiques la concernant ou l'affectant de manière significative de façon similaire. »

Après ces éléments de motivation, passons à quelques points de mise en contexte et des déclinaisons possibles de la problématique générale sur laquelle nous souhaitons travailler au cours des cinq prochaines années. Il s'agit de préciser ici, mais à gros grain seulement, le fil directeur du projet, les détails techniques étant fournis dans les parties projet de chacun des deux axes.

La notion d'explication est étudiée depuis des lustres dans de nombreux champs scientifiques, en particulier en épistémologie et en philosophie des sciences. La recherche d'explications revêt des formes diverses : calcul de preuve, raisonnement causal, abduction, postdiction, etc. Tous ces sujets sont étudiés depuis longtemps aussi en IA, en particulier au CRIL, et ils le sont encore à ce jour, surtout sous l'angle de la modélisation (il s'agit de définir des notions d'explications acceptables, rationnelles) mais aussi sous l'angle du calcul (sur la causalité, qui reste un sujet épineux, voir par exemple les travaux récents de deux grands noms de l'IA, Joe Halpern – voir en particulier son livre « *Actual Causality* », The MIT Press, 2016 – mais aussi ceux de Judea Pearl et ses collègues, dont les livres « *Causal Inference in Statistics: A Primer* », Wiley, 2016 et « *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect* », Basic Books, 2018).

Donnons quelques exemples : prouver un résultat, c'est expliquer pourquoi il est correct. Or, si les preuves mathématiques sont le gage de la correction, elles ne sont pas toujours interprétables par l'humain (par exemple, parce que trop longues). On ne se privera pas de citer ici à titre d'exemple le problème de la « bicoloration des triplets pythagoriciens » qui fut en haut de l'affiche au printemps 2016. Il s'énonce comme suit : « est-il possible de colorier chaque entier positif en bleu ou en rouge de telle manière qu'aucun triplet d'entiers  $a$ ,  $b$  et  $c$  qui satisfait la fameuse équation de Pythagore  $a^2 + b^2 = c^2$  soient tous de la même couleur ? ». Par exemple, pour le triplet (3, 4, 5), si 3 et 5 sont coloriés en bleu, alors 4 doit être rouge. À cette énigme, Marijn J. H. Heule, Oliver Kullmann, Victor W. Marek, dans leur communication publiée dans les actes de SAT'16, ont répondu par la négative. Ils ont montré que, jusqu'à 7 824, il est possible de colorier ainsi les entiers, et même de plusieurs façons, mais, arrivé à 7 825, cela n'est plus faisable. La preuve du résultat est fantastiquement longue (elle occupe 200 téraoctets – soit l'équivalent de tous les textes numérisés détenus par la bibliothèque américaine du Congrès) et ses auteurs estiment à 10 milliards d'années le temps nécessaire à un être humain pour la lire. C'est la plus grande preuve mathématique jamais produite ... et elle l'a été en utilisant le solveur glucose co-développé au CRIL et au LaBRI, voir <https://lejournal.cnrs.fr/articles/la-plus-grosse-preuve-de-lhistoire-des-mathematiques>

Pour expliquer pourquoi un ensemble  $E$  de formules logiques est contradictoire, on peut mettre en évidence ses sous-ensembles contradictoires qui sont minimaux pour l'inclusion ensembliste (alias ses MUS). Toutefois, le nombre de tels sous-ensembles est exponentiel dans le cardinal de  $E$ , et dans ce cas, l'explication fournie n'est pas suffisamment intelligible. On voit par ailleurs apparaître ici un saut de complexité : à la complexité initiale du problème de prouvabilité (montrer que  $E$  ou un sous-ensemble donné de  $E$  est contradictoire) s'ajoute une complexité supplémentaire liée au nombre d'explications.

Rechercher une explication, c'est souvent construire une hypothèse qui rend compte, au mieux, d'une certaine réalité. La tâche est alors abductive, ce qui s'exprime de différentes façons selon la nature des informations mises en jeu et les cadres formels considérés. Par exemple, quelle est la meilleure hypothèse permettant de prouver  $A$  connaissant  $B$  ? Ou encore quel est le changement, la suite d'actions qui explique au mieux le fait qu'un système soit passé d'un état à un autre état ? (on parle ici d'abduction d'événements) ou encore quelle est l'hypothèse la plus probable expliquant une observation donnée ? (il s'agit du problème appelé MAP). Quand il s'agit de déterminer l'état du système le plus vraisemblable, qui évolue vers un état donné quand un changement donné a lieu, on parle plutôt de postdiction (une autre tâche importante du raisonnement sur l'action).

Quel que soit le cadre considéré, le problème de la recherche d'une meilleure explication, voire de toutes les meilleures explications possibles, pose des questions de complexité qui vont typiquement au delà de celle du problème de raisonnement correspondant. Ainsi, déterminer si une hypothèse existe qui permet de prouver  $A$  à partir de  $B$  est typiquement plus difficile que de décider si l'on peut prouver  $A$  à partir de  $B$ . Calculer l'hypothèse la plus probable compatible avec une évidence donnée est typiquement plus difficile que de calculer la probabilité de l'évidence en question. La difficulté supplémentaire peut être intrinsèque à la notion d'explication ou liée à la taille des explications.



Vouloir calculer toutes les explications possibles pose bien entendu des difficultés additionnelles quand le nombre d'explications est grand. Se posent en particulier des problèmes de représentation des explications (voire des ensembles d'explications) qui ne se posent pas pour les problèmes de décision liés à la preuve, où les questions posées sont fermées.

Le CRIL a développé des compétences variées qui pourront être mobilisées pour attaquer ce genre de question et faire avec les problèmes de calcul qui se posent (en particulier, la problématique de la représentation compacte d'informations est très liée à celle de la compilation de connaissances). Les CRILiens ont maintenant une expertise avérée pour ce qui concerne le développement d'algorithmes de calcul sur les connaissances qui sont les plus efficaces possibles en pratique. La performance des solveurs de contraintes modernes permet d'attaquer des problèmes calculatoirement plus difficiles que celui de la cohérence et qui sont liés au calcul d'explications, comme le calcul de MUS ou encore le problème MAP, et nous avons déjà débuté des travaux pour progresser dans la résolution pratique de ces problèmes « *Beyond NP* ». D'autres voies pourront être également explorées (comme celle visant à identifier des restrictions plus faciles, voire traitables, à base de bornes sur des paramètres structurels des instances, pour lesquelles le laboratoire a monté en compétence ces derniers temps).

Quand les explications ou leur calcul restent trop complexes, il faut pouvoir les abstraire ou les approcher. Dans ces directions, le CRIL a aussi un bagage et une expérience passée qu'il pourra exploiter. Par exemple, le sujet de l'abstraction de réseaux de contraintes a déjà été abordé au laboratoire, celui de l'approximation de problèmes difficiles, comme MAP, également, et dans un passé récent pour ce problème-là. La synthèse d'explications peut aussi passer par l'oubli d'informations, un sujet qui a été largement exploré au CRIL et qui a fait l'objet non seulement d'études à visée théorique mais aussi de développements logiciels lors du contrat qui s'achève.

Dans le cadre de systèmes multiagents (où les agents sont des humains ou des machines), la construction d'une explication globale passe aussi par la confrontation et l'agrégation d'explications plus parcellaires. Une difficulté majeure à prendre en compte dans ce cas (en amont des problèmes de calcul) est d'assurer la cohérence de l'explication globale produite (puisque une explication incohérente ne peut pas constituer une explication véritable). Un large ensemble d'approches pour l'agrégation d'informations (de natures variées, comme des croyances ou des préférences) a été développé au CRIL (le sujet constituant un thème fort et reconnu comme tel au niveau international pour le laboratoire). Dans les scénarios où des informations doivent être fusionnées, l'acceptation du résultat (par exemple de la croyance collective) doit passer par la garantie de propriétés normatives sur la méthode d'agrégation à employer, par exemple la propriété de consensus qui demande au résultat d'être cohérent avec chacune des croyances individuelles. Ces propriétés devront donc être identifiées pour les nombreuses méthodes existantes qui sont toutes plus ou moins utilitaristes (i.e., visant à minimiser la dissatisfaction collective) ou plutôt égalitaristes (i.e., visant à minimiser la dissatisfaction individuelle). Si divers travaux ont déjà été entrepris dans cette direction, il reste encore beaucoup à faire et le CRIL participera à l'effort restant.

Rendre une information intelligible nécessite aussi parfois de comprendre sa structure. Dans cette voie, les travaux réalisés au CRIL sur la fouille de données à base de contraintes devront être poursuivis. Les régularités observées dans les données peuvent aussi être exploitées pour compresser les informations disponibles sans perte d'informations ou avec une perte contrôlée. Les liens entre la fouille de données à base de contraintes et la compilation de connaissances devront être explorés de façon plus systématique lors du prochain contrat. Dans un autre registre, exploiter la structure des connaissances est aussi crucial pour pouvoir synthétiser les raisonnements qui s'appuient sur celles-ci. Les travaux sur l'argumentation abstraite qui sont conduits au CRIL (et donnent lieu là encore à des réflexions amont mais aussi à des systèmes de calcul comme CoQuiAAS) relèvent de cette approche. Nous souhaitons en particulier développer lors du prochain contrat des systèmes d'inférence permettant à des décideurs d'extraire et de classer les arguments les plus pertinents qui sont émis par les utilisateurs de plates-formes de débats en ligne, et plus largement d'offrir des synthèses des débats. De telles plates-formes sont, en effet, de plus en plus utilisées comme supports de débats, qu'il s'agisse de débats citoyens (comme la loi sur le numérique pour ne donner qu'un exemple) ou d'échanges entre des clients au sujet d'un produit. Il manque encore à ce jour à ces plates-formes des capacités d'inférence et de synthèse des informations échangées, qui fourniraient à l'organisateur du débat une aide précieuse à la décision à prendre ensuite.

## Axe représentation des connaissances et raisonnements (RCR)

### Introduction

Les travaux réalisés au sein de l'axe RCR concernent l'élaboration et l'étude de modèles des processus « intelligents » sous forme d'algorithmes mis en œuvre dans les systèmes d'IA fondés sur les connaissances (en particulier l'acquisition des connaissances, leur évolution, le raisonnement, la prise de décision), selon des perspectives multiples (normative, descriptive, computationnelle) ainsi que la conception et l'étude des langages de représentation de connaissances (et plus largement de croyances, préférences, actions) plus ou moins certaines sur lesquels les algorithmes proposés s'appuient.

### Tableau des effectifs et moyens de l'axe

Membres permanents de l'axe RCR	
Fahima ALILI-CHEIKH (MCF)	<b>Sébastien KONIECZNY (DR2)</b>
Salem BENFERHAT (PR1)	<b>Frédéric KORICHE (PR2)</b>
Zied BOURAOU (MCF)	Sylvain LAGRUE (MCF-HDR)
Nathalie CHETCUTI-SPERANDIO (MCF HC)	Pierre MARQUIS (PREX)
Jean-François CONDOTTA (PR2)	Karim TABIA (MCF)
Sylvie COSTE-MARQUIS (MCF HC)	Ivan VARZINCZAK (MCF)
Tiago DE LIMA (MCF)	Srdjan VESIC (CR)
Vincent DUBOIS (PRAG)	

Les **responsables d'axe** et les *personnes impliquées aussi dans l'axe AIC* sont mis en évidence. Salem Benferhat a assuré la co-responsabilité de l'axe de 2013 à juin 2016.

Les effectifs de l'axe RCR ont évolué comme suit lors du contrat qui arrive à échéance :

- aucun départ et arrivée de 2 MCF (Ivan Varzinczak et Zied Bouraoui).

Les axes du CRIL n'ayant pas de budget propre, aucune évolution des moyens financiers de l'axe RCR n'est à noter.

### Politique scientifique

Les travaux réalisés au sein de l'axe sur la période 2013-18 s'inscrivent pour la plupart dans les thèmes pour lesquels ses participants ont une expertise manifeste, mais ont été marqués par une inflexion assez nette vers la problématique du calcul effectif : implémentation d'opérateurs de révision et de fusion sur une base « *Beyond NP* », encodage de réseaux bayésiens, développement de méthodes de raisonnement (inférence non monotone, gestion de l'incertain et de l'incohérence, révision) pour les logiques de description, en particulier DL-Lite. Comme préconisé dans les recommandations émises par l'AERES en 2013, des ouvertures à des problématiques actuelles, scientifiques et/ou socio-culturelles, ont été réalisées, en particulier autour du *General Game Playing* (un sujet qui a une valeur intégrative véritable dans sa mobilisation de techniques d'IA variées – recherche heuristique, bandits, contraintes – au service d'une application de prise de décision séquentielle en environnement incertain) ou encore, autour de la sauvegarde du patrimoine culturel en Asie du Sud-Est (avec le projet H2020 AniAge).

### Produits et activités de recherche

#### Bilan scientifique

**Changement de croyances** La théorie du changement de croyances s'intéresse aux approches permettant à un agent d'actualiser ses croyances en fonction des nouvelles informations qu'il apprend et qui peuvent contredire le modèle que cet agent avait du monde. Le problème est alors de définir comment prendre en compte ces informations tout en conservant la cohérence des croyances de l'agent.

- **Révision de croyances** Nous avons défini une nouvelle classe d'opérateurs de changement, les opérateurs d'amélioration à crédibilité limitée, en combinant deux opérations que nous avons définies dans de précédents travaux, les opérateurs de révision à crédibilité limitée (qui refusaient les informations non fiables), et les opérateurs d'amélioration qui permettent un comportement plus mesuré que la révision de croyances : la nouvelle information n'est pas forcément acceptée, mais sa crédibilité (plausibilité) est augmentée (ECAI'14).
- **Indépendance à la représentation** Nous avons introduit et étudié un concept d'indépendance à la représentation dans un cadre propositionnel (Marquis et Schwind, 2014). La notion d'indépendance à la représentation d'un opérateur propositionnel est ici formalisée comme une propriété de morphisme par substitution des atomes propositionnels en formules. Nous motivons la nécessité de se concentrer sur des ensembles restreints de substitutions, introduisons plusieurs familles d'intérêt, et fournissons divers résultats de caractérisation. Nous identifions également la complexité de la reconnaissance de l'existence d'une substitution pour les différentes familles mises en avant. Nous étudions enfin l'indépendance des opérateurs de fusion des croyances, de révision des croyances et de mise à jour des croyances pour les substitutions des différentes familles. Il s'avère qu'il existe des opérateurs rationnels de fusion/révision/mise à jour ne garantissant pas la forme la plus élémentaire (quoique non triviale) d'indépendance à la représentation.
- **Mise à jour** Nous avons présenté et étudié une famille générale d'opérateurs de mise à jour de croyances dans un contexte propositionnel (ACM TOCL'13). Ces opérateurs sont basés sur une notion de dépendance formule/littéral, plus fine que la notion de dépendance formule/variable proposée dans la littérature. Nous montrons comment ces opérateurs permettent de gérer le problème du décor et celui de la ramification d'une manière plus appropriée que les approches précédentes. Nous évaluons les opérateurs de mise à jour proposés selon deux dimensions importantes : la dimension logique, en vérifiant le statut des postulats de Katsuno-Mendelzon pour la mise à jour, et la dimension calculatoire, en identifiant la complexité de plusieurs problèmes de décision (dont l'inférence) dans le cas général et dans certains cas restreints.

