



Département d'évaluation de la recherche

DOCUMENT D'AUTOÉVALUATION DES UNITÉS DE RECHERCHE

—
CAMPAGNE d'ÉVALUATION 2023-2024
VAGUE D

le **cnam**

CÉDRIC
Conservatoire national des arts et métiers

1 Informations générales pour le contrat en cours	3
1.1 Identification de l'unité	3
1.2 Présentation de l'unité	3
1.2.1 Equipes	4
1.2.2 Mobilité des permanents	6
1.2.3 Equipe administrative	7
1.2.4 Communication	7
1.3 Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	8
1.3.1 Axe 1 : systèmes communicants et interactifs	9
1.3.2 Axe 2 : science des données	9
1.3.3 Axe 3 : confiance et sécurité numérique	10
1.4 Profil d'activités liées à la recherche	11
1.5 Prise en compte des recommandations du précédent rapport	11
1.5.1 Perspectives scientifiques et projet	11
1.5.2 Gouvernance	12
1.5.3 Animation scientifique	12
1.5.4 Evaluation qualitative de la production scientifique	13
1.5.5 Doctorants	13
1.5.6 Evaluation des résultats	14
2 Portfolios	15
2.1 Introduction du portfolio CÉDRIC	15
2.2 Document 1 : classement de la production scientifique du CÉDRIC	15
2.3 Document 2 : projets exploratoires et séminaires	15
2.4 Document 3 : activité contractuelle du CÉDRIC, 2017-2022	15
3 Autoévaluation	16
3.1 Autoévaluation de l'unité	16
3.1.1 Domaine 1. Profil, ressources et organisation de l'unité	16
3.1.2 Domaine 2. Attractivité	19
3.1.3 Domaine 3. Production scientifique	21
3.1.4 Domaine 4. Inscription des activités de recherche dans la société	25
3.2 Autoévaluation de l'équipe ISID	26
3.2.1 Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	26
3.2.2 Profil d'activités liées à la recherche	28
3.2.3 Prise en compte des recommandations du précédent rapport	28
3.2.4 Introduction du portfolio	29
3.2.5 Auto-évaluation de l'équipe	29
3.2.6 Trajectoire de l'équipe	34
3.3 Autoévaluation de l'équipe ILJ	36
3.3.1 Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	36
3.3.2 Profil d'activités liées à la recherche	38

3.3.3	Prise en compte des recommandations du précédent rapport	38
3.3.4	Introduction du portfolio	39
3.3.5	Production Scientifique	39
3.3.6	Attractivité	40
3.3.7	Trajectoire de l'équipe	42
3.4	Autoévaluation de l'équipe MSDMA	43
3.4.1	Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	43
3.4.2	Profil d'activités liées à la recherche	45
3.4.3	Prise en compte des recommandations du précédent rapport	45
3.4.4	Introduction du portfolio	46
3.4.5	Auto-évaluation de l'équipe	47
3.4.6	Trajectoire de l'équipe	49
3.5	Autoévaluation de l'équipe Laetitia	51
3.5.1	Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	52
3.5.2	Profil d'activités liées à la recherche	57
3.5.3	Prise en compte des recommandations du précédent rapport	57
3.5.4	Introduction du portfolio	58
3.5.5	Auto-évaluation de l'équipe	58
3.5.6	Trajectoire de l'équipe	64
3.6	Autoévaluation de l'équipe OC	66
3.6.1	Thématiques scientifiques, enjeux et résultats	66
3.6.2	Profil d'activités liées à la recherche	71
3.6.3	Prise en compte des recommandations du précédent rapport	71
3.6.4	Introduction du portfolio	71
3.6.5	Auto-évaluation de l'équipe	72
3.6.6	Trajectoire de l'équipe	76
3.7	Autoévaluation de l'équipe ROC	78
3.7.1	Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	78
3.7.2	Profil d'activités liées à la recherche	80
3.7.3	Prise en compte des recommandations du précédent rapport	81
3.7.4	Introduction du portfolio	81
3.7.5	Auto-évaluation de l'équipe	82
3.7.6	Trajectoire de l'équipe	88
3.8	Autoévaluation de l'équipe SYS	90
3.8.1	Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	90
3.8.2	Profil d'activités liées à la recherche	94
3.8.3	Prise en compte des recommandations du précédent rapport	94
3.8.4	Introduction du portfolio	94
3.8.5	Auto-évaluation de l'équipe	95
3.8.6	Trajectoire de l'équipe	96
3.9	Autoévaluation de l'équipe VERTIGO	97
3.9.1	Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	97
3.9.2	Profil d'activités liées à la recherche	100
3.9.3	Prise en compte des recommandations du précédent rapport	100
3.9.4	Introduction du portfolio	101
3.9.5	Auto-évaluation de l'équipe	102
3.9.6	Trajectoire de l'équipe	104

4 Trajectoire	107
4.1 SWOT du CÉDRIC	107
4.2 Les défis de la prochaine période	108
4.2.1 Faciliter les renouvellements thématiques	108
4.2.2 Renforcer l'animation scientifique au niveau de l'entité	108
4.2.3 Soutenir et encourager l'activité scientifique	109
4.2.4 Renforcer le support technique et administratif à l'échelle de l'activité	109
4.2.5 Responsabilité éthiques et environnementales	110

Chapitre 1. Informations générales pour le contrat en cours

Remarques préalables :

- Dans tout ce qui suit, “la période” désigne les années 2017 à 2022 (comprises). La “fin de période” est donc le 31/12/2022.
- Toute occurrence du genre grammatical masculin pour désigner une personne doit être prise au sens générique (“doctorant” inclus donc, bien entendu, les doctorantes).

1.1. Identification de l’unité

Nom de l’unité : Centre d’études et de recherche en informatique et communication

Acronyme : CÉDRIC

Label et numéro : EA 4629

Champ de recherche de rattachement : Informatique, Télécommunications, Mathématiques

Directeur pour la période : Philippe Rigaux (à partir du 01/01/2019¹)

Directrice adjointe : Mylène Pischella (2019-2020), puis Amélie Lambert

Chargée de missions doctorants : Samia Bouzefrane

Responsable administrative : Viviane Gal

Ecoles doctorales : EDITE de Paris (<https://www.edite-de-paris.fr/>) jusqu’en 2019, puis SMI (<https://edsmi.hesam.eu/>)

1.2. Présentation de l’unité

Le *Centre d’études et de recherche en informatique et communication* (CÉDRIC) regroupe les activités de recherche en sciences du numérique menées au Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Les chercheurs permanents du CÉDRIC sont tous aussi des enseignants en informatique, mathématiques