**Croyances et multi-agents** Dans des applications comprenant un ensemble d'agents, plusieurs questions de représentation des connaissances et de raisonnement se posent. En particulier, le problème de définir une information cohérente à partir de toutes les informations (souvent conjointement conflictuelles) fournies par les différents agents fonde la problématique de la fusion de croyances. Grâce aux outils développés dans ce cadre, on peut étudier la diffusion d'opinion dans les réseaux sociaux. Une autre question proche est de déterminer un point de vue compatible avec tous les agents, ce qui nous a conduit à définir une notion de consensus. Un type de problème supplémentaire abordé pendant le contrat qui s'achève est celui de la formation d'équipes d'agents pour réaliser un ensemble de tâches.

- **Révision de croyances dans des systèmes multi-agents** Nous avons proposé plusieurs distances entre modèles de Kripke (plus exactement des modèles KD45n, la logique typique pour modéliser les croyances dans le cas de plusieurs agents), et montré comment utiliser ces distances pour définir des opérateurs de révision de logiques doxastiques (ECAI'16).
- **Fusion de croyances** Nous avons étudié une nouvelle famille d'opérateurs de fusion, les opérateurs de fusion égalitaire, en important des notions et des opérateurs pratiques de la théorie du choix social vers la fusion de croyances (en particulier Sen-Hammond et Pigou-Dalton) (ECAI'16). Nous avons également étudié les liens entre fusion de croyances et le domaine plus récent de l'agrégation de jugement. Cela nous a permis en particulier de critiquer les postulats trop restrictifs de l'agrégation de jugement (Everaere, Konieczny et Marquis, 2015), qui conduisent aux théorèmes d'impossibilités identifiés dans ce domaine. Cela nous a aussi conduit à proposer une nouvelle famille d'opérateurs d'agrégation de jugement basée sur le nombre de votes en faveur de chaque question, qui permettent d'obtenir des situations de compromis (Everaere, Konieczny et Marquis, 2014). Par ailleurs, nous avons proposé une implémentation des opérateurs de fusion principaux, les opérateurs à base de distance, en utilisant un encodage CNF. Cette implémentation est suffisamment efficace pour traiter des instances de grande taille, de l'ordre de 1000 variables, qui étaient hors de portée des approches de la littérature. Nous avons illustré les performances de notre approche sur des instances issues de problèmes d'emploi du temps (*time-tabling*) (Konieczny, Lagniez et Marquis, 2017).
- **Belief Revision Games** Nous nous sommes intéressés à l'étude de la diffusion de croyances dans des réseaux sociaux, en utilisant des outils (opérateurs de révision et de fusion) issus de la théorie de la révision de croyances. La question est alors de déterminer si le processus de diffusion ainsi défini atteint un point fixe et les croyances des agents et du groupe social à la fin de ce processus (Schwind et al., 2015). Nous nous sommes ensuite

attaqués à la question de la manipulation de ce type de réseaux sociaux. Nous avons étudié la question préliminaire du « comment manipuler » pour faire croire une information donnée, en se demandant quelle information il convient de fournir aux agents que l'on contrôle pour arriver à cet objectif (IJCAI'16).

- **Notion de consensus** Nous avons proposé un concept de consensus entre un ensemble d'agents ayant des croyances propositionnelles conjointement contradictoires tel que ce consensus ne contredise logiquement aucun des agents tout en pouvant contenir des informations initialement non partagées par tous les agents (ECAI'16). Nous avons étudié plusieurs notions de maximalité pour ce concept de consensus lorsque les agents et leurs informations peuvent être soumis à différentes formes de préférence. D'un point de vue calculatoire, pour calculer un consensus maximal, nous avons adapté les techniques que nous avons proposées dans (Besnard, Grégoire et Lagniez, 2015) et (Grégoire, Izza et Lagniez, 2016) pour transformer les différents tests de satisfaisabilité requis en un seul problème d'optimisation à la Partial-Max-SAT. Nous avons également revisité ce concept de consensus dans le cadre de la logique modale épistémique S5, tant sur les plans conceptuel qu'algorithmique (ECAI'16). Nous avons aussi proposé un postulat de consensus dans le contexte de fusion de croyance propositionnelle (Schwind et Marquis, 2018). Ce postulat impose à la base fusionnée d'être cohérente avec les informations fournies par chaque agent impliqué dans le processus de fusion. L'interaction de ce nouveau postulat avec les postulats IC pour la fusion est étudiée et un résultat d'incompatibilité est prouvé. Les ensembles maximaux pour l'inclusion de postulats IC qui sont compatibles avec le postulat de consensus sont identifiés. Nous montrons qu'en imposant tous les postulats les plus souhaitables, les opérateurs de fusion obtenus ont nécessairement une puissance inférentielle faible. En laissant de côté d'autres postulats, nous montrons comment des opérateurs de fusion offrant un meilleur pouvoir inférentiel peuvent être définis.
- **Formation d'équipe robuste** Nous avons formalisé et étudié une notion de robustesse dans le contexte de la formation d'équipes d'agents (Okimoto et al., 2015). Chaque agent est caractérisé par un ensemble de tâches qu'il peut résoudre et un coût de recrutement. L'objectif est de former une équipe d'agents capable de réaliser toutes les tâches données, pour un coût de formation minimal (les coûts s'agrégeant additivement). Une équipe est  $k$ -robuste pour un ensemble de tâches donné si la réalisation de ces tâches est encore possible quand l'équipe est privée de  $k$  agents (quels que soient ceux-ci). Nous montrons que le problème de décider si une équipe  $k$ -robuste et de coût inférieur à une valeur donnée existe n'est pas plus difficile que celui de décider si une équipe de coût inférieur à une valeur donnée existe (tous deux sont NP-complets). Nous présentons et évaluons un algorithme pour résoudre le problème (bi-critère) d'optimisation associé.
- **Formalisme pour les systèmes multi-agents** Les formalismes visant le raisonnement sur des systèmes multi-agents existants peuvent être classés en trois catégories : (1) le raisonnement sur les capacités des agents et le temps (ex. Alternating-time Temporal Logic); (2) le raisonnement sur les actions des agents (ex. Dynamic Epistemic Logic); (3) le raisonnement sur les capacités des agents et des actions individuelles, mais avec accent sur les actions épistémiques (ex. Coalition Announcement Logic). Nous avons proposé le formalisme Alternating-time Temporal Dynamic Epistemic Logic (ATDEL) (De Lima, 2014), qui est similaire à la Coalition Announcement Logic, mais avec plusieurs améliorations : des actions en parallèle ; des actions physiques ; plusieurs opérateurs temporels ; la description des actions est concise (pas de problème du décor). Nous avons également étudié l'axiomatique, la décidabilité et des algorithmes pour la vérification des modèles et le test de la cohérence des formules.

**Modèles graphiques et incertitude** La plupart des informations à partir desquelles un agent artificiel doit raisonner ne sont pas parfaites. Elles sont souvent incertaines ou imprécises. Il existe beaucoup de formalismes différents pour la représentation et le raisonnement dans l'incertain, chacun ayant ses avantages et inconvénients. Nous avons apporté différentes contributions pour la définition et l'utilisation de ces formalismes.

- **Encodage de réseaux bayésiens** Nous avons présenté et évalué un nouveau schéma de traduction de modèles graphiques probabilistes vers des formules CNF pondérées, permettant de réduire le problème du calcul de probabilité d'une évidence donnée à un calcul de nombre de modèles pondérés (ECAI'16). Ce nouveau schéma, prouvé correct, améliore le meilleur schéma proposé jusqu'ici (par Chavira et Darwiche). Pour chaque modèle en entrée, la formule CNF à laquelle il conduit contient moins de variables et moins de clauses que la formule CNF obtenue avec le schéma de Chavira et Darwiche. De plus, le temps de calcul de la probabilité d'une évidence donnée obtenu en utilisant le compteur de modèles pondérés c2d en aval de la formule CNF produite par notre schéma est, dans de nombreux cas, significativement plus petit que lorsque le schéma de Chavira et Darwiche est utilisé, ou lorsque le compilateur ACE de modèles graphiques est utilisé pour répondre à la requête.

- **Conditionnement dans la théorie des possibilités à intervalles et conditionnement** La théorie des possibilités et la logique possibiliste sont des cadres de représentation et de raisonnement sous incertitude bien connus et particulièrement adaptés pour représenter et raisonner avec des informations incomplètes et/ou qualitatives. Pour le conditionnement d'informations incertaines dans un cadre possibiliste qualitatif à intervalles, nous avons montré que tout conditionnement à base d'intervalles satisfaisant trois postulats naturels est nécessairement basé sur l'ensemble des distributions de possibilités standard compatibles. Une deuxième contribution consiste en une proposition d'algorithmes efficaces pour calculer les bornes inférieure et supérieure de la distribution conditionnée tandis qu'une troisième contribution consiste en une contrepartie syntaxique des distributions conditionnelles à base d'intervalles dans le cas où ces dernières sont codées de manière compacte sous forme des bases de connaissances possibilistes (Benferhat et al., 2017) (Benferhat et al., 2015). Par ailleurs nous avons proposé une nouvelle définition du conditionnement incertain dans le cadre de la théorie des possibilités (IJCAI'13). Cette nouvelle définition, appelée conditionnement hybride, prend en paramètre un ensemble de triplets composés de formules propositionnelles, du degré d'acceptation de ces formules ainsi que le mode de révision de ces formules. Nous avons proposé une caractérisation de cette définition de conditionnement à partir d'opérations élémentaires sur les distributions de possibilités. Un résultat important de ce travail est la proposition d'une procédure de calcul efficace du conditionnement hybride, qui a une complexité spatiale polynomiale par rapport à la taille de la base de connaissance initiale.
- **Théorie des possibilités à base d'ensembles** Nous nous sommes intéressés au conditionnement des informations incertaines où les poids associés aux formules sont sous la forme d'ensembles de degrés d'incertitude (ECAI'16). Nous avons étudié la théorie des possibilités à base d'ensembles et avons fourni une caractérisation d'une logique possibiliste au moyen du concept de bases logiques possibilistes compatibles et de distributions de possibilités compatibles. La deuxième partie du travail traite du conditionnement des distributions de possibilités à base d'ensembles. Nous avons proposé d'abord un ensemble de trois postulats naturels pour conditionner ces distributions de possibilités. Nous avons montré ensuite que tout conditionnement satisfaisant ces trois postulats est nécessairement basé sur le conditionnement de l'ensemble des distributions de possibilités standard compatibles. Nous avons enfin montré comment calculer efficacement le conditionnement dans ces bases de connaissances.
- **Raisonnement avec des informations incertaines dans les réseaux possibilistes** Les modèles graphiques sont des outils compacts et puissants pour représenter et raisonner sous incertitude. Les réseaux possibilistes sont des modèles de croyances graphiques basés sur la théorie des possibilités. Nous avons abordé le raisonnement avec des informations incertaines dans les réseaux possibilistes quantitatifs et qualitatifs (Benferhat et Tabia, 2014). Plus précisément, nous avons fourni d'abord des contreparties possibilistes des méthodes dites *Virtual Evidence* de Pearl, et nous les avons comparées aux contreparties possibilistes de la règle de conditionnement de Jeffrey. Comme dans le cas probabiliste, les deux méthodes se révèlent équivalentes dans le cadre quantitatif concernant l'existence et l'unicité de la solution. Cependant, dans le cadre qualitatif, la méthode de Pearl, qui s'applique directement aux modèles graphiques, est en désaccord avec la règle de Jeffrey. Nous avons identifié les situations où les méthodes ne sont pas équivalentes. Nous avons enfin abordé des questions annexes comme les transformations d'une méthode à l'autre et la commutativité. Par ailleurs, nous avons proposé un modèle générique pour la compilation des modèles graphiques (Ayachi, Ben Amor et Benferhat, 2014). Ce modèle prend en compte non seulement les variables d'observation mais également des variables d'intervention. Nous avons montré que les deux méthodes de la représentation des relations de causalité (à base d'ajouts de variables de type « do » ou à base de graphes mutilés) se modélisent facilement dans notre modèle.

**Raisonnement spatio-temporel** Le raisonnement spatio-temporel tient une place centrale en intelligence artificielle. Il possède, en effet, différents domaines d'applications parmi lesquels le traitement du langage naturel, la planification et les systèmes d'information géographiques.

- **Mesure de l'incohérence dans le raisonnement spatio-temporel** Nous avons abordé le problème de la quantification du degré d'incohérence dans le cadre du raisonnement spatio-temporel (Condotta, Raddaoui et Salhi, 2016). Nous avons ainsi proposé un cadre formel permettant de définir différents types de mesures d'incohérence. Nous avons également proposé une méthode décrivant la manière dont de telles mesures peuvent être appliquées dans le cadre de la fusion de connaissances.
- **Logique pour le raisonnement spatio-temporel** Nous avons étudié une logique formelle pour le raisonnement spatio-temporel, qui est obtenue par une combinaison de la logique temporelle linéaire et un formalisme qualitatif

de raisonnement spatial (TABLEAUX'15). Nous avons en particulier proposé pour cette logique une procédure de recherche de preuves fondée sur la méthode des tableaux.

- **Réseaux de contraintes qualitatives** Nous avons proposé un algorithme original et efficace pour résoudre un des problèmes fondamentaux des réseaux de contraintes qualitatives (RCQ) pour le temps et l'espace : le problème de l'étiquetage minimal (IJCAI'13). Intuitivement, ce problème, qui a été montré NP-difficile, consiste, étant donné un RCQ contraignant les positions relatives d'un ensemble d'entités temporelles ou spatiales, à caractériser l'ensemble des positions relatives réalisables entre chaque paire d'entités. L'algorithme proposé utilise les notions de classes de relations traitables et de triangulations de RCQ. Il est générique dans le sens où il peut être utilisé dans le cadre de la plupart des formalismes qualitatifs du domaine. Nous nous sommes également intéressé au problème de la caractérisation des contraintes non redondantes d'un RCQ du calcul spatial RCC8 (Sioutis, Li et Condotta, 2015). Notre étude de ce problème nous a conduit à établir différents résultats de complexité et à définir un algorithme de résolution basé sur la cohérence locale particulière qu'est la chemin-cohérence partielle permettant de caractériser de manière efficace les contraintes non redondantes d'un RCQ défini sur une des classes distributives maximales de RCC8. Nous avons proposé différents encodages originaux en Partial-Max-SAT pour le problème MAX-QCN, qui est le problème d'optimisation consistant à déterminer un scénario cohérent (une configuration d'entités) maximisant le nombre de contraintes satisfaites d'un réseau de contraintes qualitatives (Condotta, Nouaouri et Sioutis, 2016). Nous avons considéré les deux formalismes qualitatifs pour le temps que sont le calcul des intervalles et le calcul des points. Pour ces deux formalismes, nous avons étudié un problème d'optimisation appelé MinCons qui consiste à caractériser des scénarios cohérents d'un RCQ minimisant le nombre de points temporels utilisés (Acta Informatica'16). Nous avons montré que ce problème est NP-difficile dans le cas général et avons caractérisé des cas polynomiaux pour lesquels sont définis des algorithmes de résolution. Nous avons aussi proposé et étudié un algorithme permettant de calculer de manière efficace la fermeture d'un réseau de contraintes qualitatives (RCQ) pour la chemin-cohérence partielle (Sioutis et Condotta, 2017). La calcul de cette fermeture est un élément crucial sur lequel sont basés la plupart des algorithmes de résolution des différents problèmes posés sur les RCQ. L'algorithme proposé dans l'article est basé sur une notion originale d'abstraction de RCQ.

**Argumentation** Dans beaucoup d'interactions entre agents (humains ou artificiels), il est nécessaire d'utiliser des arguments pour articuler les discussions, négociations, ou concertations. Le nombre de plate-formes sur le web permettant à une communauté d'interagir en échangeant et en votant sur des arguments ne cesse d'augmenter. Ce genre de plate-formes est déjà utilisé pour des consultations citoyennes. Ces nouveaux usages nécessitent de repenser la théorie de l'argumentation.

- **Sémantiques graduées** Des sémantiques graduées pour l'argumentation abstraite de Dung ont été récemment proposées. Nous avons recensé l'ensemble de ces sémantiques et l'ensemble des propriétés de rationalité proposées dans la littérature (nous en avons également proposé de nouvelles). Nous avons étudié l'ensemble des sémantiques existantes à la lumière de ces propriétés. Ceci a permis d'obtenir une première vue globale des sémantiques graduées, de discuter de la pertinence de l'ensemble de ces propriétés, et de lancer la discussion sur le comportement minimal attendu pour ces sémantiques (Bonzon et al., 2016).
- **Révision de systèmes d'argumentation** Nous avons proposé d'étudier des opérateurs de révision, au sens AGM, pour les systèmes d'argumentation. L'idée est de considérer que les inférences d'un système d'argumentation sont les arguments que l'on sait acceptés ou rejetés par le système (étant donnée une sémantique). La révision d'un tel système consiste alors en la modification de celui-ci pour modifier les arguments acceptés ou rejetés. Nous avons étudié comment modifier minimalement le graphe d'attaque entre les arguments afin de modifier minimalement l'ensemble des arguments acceptés (Coste-Marquis et al., 2014). Dans une seconde approche nous avons proposé une opération de révision par traduction, en utilisant un encodage en logique propositionnelle. L'idée est de coder les informations d'un système d'argumentation abstrait dans une formule logique, puis d'utiliser un opérateur de révision en logique propositionnelle (qui sont bien étudiés et bien fondés), puis de décoder le résultat pour obtenir le système d'argumentation. Comme dans l'approche précédente, plusieurs notions de minimalité peuvent être considérées et combinées. Mais alors que l'approche précédente ne considérait que l'acceptabilité des arguments, cette approche permet de considérer à la fois l'acceptabilité et la relation d'attaque (JELIA'14). Enfin, une dernière contribution sur ce sujet concerne les opérateurs d'enforcement, qui ont été proposés par Baumann et Brewka, et qui sont très proches des opérateurs de révision. Nous avons proposé une généralisation de cette définition d'enforcement (permettant l'ajout de nouveaux arguments et la remise en cause de certaines attaques) et étudié ses propriétés.

Nous avons proposé aussi une implémentation de ces opérateurs utilisant une traduction en un problème d'optimisation pseudo-booléen, et montré que cela permettait d'envisager le calcul de ces enforcements dans des applications avec un grand nombre d'arguments (Coste-Marquis et al., 2015).

- **Agrégation de systèmes d'argumentation** Nous avons étudié également la problématique de l'agrégation de systèmes d'argumentation. Dans un premier travail nous avons fait le point sur les approches existantes, en examinant en particulier si les propriétés proposées, issues de la théorie du vote, étaient satisfaites par les propositions existantes et par une nouvelle méthode que nous avons mise en avant. La conclusion de ce travail est double. Tout d'abord, les opérateurs existants ne sont pas satisfaisants. Mais surtout les propriétés des méthodes d'agrégation identifiées dans la littérature, basées sur des propriétés issues de la théorie du vote, ne sont pas adéquates (Delobelle, Konieczny et Vesic, 2015). Nous avons ensuite proposé de nouvelles propriétés, inspirées des postulats existants en fusion de croyances propositionnelle (qui sont plus adaptés à ce cadre que les propriétés issues de la théorie du vote), et proposé d'autres opérateurs effectuant une fusion de systèmes d'argumentation se basant sur le statut des arguments, que nous avons caractérisés à l'aide de ces propriétés (Delobelle et al., 2016).
- **Préférences et argumentation** Nous avons étudié la question du nombre exponentiel d'extensions possibles pour certaines sémantiques. Nous avons abordé cet aspect en appliquant une stratégie d'utilisation de préférences au niveau sémantique afin de déterminer les arguments préférés (ECAI'16). Pour ce faire, différentes relations de préférence ont été étudiées. Nous avons également traité dans ce cadre le problème du calcul des extensions Top-k selon une relation de préférence spécifiée par l'utilisateur.

**Mesures de l'incohérence** L'incohérence est souvent inévitable dans les systèmes à base de connaissances et dans les systèmes multi-agents. Mesurer le degré d'incohérence des bases de connaissances des agents facilite la compréhension d'un agent de son environnement et lui fournit une aide pour la prise de décision.

- **Taxonomie des mesures syntaxiques** Nous avons proposé une taxonomie des mesures d'incohérence basées sur les ensembles minimaux incohérents. Nous construisons un graphe biparti entre les formules et les MUS et nous avons montré que la plupart des mesures syntaxiques se classent dans une taxonomie basée sur la partie de l'information contenue dans ce graphe biparti qui est exploitée. Cette approche permet une vue synthétique de ces mesures et d'en définir de nouvelles (De Bona et al., 2018).
- **Incohérence et additivité** Souvent la structure des MUS est moins prise en compte dans l'évaluation du degré d'incohérence des bases de connaissances dans les approches syntaxiques. Nous avons étudié la propriété d'additivité qui est rarement discutée dans la littérature en raison de la difficulté de sa modélisation (Jabbour, Ma et Raddaoui, 2014). Elle permet d'additionner le degré de conflit de sous-bases sous la condition de la disjonction de leurs MUSes. Nous avons proposé une restriction de cette dernière appelée Independence-Additivité qui exige une indépendance totale en terme de formules et de MUSes entre les sous-bases. Dans (Jabbour et al., 2016) nous avons généralisé cette notion aux ensembles. Cela a donné lieu à un nouveau problème appelé *set packing* fermé qui est une extension du problème bien connu du *set packing*. Nous avons montré que ce nouveau problème est aussi complexe que celui du *set packing* standard de point de vue de la théorie de la complexité. Nous avons également proposé une extension de la mesure basée sur la borne inférieure en associant un vecteur pour chaque base de connaissances. Ce vecteur est une partition en *set packing* fermés maximaux de la base en question. De plus, à partir de ce vecteur deux mesures d'incohérences ont été instanciées en agrégeant les valeurs de ce vecteur, soit en considérant une somme pondérée ou en utilisant la fraction continue de ce vecteur. Nous avons également formulé le problème de *set packing* fermé et sa version pondérée en problèmes d'optimisation basé sur Max-SAT et la programmation linéaire 0/1. Nous avons poursuivi l'exploration des mesures d'incohérence du point de vue de la structure des MUSes (Jabbour, Ma et Raddaoui, 2014). Partant du constat que la disjonction entre MUSes est un facteur accentuant la valeur de l'incohérence, nous avons proposé une propriété appelée sous-additivité qui est une contre-partie de la propriété de l'indépendance-additivité proposée dans (Jabbour et al., 2016). Nous avons montré comment formuler de nouvelles mesures vérifiant cette propriété en prenant en compte les intersections entre MUSes.

**Raisonnement sur les ontologies** Les formalismes d'ontologie standard n'offrent aucun moyen pour prendre en compte les priorités ou l'incertitude lors de la représentation des connaissances. Nous avons proposé plusieurs extensions des logiques de description standard pour attaquer ce problème.

- **DL-Lite possibiliste** Nous avons proposé une extension des principaux fragments de DL-Lite dans le cadre de la théorie des possibilités (Benferhat et Bouraoui, 2017). Cette extension a été d'abord réalisée en posant les bases de DL-Lite possibiliste, notée pi-DL-Lite, par l'extension de DL-Lite\_core, le noyau de toutes les logiques de la famille DL-Lite. Nous avons d'abord défini la syntaxe, la sémantique et les propriétés de pi-DL-Lite\_core, ensuite nous avons introduit les tâches de raisonnement standard. Un avantage important de l'utilisation de la logique possibiliste est qu'elle permet un traitement naturel de l'incohérence en se basant sur la notion de degré d'incohérence. On peut associer à une base pi-DL-Lite un degré d'incohérence (qui varie habituellement, par exemple, entre 0 et 1 si l'on utilise l'intervalle unitaire  $[0,1]$  pour coder les degrés de certitude). Nous avons montré que le calcul de ce degré d'incohérence peut être réalisé par une extension directe de l'algorithme de test de satisfaisabilité d'une base DL-Lite standard. Cette fermeture négative est ensuite transformée en requêtes conjonctives pondérées évaluées sur l'ensemble des individus afin de calculer le degré d'incohérence.
- **Inférence tolérant l'incohérence** Bien qu'une grande variété d'approches d'inférence tolérant l'incohérence (« inconsistency-tolerant semantics ») ait été proposée, un manque de compréhension de la façon dont ces différentes approches se relient les unes aux autres et de leurs caractéristiques subsistait. Par conséquent, nous avons mis en place un cadre unificateur pour l'inférence tolérant l'incohérence pour OBDA, en proposant une feuille de route pour la gestion d'incohérences dans le cadre des ontologies exprimées en règles existentielles (un langage qui généralise les langages d'ontologies légères telles que DL-Lite). Cela nous a conduit à proposer un cadre générique qui non seulement permet de contenir les approches existantes, mais permet également d'introduire facilement de nouvelles inférences tolérant l'incohérence (Baget et al., 2016) (JELIA'16). Pour mettre en place ce cadre, nous avons introduit la notion de base de connaissances avec MBox. Une base de connaissances avec MBox est composée par une TBox standard et un multi-ensemble d'ABox, appelé MBox. Ce cadre repose sur deux notions clés : les modificateurs et les stratégies d'inférence. Une sémantique tolérante à l'incohérence est alors considérée comme étant paramétrée par un modificateur composé, qui transforme l'ABox originale en une MBox, et par une stratégie d'inférence, qui permet d'évaluer une requête dans la base de connaissances (TBox, MBox) résultante. Un modificateur composé est une combinaison finie des trois modificateurs élémentaires suivants qui peuvent être appliqués sur une MBox i) les modificateurs d'expansion, ii) les modificateurs de fraction et iii) les modificateurs de sélection. En se basant sur ce cadre unificateur, nous avons analysé le pouvoir inférentiel et les propriétés des ces inférences en termes de satisfaction de postulats de rationalité. Nous avons également identifié la complexité des différentes inférences tolérant l'incohérence.
- **Inférence par non-objection** Dans ce travail, notre objectif était de définir une bonne approximation de l'inférence AR (universelle), qui soit strictement plus productive que l'inférence IAR (libre) sans être aussi aventureuse que l'inférence existentielle. À cette fin, nous avons proposé une nouvelle relation d'inférence tolérant l'incohérence, appelée inférence par non-objection (no-inférence), ainsi que ses différentes variantes (Ino-inférence et cno-inférence) (Benferhat et al., 2016). Le dénominateur commun à toutes ces nouvelles relations d'inférences est le suivant : une requête est considérée comme valide si elle est dérivée par au moins une réparation et elle est cohérente avec toutes les autres réparations. L'intuition derrière est que l'implication d'une requête d'une réparation est considérée comme un processus de « vote », où toutes les réparations peuvent voter pour ou contre l'implication d'une requête, ou elles peuvent s'abstenir. Dans cette approche, une requête est considérée comme valide s'il y a au moins une réparation qui vote en sa faveur (c-à-d. que la requête est dérivée de la réparation) et qu'aucune des autres réparations ne vote contre. La différence entre les inférences no, Ino et cno est la manière dont les réparations qui ont le droit de vote sont sélectionnées. Cependant, pour toutes ces variantes, la relation d'inférence est plus productive que l'inférence AR, et contrairement à l'inférence existentielle, elle ne produit que des conclusions cohérentes. Un atout important de l'approche est que la complexité d'évaluation des requêtes avec l'inférence par non-objection est polynomiale.
- **Sélection d'une réparation préférée** Comme souligné dans la première partie de cette section, les informations sont souvent affectées par l'incertitude ou sont munies de priorités. C'est particulièrement le cas d'OBDA quand les données sont fournies par plusieurs sources potentiellement conflictuelles avec des niveaux de fiabilité différents. Nous avons ainsi traité le problème d'inférence tolérant l'incohérence dans le cas où l'ABox est stratifiée. Nous avons étudié la question de sélection d'une seule réparation préférée (c-à-d la composition d'une réparation préférée) (IJCAI'15). En effet, la sélection d'une seule réparation est prometteuse, car une fois la réparation calculée, on peut répondre efficacement aux requêtes. Nous avons proposé de nouveaux modèles de composition d'une seule réparation préférée. Ces approches ont comme point de départ de modifier la réparation dominante en la remplaçant par une composition d'un ou plusieurs modificateurs. Nous avons aussi fourni une analyse comparative suivie d'études expérimentales des différentes approches étudiées.



**General Game Playing** L'objectif du *General Game Playing* est d'apprendre à jouer à n'importe quel jeu de stratégie, sans connaître les règles du jeu à l'avance. Les jeux sont décrits dans un langage de représentation, appelé *Game Description Language* (GDL), qui est suffisamment expressif pour représenter des jeux déterministes ou stochastiques, à information totale ou partielle. Durant une compétition GGP, les agents reçoivent les règles du jeu en GDL et ont 180 secondes (*start clock*) pour intégrer ces règles. Une fois le délai atteint, les agents ont 15 secondes (*play clock*) par tour pour décider du prochain coup.

Depuis la naissance du GGP en 2003, de nombreux paradigmes algorithmiques ont été étudiés, tels que la programmation logique (ASP), la construction automatique de fonctions d'évaluation, ou encore la recherche arborescente Monte Carlo (MCTS). Au CRIL, nous avons proposé un paradigme s'inspirant des méthodes de résolution par contraintes et de bandits multi-bras. L'idée sous-jacente consiste à traduire les règles GDL en réseau de contraintes stochastiques (SCSP) et d'exploiter ce réseau pour la recherche de stratégies optimales, ou approximatives. En particulier, dans (Constraints'16), nous avons construit un solveur couplant la propagation de contraintes (MAC) avec les bandits stochastiques (Flat-UCB), qui a gagné la compétition GGP en continu durant la période 2015-16. Dans (Koriche et al., 2017), nous avons proposé une méthode de détection de contraintes stochastiques, permettant d'élaguer une grande partie de l'arbre de jeu. L'algorithme MAC-UCB-SYM est au cœur du logiciel « Woodstock » qui a gagné à la fois la compétition GGP en continu durant la période 2016-17, et a gagné la compétition mondiale IGGP 2016 à Stanford.

**Apprentissage pour le traitement automatique de la langue** Nous avons développé ces dernières années plusieurs approches d'apprentissage pour le traitement automatique du langage naturel. Ces approches s'appuient sur des représentations vectorielles des mots et le concept de *word embedding*.

- **Apprentissage des espaces conceptuels à partir des concepts interreliés** Plusieurs méthodes proposées récemment visent à apprendre des représentations vectorielles à partir de grandes collections de textes. Ces représentations apprises associent chaque « objet » d'un domaine d'intérêt donné à un point dans un espace euclidien de grande dimension, mais elles ne modélisent pas les concepts (catégories) de ce domaine et ne peuvent donc pas être directement utilisées pour la catégorisation et les tâches cognitives associées. Une solution naturelle est de représenter des concepts comme des gaussiennes, apprises des représentations vectorielles de leurs instances, mais cela ne peut être fait de manière fiable que si suffisamment d'instances sont données, ce qui n'est pas souvent le cas. Nous avons introduit (Bouraoui et Schockaert, 2018) un modèle bayésien qui aborde ce problème en construisant des a priori informatifs à partir des bases de connaissances (en logique de description) sur la façon dont les concepts en question sont liés les uns aux autres.
- **Apprentissage non supervisé des vecteurs de relation distributionnelle** Plusieurs modèles d'apprentissage de *word embeddings* tel que GloVe s'appuient sur des statistiques de co-occurrence de mots pour apprendre les représentations vectorielles de la signification des mots. Bien que nous puissions également nous attendre à ce que des statistiques de co-occurrence puissent être utilisées pour obtenir des informations riches sur les relations entre les différents mots, les approches existantes pour modéliser de telles relations sont basées sur le traitement de vecteurs de mot pré-formés. Nous avons introduit (Bouraoui, Jameel et Schockaert, 2018) une nouvelle méthode qui apprend directement les vecteurs de relations à partir des statistiques de co-occurrence. Nous avons proposé une variante de GloVe dans laquelle il existe une connexion explicite entre les vecteurs de mots et les vecteurs issus de la mesure de co-occurrence pondérés PMI. Contrairement aux modèles basés sur les réseaux de neurones, notre modèle apprend les vecteurs de relations de manière non supervisée, ce qui implique qu'il peut être utilisé pour mesurer des similarités relationnelles.
- **Induction de relations à partir de *word embeddings*** Étant donné un ensemble d'instances d'une relation, la tâche d'induction de relation consiste à prédire d'autres paires de mots susceptibles d'être liées de la même manière. Bien qu'il soit naturel d'utiliser des *word embeddings* pour cette tâche, les approches standard basées sur la translation de vecteurs se révèlent peu performantes. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé (COLING'18) deux modèles d'induction de relation probabilistes. Le premier est basé sur des translations, mais utilise des gaussiennes pour modéliser explicitement leur variabilité et pour coder des contraintes sur les mots source et cible qui peuvent être choisis. Dans le second modèle, nous utilisons la régression bayésienne pour encoder l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre les représentations vectorielles de mots apparentés, ce qui est considérablement plus faible que l'hypothèse sous-jacente aux modèles basés sur la translation.

## Faits marquants

- 2018 : Ivan Varzinczak reçoit le **prix de logique universelle**.
- 2018 : le **GDR sur les aspects formels et algorithmiques de l'IA**, porté par Sébastien Konieczny, est créé.
- 2017 : l'article décrivant Woodstock présenté à IJCAI'17 (Koriche et al., 2017) est retenu parmi les trois meilleurs articles de la conférence pour l'obtention du *distinguished paper award*.
- 2017 : Sébastien Konieczny pilote le groupe de travail « recherche amont » pour le rapport ministériel **FrancelA**.
- 2017 : Eric Piette, doctorant encadré par Frédéric Koriche, Sylvain Lagrue et Sébastien Tabary, obtient le **prix (ex-aequo) AFIA de la meilleure thèse en IA de l'année**.
- 2017 : la conférence internationale IEA/AIE (Springer) est organisée du **27 au 30 juin à l'université d'Artois** sous la responsabilité de Salem Benferhat, Sylvain Lagrue et Karim Tabia.
- 2015 : le logiciel CoQuiAAS, construit sur un solveur de contraintes pour l'inférence argumentative **remporte la première compétition internationale d'argumentation**.
- 2014 : le « **Panorama de l'intelligence artificielle - ses bases méthodologiques, ses développements** » est publié chez Cepaduès. L'ouvrage, co-édité par Pierre Marquis, a nécessité un travail d'organisation important (3 volumes, 42 chapitres, 1328 pages, co-écrits par 121 collègues de la communauté francophone d'IA).
- 2014 : Sébastien Konieczny est président du comité de programme du workshop international **NMR'14**.

## Projet scientifique à cinq ans

Le projet scientifique de l'axe RCR se décline en quatre sujets de recherche. La plupart de ces sujets sont intrinsèquement reliés aux notions d'explication et d'interprétabilité qui joueront un rôle majeur dans le projet du laboratoire.

### Explication de l'apprentissage

Avec le rôle central que joue aujourd'hui l'apprentissage automatique dans la recherche et l'industrie de l'IA, il est impossible d'ignorer ce domaine fondamental. Les algorithmes d'apprentissage statistique, séquentiel et par renforcement (comme les SVMs, *Stochastic Gradient Descent*, *Policy Iteration*), ainsi que les réseaux de neurones profonds (en particulier, les réseaux convolutionnels et récurrents) ont conduit à des résultats spectaculaires dans de nombreuses applications, telles que le traitement automatique des langues, le traitement d'images, les systèmes de recommandation, les jeux, et les véhicules autonomes. Cependant, même si le succès de l'apprentissage automatique est indéniable, son utilisation dans certains domaines tels que l'IA médicale, la découverte scientifique, la sécurité ou criminologie informatique, l'analyse financière ou l'e-commerce, reste à confirmer pour une raison principale : les algorithmes d'apprentissage sont, pour la plupart, des boîtes noires et il est impossible, pour un humain, de comprendre les décisions qu'ils proposent par induction ou renforcement. Obtenir un apprentissage *interprétable* est donc un objectif crucial à atteindre pour ces domaines ; l'interprétabilité des prédictions faites par l'apprenant permet à l'utilisateur de mieux appréhender le comportement de l'apprenant et, à terme, de lui faire *confiance* pour prendre des décisions.

Ce sujet de recherche consiste à *interfacer* les boîtes noires de l'apprentissage avec l'utilisateur humain. De manière générale, les prédictions faites par un apprenant doivent passer par un modèle compréhensible. L'explication de l'apprentissage peut se décomposer en plusieurs dimensions, selon le type d'explication que l'on recherche, le modèle explicatif fourni à l'utilisateur, et l'approche permettant d'expliquer l'apprentissage.

- **Type d'explication.** Dans son ouvrage « *Causality* » (2009), Pearl distingue les explications prédictives des explications contre-factuelles. Dans le cadre de l'apprentissage (par exemple, pour la classification), une explication prédictive décrit, en termes intelligibles pour l'utilisateur, pourquoi l'algorithme d'apprentissage a associé l'étiquette  $Y$  à une instance  $X$ . Les explications prédictives peuvent être positives (pourquoi la machine a prédit que l'image courante contient une guitare ?), ou négatives (pourquoi la machine s'est trompée en prédisant que l'image contient un violoncelle ?). Une explication contre-factuelle décrit comment l'algorithme d'apprentissage se comporterait si l'on changeait la valeur de certaines variables décrivant  $X$  (si je mettais un filtre bleu sur l'image, est-ce que la machine prédirait que l'image filtrée contient bien une guitare ?). La forme

négative d'explication prédictive, ainsi que l'explication contre-factuelle, sont particulièrement utiles pour le débogage d'un algorithme d'apprentissage.

- **Type de modèle.** Il existe une grande variété de modèles en apprentissage, comprenant les représentations logiques (par exemple, les règles de Horn et les arbres de décision), les modèles géométriques (comme les fonctions linéaires et les variétés), les modèles graphiques (incluant les réseaux bayésiens et les CP-nets), et les modèles neuronaux (superficiels et profonds). Le choix d'un modèle pour l'explication de l'apprentissage dépend de divers aspects comme le champ d'application et le domaine de compétence de l'utilisateur. Cependant, la *parcimonie* constitue l'un des critères les plus importants pour le choix d'un modèle. Par exemple, si un analyste financier préfère une fonction linéaire à un réseau de neurones pour expliquer une prédiction, le modèle ne doit contenir que très peu de variables pertinentes (non nulles). De manière similaire, un réseau bayésien parcimonieux sera préférable à un réseau profond de Boltzmann pour expliquer au statisticien la prédiction incertaine réalisée par l'apprenant.
- **Type d'approche.** Un paradigme naturel pour interpréter une boîte noire est d'apprendre un modèle parcimonieux à partir des entrées-sorties de la boîte noire. Il s'agit donc d'une architecture d'apprentissage en couche : un modèle prédictif non interprétable *A* (par exemple, un réseau de neurones) est appris sur les données de l'application et, à partir des entrées-sorties de *A* est entraîné un nouveau modèle parcimonieux *B*, qui sert d'interface à l'utilisateur pour poser diverses requêtes d'explication. On peut distinguer deux approches pour extraire *B* à partir de *A* : (i) l'approche hors ligne ou *batch* qui consiste à choisir un ensemble d'entrées-sorties de *A* pour inférer *B*, et (ii) l'approche en ligne qui consiste à réviser itérativement le modèle parcimonieux *B* au cours de l'apprentissage du modèle profond *A*. L'approche hors ligne a été expérimentée par Ribeiro, Singh et Guestrin dans KDD'16 pour interfacer un classifieur d'images avec une fonction linéaire parcimonieuse. De ce que nous en savons, l'approche en ligne n'a pas encore été conceptualisée, ni expérimentée.

Ces trois dimensions participent au traitement du fameux dilemme entre la **précision** et l'**interprétabilité** de l'apprentissage. Les modèles parcimonieux tels que les règles logiques, les arbres de décision, ou les fonctions linéaires sont, en pratique, nettement moins performants que les modèles non interprétables tels que les réseaux de neurones profonds, les forêts aléatoires, ou encore les machines à support de vecteurs. L'architecture en couche MAI permet de gérer au mieux ce compromis en utilisant un modèle parcimonieux *haut niveau* qui sert d'interface pour le modèle non interprétable *bas niveau*. Cependant, il reste de nombreuses questions ouvertes à traiter avant d'implémenter cette architecture pour l'utiliser dans des applications : quel type de modèle explicatif choisir ? Le modèle cible est-il « apprenable » (au sens agnostique) ? Ce modèle est-il calculatoirement efficace pour traiter des requêtes contre-factuelles ? Comment extraire un modèle explicatif dans une application en ligne faisant interagir l'utilisateur et le prédicteur ? Notre projet se focalise ici sur trois thèmes, décrits ci-dessous, chacun associé à une application concrète.

**Explication de classifieurs par des réseaux causaux** Le problème de classification apparaît dans de multiples applications, comme la reconnaissance d'images, le diagnostic médical, ou la prédiction de pannes. Les classifieurs utilisés offrant des garanties de précision sont typiquement des modèles non interprétables (en particulier, des machines à support de vecteurs ou des réseaux de neurones profonds). Un des formalismes les plus utilisés pour inférer des explications (prédictives ou contre-factuelles) pour des applications faisant intervenir de multiples variables interdépendantes est celui des *modèles causaux* proposés par Pearl. Ces modèles sont souvent caractérisés par des réseaux bayésiens acycliques, avec deux différences importantes : les réseaux causaux sont parcimonieux (pour expliquer une décision), et l'orientation des arcs dans la structuration du modèle est importante (la causalité ne se réduit pas à une corrélation statistique). La question principale ici est : peut-on apprendre un modèle causal parcimonieux sur les entrées-sorties d'un modèle non interprétable comme un réseau de neurones ? Étant donné que le problème d'apprentissage de réseaux bayésiens est généralement NP-difficile, il faudra identifier des classes traitables et, pour les cas difficiles, trouver des algorithmes d'apprentissage avec garanties d'approximation. Nous comptons appliquer cette approche dans les problèmes de diagnostic médical où l'importance des réseaux causaux est largement reconnue.

**Explication de représentations vectorielles par des règles** Les modèles à base de représentation vectorielle (ou *Vector Space Models*) sont des prolongements géométriques permettant de réduire la dimension des données. Ces modèles sont aujourd'hui très utilisés en fouille de textes et dans les systèmes de recommandation. En particulier, les *Word Embeddings* et les *Knowledge-Graph Embeddings* sont des prolongements où chaque vecteur correspond respectivement à un mot et un triplet entité-relation-entité. Ces modèles sont typiquement appris par des réseaux de neurones ou des N-grams. Cependant, les représentations vectorielles contiennent en pratique des millions, ou même des milliards, de vecteurs de poids, et restent donc incompréhensibles pour l'humain. Dans ce contexte, nous

souhaitons développer des algorithmes d'apprentissage qui, à partir d'un modèle à base de représentation vectorielle, permettent d'acquérir des *règles par défaut* qualitatives ou quantitatives. Par exemple, à partir d'un *Word Embedding* appris par un réseau de neurones comme Word2Vec, il serait intéressant d'extraire des règles qualitatives comme « la plupart des films similaires à Blade Runner sont des films de Science-Fiction ». De manière analogue, à partir d'un *Knowledge Graph Embedding* entraîné sur des données textuelles, il serait utile d'extraire des règles quantitatives comme « 80% des capitales observées sont des grandes villes ». L'apprentissage de règles par défaut sera non seulement utile pour fournir des explications d'un modèle vectoriel, mais aussi pour relier ce modèle à une ontologie existante (exprimée dans une logique de description), afin d'enrichir la base de connaissances. Nous comptons appliquer cette approche en fouille de texte, et les travaux en apprentissage statistique relationnel (réseaux de Markov logiques, programmes logiques bayésiens) serviront de point de départ à cette étude.

**Explication de classements par des réseaux de préférences** Le problème « *Learning to Rank* » est une tâche fondamentale dans les systèmes de recommandation : étant donné un ensemble d'instances associées à un contexte (par exemple, un profil utilisateur), le but est de prédire un classement (ou *ranking*) des instances correspondant aux préférences de l'utilisateur. De nos jours, le problème de *ranking* est résolu en pratique par des algorithmes d'apprentissage dont le modèle induit (réseau de neurones, réseau de Markov, modèle de Mallows, etc.) est impossible à interpréter. Dans ce contexte, les réseaux de préférences, comme les CP-nets et leurs généralisations (TCP-nets, UCP-nets, etc.) peuvent être utiles pour expliquer une prédiction par des réponses *ceteris paribus* telles que « toute chose étant égale par ailleurs, vous préférez les films de Science-Fiction aux comédies dramatiques et vous accordez plus d'importance au genre du film qu'à son pays d'origine, donc ceci implique de recommander *Blade Runner* avant *The Artist* ». En relation avec le type d'interface pour l'explication de l'apprentissage, notre étude se focalisera ici sur deux problèmes : (i) l'apprentissage statistique d'un CP-net à partir des entrées-sorties d'un algorithme de ranking, et (ii) l'apprentissage en-ligne de ces CP-nets. Comme le problème (i) est généralement NP-difficile (du fait de la contrainte d'acyclicité d'un CP-net), il s'agira de trouver des classes traitables de CP-nets parcimonieux, ou encore des algorithmes d'extraction avec garantie d'approximation. Le problème (ii) est encore plus difficile puisqu'il s'agit d'extraire à *la volée* un réseau de préférence au cours de la prédiction de classements. L'application de ce projet se situe naturellement en recommandation, avec un intérêt particulier pour les grandes bases de données telles que IMDB ou MovieLens.

### Inférence et explication dans les jeux

Les jeux (séquentiels) coopératifs et compétitifs ont été très étudiés au laboratoire durant le dernier contrat. Notamment, le *General Game Playing* (GGP) consiste à mettre en compétition des agents ne connaissant pas le jeu à l'avance, les règles étant écrites dans un langage déclaratif (GDL). Dans ce contexte, nos recherches pour le prochain contrat se décomposent en deux parties, associées à l'inférence et l'explication dans les jeux.

**Inférence dans la résolution de jeux** Le point clé du joueur GGP « Woodstock » réside dans la modélisation d'un jeu de stratégie comme un problème de satisfaction de contraintes stochastiques ; le jeu est résolu en couplant le maintien d'arc-cohérence (MAC) avec les bandits stochastiques (UCB). Même si cette approche a fait ses preuves en pratique face à d'autres méthodes en GGP, tout reste à faire dans la théorie et l'algorithmique de l'inférence dans les jeux ; nous examinerons principalement deux aspects :

- **Propagation stochastique.** La propagation dans les réseaux de contraintes stochastiques n'a pour l'instant fait l'objet que de peu de recherches en programmation par contraintes. Notre approche, étayée par Woodstock, consiste à combiner la cohérence d'arc pour le filtrage, avec les bandits multi-bras pour l'estimation. Nous chercherons à étendre cette approche en traitant plusieurs questions : quelles formes de cohérence (en particulier, arc ou chemin) et de bandits (stochastiques ou adversariaux) utiliser ? Quelles sont les propriétés de *tightness* pour les diverses familles de cohérence stochastiques envisagées ? Quelles sont leur complexité calculatoire et efficacité pratique ?
- **Inférence d'équilibres de Nash.** La résolution d'un jeu répétitif déterministe ou coopératif passe par la recherche d'équilibres de Nash. Pour l'instant, Woodstock n'utilise qu'une stratégie MinMax (approximative) implémentée par une contrainte globale. Cependant, il est bien connu que cette stratégie n'est asymptotiquement optimale que pour les jeux à deux joueurs et à somme nulle. Dans le contexte plus général des jeux (finis) multi-joueurs à somme arbitraire, les équilibres de Nash sont mixtes. Trouver de tels équilibres est un

problème calculatoirement difficile. Nous souhaitons ici modéliser de tels équilibres par une contrainte globale de partition, et d'utiliser à nouveau le maintien de cohérence avec les bandits pour inférer ces équilibres.

**Explication de stratégies** Connaître la stratégie des joueurs adverses est un problème crucial dans la résolution de jeux, en particulier les jeux partiellement observables comme les *Sept Familles* ou *Cluedo*. De tels jeux dans lesquels les joueurs doivent prendre en compte les croyances des autres joueurs sont appelés *jeux épistémiques*. Dans ce contexte, le problème consistant à expliquer le comportement des joueurs en prédisant leur *intention* à partir de coups joués, est un premier pas dans la connaissance de leur stratégie. Par exemple, lors d'un jeu de cartes compétitif, si un adversaire joue un coup, il est possible qu'il fasse croire à son adversaire qu'il possède une carte associée au coup joué, afin de lui faire prendre une mauvaise décision. Dans cette direction, nous souhaitons (i) proposer une modélisation logique de l'intention dans le cadre de jeux épistémiques, (ii) appliquer cette modélisation à différents jeux bien connus permettant d'expliquer le déroulement de parties, et (iii) généraliser ces méthodes à des langages de représentation générique de jeux tels que GDL-III.

### Argumentation et débats en ligne

Les graphes d'argumentation sont un des modèles très étudiés au CRIL, avec des applications pratiques dans les systèmes multi-agents ou les débats en ligne. Le développement de plates-formes de débats en ligne est l'objet depuis quelques années d'un essor important. Ce type de plates-formes est de plus en plus utilisé par la puissance publique (par exemple pour le débat citoyen sur la loi numérique ou plus récemment encore comme source d'informations pour l'élaboration du rapport Villani) mais aussi par certaines collectivités territoriales pour des questions liées à l'aménagement des sites ou à la création d'infrastructures (faut-il créer une piscine ?) ou encore par des clubs sportifs pour lancer des discussions entre adhérents sur des sujets d'intérêt. Une difficulté importante pour l'organisateur du débat est d'être capable de prendre les « bonnes décisions » une fois le débat terminé. En effet, le volume d'informations échangées peut être important. La théorie de l'argumentation formelle, développée en partie par la communauté des chercheurs en intelligence artificielle, peut se révéler utile pour construire des synthèses de tels débats et déterminer en particulier les arguments présentés qui *ressortent*. Nous avons déjà amorcé au CRIL des travaux dans cette direction. Il s'agit en particulier de déterminer comment prendre en compte non seulement des arguments qui s'opposent mais aussi des arguments qui se soutiennent. La thèse d'Anis Gargouri vise à mieux comprendre ce que recouvre la notion de support en argumentation et les résultats obtenus pourront sans doute être utilisés pour établir de meilleurs modèles de débats.

De manière plus précise, les problèmes que nous souhaitons étudier pour développer de tels systèmes sont les suivants :

- Un premier point est d'identifier les propriétés qui doivent être satisfaites par les sémantiques d'argumentation avec attaque et support. En particulier, quels sont les liens entre ces propriétés ? Ces propriétés sont-elles compatibles ? Certaines propriétés sont-elles impliquées par un sous-ensemble d'autre propriétés ?
- Une fois en main un ensemble de propriétés pour les débats argumentatifs, il faudra définir et analyser des sémantiques qui satisfont ces propriétés. Comme ces sémantiques sont habituellement graduées, leur spécification est définie par un processus itératif dont il faudra analyser la convergence vers un point fixe.
- Dans les débats en ligne, certains arguments peuvent recevoir des votes de type « pour ou contre », qu'il faut agréger pour prendre une décision. Il sera donc utile de prendre en compte les résultats en agrégation de jugement, et de déterminer s'ils peuvent s'étendre au raisonnement argumentatif dans les débats en-ligne.
- Sur le plan algorithmique, il faudra analyser la complexité temporelle des algorithmes itératifs implémentant le raisonnement argumentatif, spécifié par telle ou telle sémantique graduée. En particulier, quelle est la vitesse de convergence vers un point fixe ? Combien d'instructions sont requises par itération ?
- Enfin, une analyse expérimentale des débats en ligne sera nécessaire. Nous étudierons notamment ici la vitesse de convergence empirique des divers algorithmes de raisonnement argumentatif.

### Gestion de connaissances à partir de grands volumes de données

L'analyse et la gestion des masses de données importantes passe souvent par l'intégration des connaissances du domaine. Par exemple, pour classer/interroger des bases de données vidéos volumineuses, représentant des danses

traditionnelles, il est important de modéliser les connaissances associées à ces danses. Cependant, dans la plupart des applications pratiques, les données sont par nature incertaines et/ou incohérentes, ce qui implique des difficultés sémantiques et algorithmiques pour l'intégration des données en connaissances. Pour reprendre l'exemple de classification des danses traditionnelles, l'incertitude et l'incohérence sont omniprésentes dès lors que l'on manipule des vidéos réalisés ou prises par des « amateurs ». Ce projet de gestion de connaissances se situe dans le prolongement des recherches dans l'axe RCR, et se décline selon trois parties :

- **Gestion de l'incertitude** : les *modèles graphiques à intervalles* offrent une représentation flexible de l'information incertaine dans laquelle les poids associés aux variables sont fournis sous forme d'un intervalle. Notre but est de répondre à des questions fondamentales pour la représentation et le raisonnement à partir des informations incertaines à intervalles. Nous nous intéressons en particulier à l'analyse de complexité des requêtes de type MAP (Maximum A Posteriori) dans des modèles graphiques à intervalles. Ce problème est calculatoirement coûteux dans le cadre de la théorie des probabilités. Nous chercherons donc à identifier des classes de problèmes dans lesquelles le problème de décision associé aux requêtes MAP se fait en temps polynomial. Une autre perspective est d'étendre la règle de Jeffrey, pour traiter les problèmes de classification à partir des observations incertaines, dans le cadre des modèles graphiques possibilistes à intervalles.
- **Gestion de l'incohérence** : même si les théories de la fusion de croyances et les logiques paraconsistantes sont aujourd'hui bien connues, il reste beaucoup à faire sur le plan pragmatique et algorithmique en présence de grands volumes de données. Une perspective de recherche est de développer des opérateurs efficaces de gestion d'incohérence pour des logiques de description à faible complexité. Notre démarche est normative et consiste à étudier des propriétés désirables qui aideront à identifier des stratégies traitables. Un accent particulier sera donné aux stratégies tolérantes à l'incohérence, qui permettent de réparer des données dans une perspective de fouille et d'apprentissage.
- **Gestion de versions** : dans de nombreuses applications, les données sont fournies en flux, ce qui implique des mises à jour multiples de la base de connaissances. Un sujet important dans ce cadre dynamique est la définition de sémantiques caractérisant les similarités entre ontologies, et le développement d'approches normatives pour la gestion des versions de la base de connaissances. À nouveau, un accent particulier sera donné aux logiques de description à faible complexité, pour obtenir des opérateurs efficaces de versionnement.

## Axe algorithmes pour l'inférence et contraintes (AIC)

### Introduction

Les travaux conduits au sein de l'axe AIC portent sur la conception d'encodages, le changement de représentations et le développement et l'évaluation, tant théorique qu'empirique, d'algorithmes efficaces, pouvant être utilisés dans des systèmes d'IA et s'appuyant le plus souvent sur des représentations à base de contraintes. La problématique de l'acquisition de ces contraintes à partir de données et celle de la conception de langages pour les représenter sont également étudiées. La période de référence a été marquée par un tournant assez net de la direction des travaux conduits, qui étaient jusque là fortement focalisés sur la résolution pratique des problèmes SAT / CSP, pour aller vers des problèmes calculatoirement plus difficiles, au delà de NP.

### Tableau des effectifs et moyens de l'axe

Membres permanents de l'axe AIC	
<b>Gilles AUDEMARD (PR2)</b>	<i>Stefan MENGEL (CR)</i>
Frédéric BOUSSEMART (MCF HC)	Anastasia PAPARRIZOU (CR)
Assef CHMEISS (MCF HC)	Anne PARRAIN (MCF HC)
<i>Éric GRÉGOIRE (PREX)</i>	<i>Cédric PIETTE (MCF)</i>
Fred HEMERY (MCF HC)	Olivier ROUSSEL (MCF HC)
<i>Saïd JABBOUR (MCF)</i>	Lakhdar SAÏS (PREX)
Jean-Marie LAGNIEZ (MCF)	<i>Yakoub SALHI (MCF)</i>
<i>Daniel LE BERRE (PR2)</i>	Mouny SAMY MODELAR (PRAG)
<b>Christophe LECOUTRE (PR1)</b>	Sébastien TABARY (MCF)
Bertrand MAZURE (PR2)	

Les **responsables d'axe** et les *personnes impliquées aussi dans l'axe RCR* sont mis en évidence. Bertrand Mazure a assuré la co-responsabilité de l'axe de 2013 à 2017.

Les effectifs de l'axe AIC ont évolué comme suit lors du contrat qui arrive à échéance :

- départ d'un MCF (Jean-Luc Coquidé, parti en retraite) et arrivée d'un MCF (Jean-Marie Lagniez),
- arrivée de 2 CR (Stefan Mengel et Anastasia Paparrizou).

Les axes du CRIL n'ayant pas de budget propre, aucune évolution des moyens financiers de l'axe AIC n'est à noter.

### Politique scientifique

Une proportion notable des travaux réalisés lors du contrat qui se termine s'est appuyée sur la performance des solveurs pour le test de cohérence (dont ceux développés précédemment au CRIL et qui font encore l'objet de quelques travaux au laboratoire, visant à améliorer leur efficacité) et la possibilité d'apprendre des contraintes à travers des résolutions successives d'instances reliées logiquement. Ces atouts nous ont permis de nous attaquer, avec un certain succès, à la résolution pratique d'instances de taille importante de problèmes de complexité plus élevée que celui du test de cohérence, à savoir des problèmes « *Beyond NP* », comme celui du calcul d'un MUS (sous-ensemble contradictoire de formules, minimal pour l'inclusion ensembliste), du comptage des solutions ou encore de la déduction dans des systèmes modaux.

Faisant suite aux recommandations exprimées lors de l'évaluation de l'axe AIC par l'AERES en 2013, des recherches interdisciplinaires avec un fort impact sociétal ont été réalisées (en particulier, avec le projet QDoSSI - CNRS, Défi Mastodons, qui traite, depuis 2016, de la qualité des données des parcours migratoires, et qui constitue la base du montage en cours d'un projet européen). L'attractivité de l'axe pour des jeunes chercheurs est maintenant avérée. En effet, grâce au CNRS, l'axe AIC du CRIL a vu l'arrivée de deux chargés de recherche pendant la période de référence. Enfin, des collaborations avec CRISAL autour des liens entre contraintes et génie logiciel, mais aussi autour du thème de la compilation de connaissances ont également émergé.

## Produits et activités de recherche

### Bilan scientifique

Nous articulons la présentation des travaux réalisés au sein de l'axe AIC autour de cinq thématiques principales : compilation de connaissances, fondements pour le raisonnement par contraintes, outils pour la modélisation, explications de conflits, fouille de données - apprentissage et contraintes.

**Compilation de connaissances** La compilation de connaissances a pour objectif l'identification et l'étude de langages de représentation de connaissances dans la perspective des compromis temps/espace possibles, la conception, le développement et l'expérimentation d'outils de traduction entre langages, mais aussi d'outils de raisonnement ou de prise de décision opérant à partir de représentations compilées. Compiler une représentation consiste à construire une autre représentation (très souvent équivalente à la première) lors d'une phase de pré-traitement, puis à utiliser la représentation compilée obtenue pour répondre plus efficacement à certaines requêtes qui sont difficiles du point de vue calculatoire. La compilation est profitable quand le temps mis à compiler peut être amorti en considérant un nombre suffisant de requêtes. Construire une carte de compilation qui identifie les requêtes traitables (et celles qui ne le sont pas) et précise l'efficacité spatiale des langages de compilation permet de faire un choix informé parmi les langages cibles possibles.

Le thème de la compilation de connaissances est étudié au CRIL depuis plus de vingt ans (voir (Marquis, 2015)). Diverses contributions ont été apportées lors du précédent contrat (c'est-à-dire, depuis 2013), tant d'un point de vue théorique que pratique. Sur ce dernier point, un petit groupe de collègues intéressés par le sujet participe au projet **Compile!** du laboratoire, qui donne lieu à un développement logiciel conséquent. En particulier, les codes exécutables de divers programmes dont les compilateurs (évoqués ci-dessous) `cnf2eadt`, `d4`, `dmc`, `cn2mddg` et les préprocesseurs `pnc` et `B+E` sont disponibles (mais on trouve aussi divers jeux d'essai au format CNF ou donnés sous forme de réseaux de contraintes au format XCSP).

- **Langages de compilation** Dans (Fargier et Marquis, 2014) nous avons défini et étudié de nouveaux langages de compilation propositionnels, obtenus en permettant des transformations implicites (la disjonction et l'oubli) sur des formules issues de langages incomplets pour lesquels le test de cohérence est en temps polynomial. Dans (Le Berre et al., 2018), nous avons analysé les langages des contraintes pseudo-booléennes et des contraintes de cardinalité selon les critères retenus dans la carte de compilation des langages propositionnels. Ces langages offrent essentiellement les mêmes requêtes et transformations traitables que le langage CNF, mais avec une efficacité spatiale meilleure. Dans (ECAI'14), nous avons proposé d'étendre le langage des diagrammes de décision binaires décomposables (aussi appelé `decision-DNNF`) pour y intégrer des symétries entre littéraux. Cette extension conduit à un langage ayant une efficacité spatiale plus grande, le prix à payer étant la perte d'une opération de conditionnement réalisable en temps polynomial dans le cas général (un conditionnement restreint restant traitable, ce qui suffit toutefois pour certains problèmes). Dans (IJCAI'13) nous avons proposé un cadre formel permettant la comparaison (selon les principes de la carte de compilation) de langages de représentation hétérogènes. Dans (IJCAI'13) et (Fargier et al., 2014) nous avons proposé et étudié de nouveaux langages de compilation pour la représentation de fonctions multivariées à valeurs dans le domaine d'une structure de valuation qui reste « simple » d'un point de vue algébrique (un monoïde) et assure l'existence d'une forme canonique des fonctions ; le conditionnement et l'optimisation sont en temps polynomial pour les formules de ces langages, ce qui est essentiel pour les applications visées, en particulier la configuration (le thème central du projet ANR BR4CP auquel nous avons participé). Dans (Lagniez et Marquis, 2017a), nous avons proposé un nouveau compilateur vers le langage `decision-DNNF`, appelé `d4`. En plus des composants des compilateurs existants, `d4` tire parti d'une approche de décomposition dynamique (quoique parcimonieuse) basée sur la construction d'une partition de l'hypergraphe dual de la formule CNF donnée en entrée. Certaines règles de simplification sont utilisées pour minimiser le temps passé dans les étapes de partition et pour promouvoir la qualité des décompositions. Dans (Lagniez, Marquis et Szczepanski, 2018), nous avons proposé un compilateur distribué vers le langage `decision-DNNF`, appelé `dmc`. Ce compilateur s'appuie sur `d4` et suit une stratégie de répartition des charges qui est proche du `work stealing`. Empiriquement, les gains de performance obtenus par distribution du calcul sont souvent très significatifs. Dans (Koriche, Lagniez et Marquis, 2015), nous avons présenté le langage MDDG des diagrammes de décision décomposables multivalués qui généralise le langage `decision-DNNF` à des variables à domaines finis qui ne sont pas forcément booléennes. Nous avons décrit un compilateur de réseaux de contraintes, appelé `cn2mddg`, ciblant le langage MDDG et montré son intérêt pratique en comparaison à une approche procédant par encodage du réseau sous forme CNF puis compilation de



cet encodage en une représentation en decision-DNNF. Dans (CP'17), nous avons comparé les performances d'une vingtaine d'heuristiques de choix de variable (certaines étant classiques, d'autres étant de nouvelles heuristiques proposées) quand elles sont utilisées au sein du compilateur `cn2mddg` dans l'objectif de calculer des diagrammes de décision multivalués, décomposables ou non. Pour finir, dans (Audemard, Lagniez et Simon, 2013), nous utilisons une approche incrémentale pour répondre à des requêtes sur des bases de connaissances. Plutôt que de compiler ces bases, nous réalisons ces requêtes à la volée et profitons des appels précédents pour amortir le coût de chacune d'elles.

- **Comptage de modèles/solutions** Ces dernières années, nous avons en particulier ciblé la requête du comptage des solutions pour son importance (comme reflétée par le théorème de Toda) et sa difficulté (problème  $\#P$ -complet), lorsque les représentations traitées sont de nature booléenne et données par des formules propositionnelles CNF ou des réseaux de contraintes à domaines finis. Dans (IJCAI'13) nous avons introduit le langage des arbres de décision affine et avons montré que ce langage permet, en temps polynomial, le comptage des modèles de la formule représentée ; nous avons aussi développé un compilateur appelé `cnf2adt` qui se révèle particulièrement efficace, comparé à certains compteurs de modèles dédiés (pour certaines instances, le temps de compilation est amorti dès la première requête de comptage de modèles). Au-delà des algorithmes de compilation, nous avons conçu et développé des méthodes de pré-traitement, qui visent à réduire les représentations fournies en entrée dans le but de simplifier les traitements réalisés à partir de celles-ci, sans pour autant passer par la construction de nouvelles représentations. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur la tâche de comptage de modèles. Ainsi dans (AAAI'14) et (Lagniez et Marquis, 2017b), nous avons présenté un préprocesseur appelé `pmc` qui inclut de nombreuses techniques de prétraitement élémentaires, notamment la réduction des occurrences, la vivification, l'identification du backbone, ainsi que l'équivalence, l'identification et le remplacement des portes ET et XOR. Nous avons montré que l'utilisation de ce préprocesseur permet d'améliorer notablement les temps de calcul requis par le comptage de modèles pour beaucoup d'instances de familles différentes. Vu l'efficacité apportée par l'identification et le remplacement de portes, nous avons ensuite conçu un algorithme permettant l'identification et le remplacement implicites de portes quelconques, en exploitant de « vieux » résultats bien connus en logique classique et portant sur la définissabilité (le théorème de Beth et la méthode de Padoa). Le préprocesseur correspondant, appelé `B+E` et décrit dans (Lagniez, Lonca et Marquis, 2016), a montré très largement son intérêt pratique. Dans (Chen et Mengel, 2016), nous nous sommes intéressés à la complexité de compter le nombre de solutions d'une formule existentielle positive sur une structure finie et avons prouvé un théorème de trichotomie sur ces classes de formules lorsque l'arité est bornée. Ce théorème généralise et unifie plusieurs résultats existants concernant la complexité des requêtes conjonctives et les unions de requêtes conjonctives. Ce travail a été étendu dans (Chen et Mengel, 2017). Nous avons présenté une extension de la logique du premier ordre avec laquelle les algorithmes pour ce problème de comptage peuvent être naturellement et facilement exprimés, dans un sens qui est clarifié et motivé par le désir de comprendre quels sont les cas faciles de ce problème.
- **Formes normales négatives** Dans (Bova et al., 2016), nous exhibons une relation entre la taille des circuits décomposables en forme normale négative (DNNF) et la complexité de communication multi-partition. Cela nous permet de transformer directement des bornes inférieures existantes dans le domaine de la complexité de communication en des bornes inférieures sur la taille des représentations par DNNFs. Nous utilisons cette approche pour prouver une séparation exponentielle entre les DNNFs et les DNNFs déterministes ainsi qu'entre les CNFs et les DNNFs. Nous utilisons ces résultats dans (SAT'16), pour montrer des bornes inférieures non conditionnelles sur la taille des circuits DNNF encodant des formules CNF restreintes à plusieurs mesures de graphes. Dans (ICALP'17), nous étudions le problème d'énumération des valuations satisfaisant un circuit tout en limitant le délai, c'est-à-dire le temps nécessaire pour calculer chaque valuation successive, en nous concentrant sur la classe des circuits d-DNNF. Nous proposons un algorithme pour ces circuits qui énumère les valuations avec un prétraitement linéaire et un délai linéaire dans la taille de chaque valuation. Notre cadre d'énumération efficace s'applique ainsi à tous les problèmes dont les solutions peuvent être compilées dans une d-DNNF. En particulier, nous l'utilisons pour redémontrer des résultats classiques dans la théorie des bases de données, pour les bases de données factorisées et pour l'évaluation MSO. Dans (ICDT'18), nous montrons que ce cadre est aussi adaptable en cas de mise à jour des données. Nous nous sommes également intéressés à la requête d'optimisation sous contraintes DNNF d'une fonction de coût donnée à la volée. Cette requête apparaît naturellement dans de nombreux problèmes, en particulier en configuration de produits de nature combinatoire. Alors que la minimisation linéaire était déjà connue comme traitable sous contraintes DNNF, nous avons montré dans (ECAI'16) que la minimisation quadratique et la minimisation sous-modulaire sont NP-difficiles en général, mais FPT pour différents sous-ensembles de DNNF. En particulier, le caractère FPT de la minimisation sous-modulaire a été établi pour un paramètre naturel capturant la

dissemblance structurelle entre la fonction de coût considérée et la représentation DNNF des contraintes.

- **Apprentissage par compilation** Les problèmes d'apprentissage séquentiel sous contraintes symboliques apparaissent dans de nombreuses applications (systèmes de recommandation, gestion d'emplois du temps, allocation de ressources, problèmes de congestion dans les réseaux, etc.). Dans ce contexte, l'espace des décisions possibles est de nature combinatoire et il est impossible d'appliquer directement des stratégies de prédiction séquentielle (*Hedge*, *Stochastic Gradient Descent*, *Online Mirror Descent*) pour traiter le problème. Afin de pallier cette difficulté, nous avons utilisé dans (Koriche, 2018) une compilation des contraintes symboliques sous forme d'un circuit d-DNNF, et modifié les stratégies de prédiction afin d'apprendre de manière rapide et efficace en présence de telles contraintes. En particulier, nous avons fait tomber la complexité temporelle de la stratégie *Online Mirror Descent* (connue comme étant optimale), de  $O(n^6)$  à  $O(n^2)$  (modulo une complexité linéaire en la taille du circuit).

### Raisonnement par contraintes (SAT/CSP) : fondements

- **Cohérences locales et algorithmes de filtrage** Les cohérences locales sont des propriétés qui portent sur les réseaux de contraintes et qui sont utiles pour filtrer l'espace de recherche (typiquement, en détectant puis éliminant des valeurs incohérentes). Au cours de la période de référence, nous avons contribué à ce domaine de recherche « historique » du CRIL en proposant de nouvelles cohérences et/ou algorithmes de filtrage. Tout d'abord, dans (CP'13) et (Bessiere, Fargier et Lecoutre, 2016), nous avons proposé un algorithme complet pour les systèmes de configuration de produits. Il repose sur une propriété appelée cohérence inverse globale (GIC pour *Global Inverse Consistency*), assurant que toute valeur proposée à l'utilisateur lors d'un processus de configuration de produit puisse conduire à un produit existant. Cette approche a été appliquée avec succès au processus de configuration d'automobile de la firme Renault. Ensuite, dans (AAAI'13), nous avons proposé un algorithme (basée sur STR, la méthode de réduction tabulaire qui a montré son efficacité pour le filtrage des contraintes définies en extension) assurant l'inter-cohérence complète (FPWC), une cohérence plus forte que la cohérence d'arc (GAC pour *Generalized Arc Consistency*) et maxRPWC (*max Restricted Pairwise Consistency*). Finalement, dans (Paparrizou et Stergiou, 2017) nous avons proposé une famille de singleton cohérences plus faibles que la variante actuelle de SAC (*Singleton Arc Consistency*) obtenant des résultats qui surpassent les techniques de propagation existantes. En ce qui concerne le filtrage des contraintes définies en extension (contraintes table), nous avons proposé un nouvel algorithme STR3 (Lecoutre, Likitvivatanavong et Yap, 2015), qui est assez complémentaire de STR2 (pour lequel nous avons étudié des extensions dans (Constraints'15)) : lorsque la réduction tabulaire est faible (c'est-à-dire, lorsque les tables ne se réduisent pas rapidement), STR3 prend le pas sur STR2. Nous avons, plus récemment, proposé un algorithme de filtrage surpassant les algorithmes existants (CP'16) et qui combine des techniques issues de plus de 10 ans de recherche sur les contraintes table. Ce nouvel algorithme, testé de manière intensive, est clairement le plus rapide de sa génération. Il est adopté aujourd'hui par la plupart des solveurs (Choco, Gecode, JacoP, etc.). Enfin, pour finir, nous avons proposé (CP'14) une approche de filtrage générale, SND en abrégé pour *Scoring-based Neighborhood Dominance*, pour le problème d'isomorphisme de sous-graphe.
- **Recherche de solutions** Pour conduire la recherche de solutions (sur la base d'une approche complète), plusieurs ingrédients sont particulièrement importants. Parmi eux, on trouve l'heuristique de branchement, l'enregistrement de no-goods, et l'utilisation du parallélisme. Nous nous sommes toujours intéressés aux approches génériques permettant de guider la recherche (voir, par exemple, nos travaux plus anciens sur dom/wdeg et last-conflict). Récemment, nous avons proposé une variante de last-conflict qui prend la main sur l'heuristique de recherche plutôt que de la réparer, en minimisant récursivement les ensembles de variables en conflit. Cette approche générique, appelée *Conflict Ordering Search* (CP'15), se comporte particulièrement bien sur les problèmes d'ordonnancement, pour lesquels elle est compétitive face aux approches dédiées. L'utilité de l'enregistrement de nogoods (instanciations partielles globalement incohérentes) lors de la recherche, notamment pour le problème SAT, n'est plus à démontrer. Depuis 2009, le solveur SAT glucose est développé conjointement par un collègue du CRIL et un membre du LaBRI : glucose permet une mesure judicieuse des clauses (nogoods) apprises. Ce solveur fait toujours partie des solveurs de l'état de l'art et a remporté de nombreux prix lors des compétitions SAT ces dernières années. Dans (SAT'16), nous avons montré que, parmi les problèmes SAT proposés actuellement, nombreux sont ceux qui exhibent des comportements extrêmes, des aberrations. Partant de quelques indicateurs très simples, nous avons montré comment laisser glucose choisir parmi quelques stratégies afin de résoudre efficacement ces problèmes extrêmes. (AoR'16) présente des travaux autour de l'apprentissage de clauses à partir des conflits. Dans (CP'17), nous nous sommes intéressés pour le

problème CSP à l'enregistrement de nogoods pouvant être extraits systématiquement lors du redémarrage d'un algorithme de recherche complet. Dans ce contexte, nous avons proposé plusieurs techniques de simplification et de combinaison de nogoods, dans le but d'accroître leur capacité de filtrage. L'avènement des processeurs multi-cœurs et du cloud-computing nous a conduit à développer des solveurs SAT parallèles. Nous avons tout d'abord travaillé autour de la parallélisation de glucose. Dans (SAT'14), nous avons montré comment sélectionner attentivement les clauses échangées entre deux solveurs concurrents. Cette version parallèle de glucose (nommée syrup) fait toujours partie des meilleurs solveurs SAT parallèles. Dans le cadre du projet ANR SATAS, nous avons proposé des solveurs SAT capables de travailler dans le cloud. Dans (CP'16), nous avons présenté Ampharos, un nouveau solveur SAT parallèle fondé sur le paradigme « *diviser pour mieux régner* ». Dans (SAT'17), nous avons étendu la version parallèle de syrup aux environnements distribués. Un livre présentant un large aperçu du parallélisme dans les formalismes de raisonnement basés sur les contraintes a été co-édité par Youssef Hamadi et Lakhdar Saïs (Hamadi et Saïs, 2018). Pour finir, dans (Grégoire, Lagniez et Mazure, 2013) et (ECAI'14), plusieurs questions liées à la dynamique des réseaux de contraintes ont été explorées à la fois conceptuellement et algorithmiquement. Nous avons notamment étudié comment préserver un ensemble de solutions partielles lorsque de nouvelles contraintes sont introduites dans le réseau. Nous avons également proposé et exploré une notion de contraintes de relaxation, dites permissives, lesquelles visent à élargir l'ensemble initial de solutions du réseau.

- **Recherche de structures** Dans (LPAR'18), nous avons cherché à transformer des instances SAT en instances du problème de la recherche d'un stable maximum pour définir de nouvelles classes traitables. Dans (JELIA'14), nous avons proposé une nouvelle approche pour énumérer les impliquants premiers (PI) d'une formule booléenne sous forme normale conjonctive (CNF). Elle est basée sur un codage de la formule d'entrée en une nouvelle formule dont les modèles correspondent à l'ensemble des PIs de la théorie originale. Cette première approche d'énumération des PIs est ensuite améliorée par une utilisation originale des fonctions ou portes booléennes habituellement impliquées dans de nombreuses instances CNF codant des problèmes du monde réel. Dans (SAT'14), nous avons étudié les structures de communautés présentes dans les instances industrielles et avons montré qu'elles ont un lien avec la mesure LBD (*Literal Block Distance*) utilisée dans glucose. Dans (PAKDD'17), nous avons proposé une nouvelle approche pour la détection de communautés dans des réseaux de grande taille. Nous avons introduit un nouveau concept de communauté paramétrique, appelée *k-linked community*, permettant de mieux caractériser des communautés avec un diamètre borné. La détection est ensuite formulée comme un problème Partial-Max-SAT. Notre approche s'est montrée plus efficace que de nombreuses méthodes parmi les plus populaires de l'état de l'art.

**Outils pour la modélisation** La modélisation est une étape cruciale en programmation par contraintes (PPC). Aujourd'hui, il nous semble nécessaire de simplifier cette étape afin de rendre la PPC accessible à un public plus large. Le développement de la suite MCSP3/XCSP3 soutient cet objectif, notamment car elle repose sur des standards de l'informatique (Java, XML, JSON). Proposer de nouvelles briques de modélisation, simples et génériques, est un autre apport : les contraintes « *smart* » permettent la représentation de contraintes délicates à traiter autrement (notamment, la prise en compte de la disjonction).

XCSP3 est un format de représentation, et plus généralement un projet de longue haleine autour de ce format, mené de front au CRIL depuis 2014. La production de ce [document](#), spécifications 3.0.5 du format XCSP3, a nécessité une réflexion intense sur une période d'environ 2 ans. Avec un groupe de travail composé de 4 personnes, nous avons cherché à évaluer méthodiquement l'importance des différents concepts (notamment, les contraintes) introduits dans la littérature et les systèmes. Nous avons également sollicité de nombreux collègues d'autres laboratoires afin d'approfondir au maximum notre regard sur la question. Notre objectif est que le format XCSP3 décrit dans ce document devienne le format pivot pour les outils de programmation par contraintes (un peu comme le bytecode pour Java, toutes proportions gardées).

Hormis les spécifications, XCSP3 offre aussi :

- un site vitrine [www.xcsp.org](http://www.xcsp.org), où il est possible de sélectionner et de télécharger de nombreuses instances de problèmes au format XCSP3,
- un jeu d'instances au format XCSP3. À ce jour, plus de 23 000 instances issues d'une centaine de problèmes sont disponibles. Nombre de ces instances ont été générées à l'aide du solveur AbsCon (et maintenant à l'aide du compilateur MCSP3 décrit ci-dessous),
- des outils, dont un parseur C++ et un parseur Java, ainsi qu'un outil de vérification de solutions. Le code est disponible sur [github](#).

Egalement, nous avons développé *MCSP3*, une API de modélisation basée sur Java 8, permettant de modéliser des problèmes combinatoires sous contraintes. L'utilisateur définit simplement et naturellement un modèle, et traduit ensuite ce modèle en instance(s) au format XCSP3, en utilisant le compilateur fourni par l'API (et en indiquant les données). L'API MCSP3, accompagnée de sa documentation, est disponible sur [github](#).

Au delà des tables ordinaires, nous nous sommes intéressés aux tables concises (*short tables*) intégrant des valeurs universelles (\*), et aussi aux tables « *smart* ». Une contrainte « *smart* » permet de gérer un ensemble (disjonction) d'entrées construites à partir d'opérations arithmétiques élémentaires. Nous avons montré que de nombreuses contraintes (dites globales) peuvent se coder de manière très compacte sous cette forme. Nous avons proposé une adaptation de l'algorithme CT (*Compact Table*) aux tables concises et/ou tables négatives (listant les combinaisons interdites) (Verhaeghe, Lecoutre et Schauss, 2017), ainsi qu'aux tables « *smart* » élémentaires (CP'17). Nous avons également montré comment une table « *smart* » pouvait être générée automatiquement à partir d'une table ordinaire (Le Charlier et al., 2017).

**Explications de conflits** La détection de noyaux incohérents (ou de sous-ensembles maximaux cohérents) est importante à double titre : elle permet d'apporter une explication compacte à une situation conflictuelle, et elle peut être exploitée dans le cadre d'une recherche SAT incrémentale.

- **SAT incrémental** Les avancées spectaculaires obtenues dans le cadre de la résolution pratique du problème SAT ont rejailli bien au-delà de ses frontières. Ainsi, à l'heure actuelle, de nombreux problèmes dont la classe de complexité est au delà de NP peuvent être traités de manière pratique via l'utilisation de solveurs SAT. Dans un grand nombre de cas, la résolution de ces problèmes consiste à appeler un solveur SAT sur plusieurs instances analogues. Ce type de résolution, appelé résolution incrémentale de SAT, est en passe de devenir l'état de l'art dans bien des domaines. Dans (SAT'13), nous avons montré comment améliorer le solveur SAT glucose pour le rendre efficace dans le cadre incrémental. Ainsi, nous améliorons sensiblement les performances du solveur Muser qui recherche des MUS (*Minimum Unsatisfiable Subset*) dans une formule booléenne. glucose est aujourd'hui utilisé dans de nombreux solveurs nécessitant la technologie SAT incrémental (en particulier, des solveurs Max-SAT).
- **Sous-ensembles cohérents ou incohérents** Dans (Constraints'15), nous avons amélioré les techniques expérimentalement les plus efficaces pour extraire un sous-ensemble minimal incohérent (alias MUC pour *Minimal Unsatisfiable Core*) de contraintes d'un réseau sur-contraint. En particulier, nous avons montré comment on peut avantageusement éviter la première étape de ces techniques qui vise à déterminer une première sur-approximation fine d'un MUC à l'aide d'une recherche brute. Pour finir, dans (Grégoire, Lagniez et Mazure, 2014), nous avons proposé un algorithme original de calcul d'un ensemble maximal (pour l'inclusion) cohérent d'une instance SAT qui surclasse expérimentalement l'ensemble de ses concurrents.
- **Ensembles mutuellement contradictoires** Dans (Besnard, Grégoire et Lagniez, 2015) et (Grégoire, Izza et Lagniez, 2016), nous avons montré la grande diversité de problèmes d'IA qui reposent sur une capacité à raisonner déductivement sans conflit logique avec des ensembles mutuellement contradictoires d'informations. Une technique calculatoire originale de réécriture de problèmes a permis de proposer une technique souvent efficace de calcul de sous-ensembles maximaux d'informations propositionnelles qui ne contredisent aucun des contextes hypothétiques mutuellement contradictoires envisagés.

**Fouille de données, apprentissage et contraintes** Etablir des passerelles entre les domaines de l'apprentissage et la fouille de données d'un côté, et de la résolution par contraintes de l'autre, nous intéresse depuis plusieurs années. Les deux domaines peuvent se fertiliser l'un l'autre, via le transfert ou l'exploitation d'approches issues de l'un des domaines à l'autre.

- **Approches déclaratives pour la fouille de données** Les approches déclaratives pour la fouille visent en particulier deux principaux objectifs. Premièrement, de telles approches permettent à l'utilisateur de caractériser avec facilité les résultats qu'il souhaite extraire. Deuxièmement, elles dissocient la caractérisation des résultats à trouver de la façon de les trouver. Cette dissociation permet de développer des approches génériques qui vont exploiter les progrès faits en résolution SAT et/ou CSP. Cette dissociation exige bien sûr un encodage (SAT et/ou CSP) pour pouvoir utiliser les solveurs existants. Dans (Jabbour, Sais et Salhi, 2017), (ECML/PKDD'13) et (CIKM'13), nous avons introduit un nouveau cadre générique fondé sur le problème SAT permettant de résoudre de nombreux problèmes en fouille de données. Ce cadre permet en particulier l'extraction de connaissances avec une sélection faite à l'aide de relations de préférences. Cela permet, entre

autres, d'avoir plus de contrôle et de précision sur la nature des connaissances obtenues de manière automatique. Dans ce cadre, nous avons formulé les problèmes d'énumération des top-k motifs intéressants à partir de données transactionnelles, des séquences, et plus généralement de séquences d'itemsets. Ainsi, notre cadre peut en particulier être utilisé pour l'extraction de connaissances comme les anomalies et les exceptions. Par ailleurs, dans (PAKDD'15), nous avons proposé une approche permettant d'améliorer l'efficacité de méthodes déclaratives en fouille de données. Dans cette approche, on réalise la décomposition d'une tâche déclarative en fouille de données en sous-tâches peu nombreuses et plus simples. Notre approche de décomposition ouvre différentes perspectives quant à la parallélisation des méthodes déclaratives en fouille de données. Pour finir, dans (Boudane et al., 2016) et (PAKDD'17), nous avons proposé des méthodes déclaratives pour des tâches complexes en fouille de données, comme l'énumération des règles d'associations fermées, indirectes, minimales et non redondantes. L'évaluation expérimentale a montré que notre approche déclarative permet d'améliorer sensiblement les méthodes dédiées de l'état de l'art.

- **Clustering symbolique** Le clustering est l'un des problèmes majeurs en fouille de données. Ce processus d'apprentissage non supervisé a fait l'objet de nombreuses études conduisant à plusieurs algorithmes traitant divers types de données. Habituellement, les objets sont représentés comme des vecteurs n-dimensionnels d'attributs numériques. Cependant, dans de nombreuses applications, les données sont de nature encore plus complexe, décrivant, par exemple, les désirs ou les préférences des clients. De telles données peuvent être exprimées de manière plus compacte en utilisant des représentations logiques. Dans (PAKDD'17), nous avons introduit un nouveau cadre pour le clustering, où les objets complexes sont décrits par des formules booléennes. Nous avons étendu diverses techniques de clustering comme le k-means, pour traiter des objets complexes représentés sous forme de formules booléennes, et un nouvel algorithme de clustering permettant de regrouper des objets représentés explicitement par des ensembles de modèles. Enfin, nous avons proposé un codage basé sur SAT sans avoir besoin de passer par une représentation explicite des modèles.
- **Compression de formules, de contraintes et de graphes** Dans (CIKM'13), nous avons proposé une approche basée sur la fouille de données pour découvrir des motifs ou structures cachés dans les formules booléennes. Nous avons montré qu'il est possible d'exploiter ces motifs pour la compression de ces formules.
- **Apprentissage et contraintes** Ce thème s'articule autour de deux axes : (i) utiliser la programmation par contraintes pour résoudre des problèmes d'apprentissage, et (ii) utiliser l'apprentissage pour la modélisation par contraintes. Concernant le premier axe, de nombreuses tâches d'apprentissage statistique ou en-ligne peuvent se formuler comme des problèmes d'optimisation stochastique ou séquentielle sous contraintes. Dès lors que la tâche d'apprentissage fait intervenir des contraintes symboliques (par exemple, la structuration de l'espace d'hypothèses), le problème correspondant est souvent NP-difficile. Pour l'apprentissage de fonctions linéaires discrètes, où les hypothèses sont contraintes dans un hypercube, nous avons proposé un algorithme stochastique d'approximation (avec borne de convergence) dans (ICML'13). Pour l'apprentissage de modèles graphiques probabilistes, où les hypothèses sont structurées en graphes (orientés ou non orientés), nous avons formulé le problème sous contrainte de matroïde, et résolu le problème d'apprentissage séquentiel de forêts markoviennes (Koriche, 2016). Concernant le deuxième axe, la modélisation d'un problème de décision sous forme de contraintes nécessite un véritable effort cognitif de la part de l'utilisateur, non expert du domaine. Dans ce contexte, l'apprentissage automatique peut aider l'utilisateur à formuler son problème combinatoire, en exploitant une bibliothèque de contraintes (par exemple dans XCSP3), et en faisant appel aux instances (par exemple des emplois du temps) que l'utilisateur a déjà résolu « à la main ». Dans (Bessiere et al., 2017), nous avons montré que l'apprentissage avec requêtes (modèle d'Angluin) permet de converger sur le choix d'un réseau de contraintes, en utilisant très peu de requêtes d'appartenance et d'équivalence.

### Quelques cas d'utilisation

- **Planification de visites de musée** Dans (ICAPS'13), nous avons formalisé et étudié la complexité du problème de personnalisation de visites de musée et développé un solveur dédié pour la résolution de ce problème (PMV). Nous avons aussi développé un prototype à destination du grand public sous forme d'une application web, baptisé Tech-A-Way.
- **Résolution efficace des problèmes en logique modale** Les logiques modales sont utilisées dans la modélisation de plusieurs problèmes comme la planification contingente et la compilation de connaissances. Pourtant, la résolution pratique de ces problèmes est encore un défi, parce que le problème de la cohérence dans ces logiques est généralement NP-complet ou PSPACE-complet. Dans (Caridroit et al., 2017), nous avons pro-

posé une nouvelle traduction de la logique modale S5 vers la logique propositionnelle. Nous avons montré que la réduction du nombre de variables et des clauses dans le résultat de la traduction permet d'augmenter considérablement l'efficacité de l'algorithme pour le test de cohérence en logique modale S5. Cet travail a été étendu pour obtenir des modèles de Kripke minimaux dans (Lagniez et al., 2018). La suite de ce travail a été présenté dans (Lagniez et al., 2017) : nous avons proposé dans cet article un algorithme générique pour la résolution du problème de cohérence de problèmes PSPACE-complets, appelé RECAR. Cette approche a été implémentée dans le solveur Mosaic pour la résolution du problème de cohérence en logique modale K. Les résultats expérimentaux montrent que Mosaic est actuellement le solveur le plus efficace de la littérature pour résoudre les instances de ce problème.

- **Contraintes et génie logiciel** La période de référence a été l'occasion de renforcer le travail à l'intersection de l'IA et du génie logiciel, notamment par la collaboration avec l'équipe de recherche Spirals du laboratoire CRISAL. Au niveau des lignes de produits logiciels (considérées par une communauté de recherche qui utilise Sat4j depuis 2005), le formalisme logique utilisé a été étendu à l'aide de contraintes de cardinalité dans (SPLC'14). Dans le cadre de la réparation automatique de logiciels, une approche à base de solveur SMT a été proposée dans (Xuan et al., 2017).

### Faits marquants

- 2018 : organisation de la conférence internationale CP'18 par le CRIL à Lille (Euratechnologies).
- 2018 : parution du *Handbook of Parallel Constraint Reasoning*, co-édité par Lakhdar Saïs.
- 2017 : le projet Mastodons est présenté au Salon Innovatives SHS du CNRS, à Marseille, les 16 et 17 mai
- 2016 : spécifications 3.0.0 du format XCSP3, accompagné de son écosystème.
- 2016 : Daniel Le Berre est co-président du comité de programme de la conférence internationale SAT 2016.
- 2013-2017 : glucose, solveur SAT, primé à toutes les compétitions SAT depuis 2013.
- 2013 : Cédric Piette devient président de l'Association Française pour la Programmation par Contraintes (AFPC).

### Projet scientifique à cinq ans

En cohérence avec le projet général du laboratoire, le projet scientifique de l'axe AIC cible particulièrement les questions liées à l'explication, sous différentes formes. Ce thème pourra se décliner en termes de *weak cores*, d'extraction de lemmes, de réseaux bayésiens, ou encore de redevabilité de recommandations. Nous poursuivrons également nos efforts concernant l'établissement de passerelles entre raisonnement par contraintes et les thèmes majeurs d'aujourd'hui, la fouille de données et l'apprentissage automatique. Pour finir, nous continuerons à nous intéresser aux différentes formes de représentation (modélisation, compilation).

### Explications et contraintes

**Explications via les « *weak cores* »** Un *weak core* est un (petit) ensemble de contraintes qui est cohérent, tout en admettant un faible nombre de solutions. L'idée est d'identifier des sous-parties de problèmes (réseaux) très contraintes, dont la taille reste suffisamment petite pour rester exploitable. Un *weak core* peut être défini comme un sous-ensemble de contraintes ayant au plus soit un nombre fixe de solutions soit une proportion fixe de solutions. Identifier des *weak cores* est clairement un problème d'optimisation bi-critère, où un équilibre doit être trouvé entre la taille des *weak cores* et leurs nombres de solutions. Nous pensons que l'identification de petits *weak cores* peut permettre à l'utilisateur de mieux comprendre la raison d'une incohérence globale par rapport à un sous-ensemble incohérent minimal (MUC) de grande taille. A titre d'exemple, si un problème incohérent admet un petit *weak core* comportant seulement 10 solutions, il peut être facile pour l'utilisateur de comprendre les raisons pour lesquelles ce noyau est presque incohérent, et de vérifier à la main que les 10 solutions restantes ne peuvent pas être étendues globalement. Ce processus est similaire à un schéma de preuve dans lequel un cas général est tout d'abord identifié puis des cas spécifiques explorés. De manière à être pertinents pour l'utilisateur, les *weak cores* devraient correspondre à un cluster de contraintes qui sont liées sémantiquement (par contraste avec des sous-ensembles de contraintes prises

plus ou moins aléatoirement). Cela peut être assuré en demandant soit de minimiser le nombre de variables dans les noyaux, soit d'étiqueter avec le même label les contraintes liées sémantiquement et de minimiser le nombre de labels différents dans les *weak cores*. Identifier des *weak cores* est clairement difficile du point de vue calculatoire (plus difficile que de trouver des MUCs), mais le problème pourrait parfois se révéler plus facile en pratique que de prouver l'incohérence. Quand un problème est difficile, prouver l'incohérence peut nécessiter des années de temps de calcul. Identifier des *weak cores* intéressants est vraisemblablement encore plus difficile (et coûteux), mais approcher des *weak cores* peut sans doute être effectué efficacement car cela ne nécessite pas d'explorer totalement l'espace de recherche. Par conséquent, les *weak cores* peuvent être perçus comme un palliatif quand l'incohérence ne peut être prouvée. Si ces noyaux sont suffisamment petits, ils peuvent être utiles à l'utilisateur. S'ils sont gros, ils peuvent être traités et convertis en lemmes qui peuvent aider à prouver l'incohérence.

**Gérer les preuves d'incohérence** Une explication possible d'incohérence peut être donnée par une preuve formelle (par exemple, une réfutation). Cette technique est maintenant largement adoptée par la communauté SAT (et beaucoup moins par la communauté CP). Essentiellement, cela consiste à enregistrer les inférences réalisées par le solveur de manière à pouvoir les vérifier plus tard par un système de preuve simple. Bien sûr, les preuves d'incohérence sont de taille exponentielle dans le cas général. Aussi, sont-elles difficiles à générer, et impossibles à comprendre (par un être humain). Comprendre celles-ci peut être vu comme une forme de compression où un phénomène est expliqué en un nombre limité de causes et de règles. En gardant cela à l'esprit, réussir à compresser une preuve d'incohérence de manière significative peut être un premier pas (ou un pas de géant si la preuve devient réellement très petite) vers la compréhension de la preuve. Notre ambition est d'étudier diverses techniques permettant d'analyser et de compresser les réfutations générées par les solveurs. Cela pourrait être effectué lors d'une phase de pré-traitement. Par exemple, une fois connue la manière dont la contradiction est générée dans une réfutation, elle peut être exploitée pour élaguer chaque étape ne contribuant pas de manière effective à la preuve. En complément, s'il est possible d'identifier des motifs récurrents dans une preuve, les traduire en lemmes peut permettre de réduire la taille de la preuve. Il est bien sûr connu que certaines preuves sont extrêmement grandes (centaines de téra-octets) et peuvent être à peine enregistrées et manipulées. Ce problème peut être contourné en appliquant plusieurs passes : la première passe prouve l'incohérence et enregistre simplement une information partielle (donc gérable) concernant la preuve d'incohérence. La seconde passe génère à nouveau la preuve d'incohérence en utilisant l'information enregistrée lors de la première passe de manière à produire une preuve plus petite. Si le problème est vraiment difficile, la première passe ne terminera pas en un temps raisonnable. Dans ce cas, on pourrait utiliser des techniques d'échantillonnage qui nous permettraient d'extraire une information utile pour la seconde passe. Une autre approche consisterait à utiliser des algorithmes sous-linéaires (comme dans les techniques du Big Data) pour extraire de l'information utile sur les preuves enregistrées.

**Explications et réseaux bayésiens** Lorsque la connaissance disponible (fournie directement et/ou apprise à partir de données d'observations) sur un ensemble d'événements possibles est modélisée par une distribution de probabilités représentée de façon compacte par un réseau bayésien, la recherche d'explications pour une évidence donnée passe par le calcul des hypothèses les plus probables qui sont compatibles avec celle-ci. Quand les variables considérées se répartissent en deux catégories seulement (variables d'observation, variables d'hypothèse), le problème de calcul d'une explication la plus probable (appelé MPE pour *Most Probable Explanation*) se réduit au problème weighted-Max-SAT (et le problème de décision associé est « seulement » NP-complet). La donne change dans le cas général (et plus fréquent) où les variables du réseau qui ne sont pas des variables d'observation ne sont pas pour autant des variables d'hypothèse. Dans ce cas, le calcul d'une explication la plus probable (appelé MAP) est  $NP^{PP}$ -difficile (après avoir conditionné le réseau par l'évidence donnée et avant d'optimiser sur les variables d'hypothèse, il est nécessaire de marginaliser la distribution sur celles-ci pour éliminer les variables intermédiaires). En pratique, le calcul est beaucoup plus difficile. Alors que le problème de calcul de la probabilité d'une évidence donnée ( $\#P$ -difficile à partir d'un réseau bayésien) peut être résolu en temps polynomial à partir d'une forme compilée de ce réseau (de type d-DNNF pondérée) car il se réduit à un problème de comptage de modèles pondérés, on ne connaît pas jusqu'ici de langage de compilation (suffisamment compact) qui pourrait être utilisé pour résoudre MAP efficacement à partir d'une forme compilée du réseau. C'est une piste de recherche que nous souhaitons explorer lors du prochain contrat.

**Explications de recommandation** La redevabilité des recommandations produites par les systèmes d'aide à la décision est essentielle lorsque les recommandations concernent des situations à fort enjeu. Dans de telles situations, classiquement, le système élicite (souvent très partiellement) les préférences de l'utilisateur avant de proposer une recommandation fondée sur les informations acquises et sur un modèle de décision. L'explication accompagnant la

recommandation est alors un élément crucial, en particulier pour permettre à l'utilisateur de remettre en question certains éléments qui la promeuvent, voire de chercher des corrections. Dans le contexte qui nous intéresse ici, l'utilisation d'outils pour la détection de l'incohérence peut être très utile pour rechercher des explications naturelles basées sur le fait d'exhiber (contre-factuellement pour la recommandation) la non-satisfaisabilité de certaines recommandations. Ainsi, pour expliquer le classement d'un projet comme « non financé », un tel système pourra produire une preuve de non-satisfaisabilité de la recommandation alternative « projet financé ».

Notre objectif est d'étudier divers encodages SAT permettant de conserver au maximum la sémantique du problème initial et donc de contrôler les explications que l'on pourrait obtenir à travers les appels aux outils SAT. Nous identifions trois différentes approches :

- approches basées sur les MUS/MCS : il s'agit d'exploiter les notions de MUS (sous-ensemble incohérent minimal) et MCS (sous-ensemble cohérent maximal) pour fournir des explications dans le cadre applicatif considéré. On peut envisager une approche qui consisterait à fournir au décideur des MUS ou des MCS afin qu'il puisse corriger ou au moins comprendre d'où vient l'incohérence. Un écueil est le nombre potentiellement très important (exponentiel dans le nombre de clauses de la formule donnée) de MUS ou MCS. Une solution possible consiste à ajouter des contraintes (ou au moins un filtre) sur la nature des sources d'incohérences pouvant être fournies à l'utilisateur, ou encore à utiliser des mesures d'incohérence, afin de retourner à l'utilisateur les sources d'incohérence les plus pertinentes.
- approches basées sur les modèles : alternativement, il est possible d'utiliser une approche qui s'appuie sur la sémantique du problème, comme cela se pratique en révision de croyances. Nous pourrions ainsi quantifier le degré de changement opéré par le processus de restauration, comme par exemple compter le nombre d'interprétations qui sont à la fois modèles de la formule initiale et modèles de la formule modifiée. Si cette valeur dépasse un certain ratio, on pourrait avoir intérêt à prévenir l'utilisateur que son changement impacte de manière significative la sémantique initiale du problème. La définition de telles mesures pourrait permettre de définir tout un panel d'approches dont l'objectif serait de produire des formules qui minimisent une certaine fonction objectif s'appuyant sur ces dernières.
- vers des modèles graphiques traduisant la structure des clauses : il est impossible pour un humain d'expliquer une incohérence en lui fournissant uniquement un ensemble de clauses. Afin de résoudre ce problème, nous envisageons d'étudier des approches permettant de retrouver la structure de la contrainte logique initiale (souvent perdue lors de sa mise sous forme clausale). Pour cela, des outils sont déjà disponibles, basés sur la reconnaissance de portes logiques, les dépendances fonctionnelles ou encore les contraintes de cardinalité. Ces informations pourraient ensuite être utilisées afin de fournir à l'utilisateur un modèle graphique plus compact et structuré de l'information disponible et des contradictions qui y figurent.

## Data mining et contraintes

Nos travaux antérieurs sur le développement d'approches déclaratives pour différentes tâches d'extraction de connaissances à partir des données (fouille de motifs, clustering, détection de communautés dans les réseaux sociaux, compression) ouvrent de nombreuses perspectives. Nous rappelons que les approches à base de contraintes pour la fouille de données offrent un cadre déclaratif, flexible et générique pour la modélisation et la résolution de nombreuses tâches de fouille de données.

**Fouille sur des données complexes** Nous envisageons d'étendre nos investigations à des données plus complexes comme les arbres et les graphes attribués. La prise en compte du caractère dynamique et évolutif des données sera également envisagée. Cette dimension est très souvent rencontrée dans les contextes applicatifs.

**Fouille qualitative de données** L'objectif est d'améliorer la qualité des connaissances extraites à partir des données. Il s'agit de définir de nouvelles mesures d'intérêt, de robustesse et de stabilité pour les motifs et de développer des techniques d'optimisation pour l'algorithmique d'énumération. Une autre voie est d'intégrer les connaissances de l'expert ou les préférences de l'utilisateur dans le processus de fouille de données. Ceci permettra de réduire significativement la taille de la sortie en se focalisant sur les motifs satisfaisant les contraintes de l'utilisateur.

**Fouilles parallèles de données** Si des améliorations sensibles ont été réalisées au niveau de l'efficacité algorithmique, les approches dédiées restent souvent les plus efficaces en terme de temps de calcul. Pour assurer la viabilité



des approches déclaratives, nous envisageons de mettre en œuvre des techniques de décomposition de données et d'exploiter les architectures parallèles pour permettre un réel passage à l'échelle.

**IA et fouille de données** Nous projetons d'étudier les possibilités d'intégration de divers paradigmes de l'IA comme le raisonnement sur les connaissances extraites (post-traitement), l'intégration des symétries dans diverses tâches de fouille de données, le pré-traitement des données par des approches issues de la compilation des bases de connaissances et la prise en compte des préférences dans le processus de fouille de données. Il s'agira aussi de déterminer dans quelle mesure la fouille de données (extraction de motifs, clustering, détection de communautés) peut être utile pour analyser et extraire diverses formes de structures dans les formules logiques, dans les réseaux de contraintes et dans les graphes, pour compresser et améliorer la résolution de problèmes dans ces formalismes.

### **Extraction, analyse et visualisation de motifs complexes à partir des données issues de processus migratoires**

Dans le cadre du projet CNRS Mastodons QDoSSI, une collaboration est actuellement en cours avec des chercheurs en sciences humaines et sociales autour de l'analyse et de la compréhension des processus à l'œuvre dans la construction des parcours migratoires. À partir d'un objet commun, le parcours migratoire, nos objectifs scientifiques sont de promouvoir des outils innovants et des prototypes logiciels *open source* qui répondent à un double défi : (1) faciliter leurs utilisations par les chercheurs en sciences humaines et sociales afin de mieux exploiter et comprendre les gisements de données et les partager avec les décideurs politiques et la société civile ; (2) placer l'analyste ou le chercheur en sciences humaines et sociales au cœur de l'exploration avec la volonté de co-construire le processus qui le conduira à découvrir des connaissances nouvelles, à valider des hypothèses de travail, et à mieux s'orienter dans la conduite de ses investigations de terrain. La problématique posée ci-dessus suppose le développement de techniques en rupture avec l'existant dans le domaine des bases de données et de l'extraction des connaissances, notamment, l'extraction de connaissances complexes (ici les parcours/graphes) à partir de données textuelles et/ou relationnelles. Dans notre projet, les graphes extraits, et enrichis sémantiquement, ouvrent la voie à de nouveaux champs d'analyses et d'interrogations de ces structures combinatoires ainsi qu'à de nouvelles représentations cartographiques riches et interactives. Cette thématique sera l'objet d'un projet H2020 qui sera soumis en 2019.

### **Apprentissage et contraintes (solveurs autonomes)**

Les progrès réalisés en programmation par contraintes ont conduit à un grand nombre d'heuristiques et de méthodes de filtrage. On peut citer les heuristiques basées sur la pondération de contraintes, l'activité, l'impact ou les derniers conflits. Mais pour une instance donnée, la question du choix de l'heuristique à appliquer reste ouverte. Au delà du choix des heuristiques, une instance à résoudre est le plus souvent structurée par la présence de tableaux de variables et de groupes de contraintes. Il est important de noter que cette information est rendue disponible par le format XCSP3. Imaginons la présence de 2 tableaux de variables  $x$  et  $y$ , faut-il commencer par brancher sur les variables du tableau  $x$  ou celles du tableau  $y$  ? Supposons également que certaines contraintes soient qualifiées de « *symmetry breaking* » (en utilisant l'attribut `class` de XCSP3), est-il pertinent de commencer la recherche en activant les contraintes qui cassent les symétries ? La même question se pose pour les contraintes redondantes. Répondre à ces questions exige un certain savoir-faire. Notre objectif à moyen terme (2-4 ans) est de construire un solveur autonome exploitant l'apprentissage par renforcement pour cela. De manière générale, la résolution autonome peut être vue comme un problème de bandits multi-bras (MAB) : à chaque étape de la résolution, le solveur doit choisir la bonne décision (heuristique et cohérence), dont la performance peut être mesurée selon divers critères (comme la taille du sous-arbre exploré). Il existe aujourd'hui une grande variété d'algorithmes de bandits multi-bras, qui dépendent de la nature du problème de décision (stochastique ou adversarial), de l'espace de décisions possibles (simple ou combinatoire), et du renforcement transmis à l'algorithme (semi-bandit ou bandit). La vitesse de convergence et la complexité temporelle d'un algorithme MAB dépendent naturellement du problème de décision sous-jacent. Il a été démontré (communication à IJCAI'15) que l'utilisation des bandits multi-bras stochastiques (en particulier l'algorithme standard UCB) pour le choix de méthodes de filtrage, permet d'accélérer la résolution de nombreuses instances du problème de satisfaction de contraintes. Notre objectif est d'explorer plus avant la frontière entre la résolution par contraintes et les bandits multi-bras. Nous étudierons plusieurs classes de problèmes (satisfaction, optimisation, décision séquentielle et jeux) ainsi que plusieurs classes d'algorithmes de semi-bandits ou bandits (stochastiques ou adversariaux, simples ou combinatoires) pour apprendre à choisir de manière autonome les bonnes heuristiques, les bons tableaux de variables et les bons groupes de contraintes.

### « Compilation » et contraintes

Notre intérêt pour l'exploitation de différentes formes compilées de connaissances réside dans les facilités de représentation et de modélisation que cette pluralité offre à l'utilisateur. Les contraintes table (contraintes définies en extension) restent un outil générique d'utilité indéniable. Ces dernières années, nous avons décliné différentes formes de tables : tables ordinaires, tables concises, tables compressées (ou tables « *smart* » élémentaires) et tables « *smart* ». Les tables « *smart* » suscitent certainement la curiosité car elles combinent les deux formes génériques (intention et extension) de représentation. Concernant les contraintes « *smart* », notre objectif est tout d'abord d'étendre la portée de celles-ci en étendant l'expressivité permise. Il s'agira également de proposer des recettes de modélisation type à partir de cas d'étude choisis. Par ailleurs, l'utilisation de MDD pour le raisonnement par contraintes est devenu un sujet majeur dans la littérature scientifique. Nous allons nous intéresser à d'autres formes graphiques de représentation, comme par exemple les MVD (*multivalued variable diagrams*), et étudier diverses techniques de synthèse (algorithmes de fouille de données, interprétation abstraite) ainsi que différents algorithmes de filtrage adaptés à ces représentations.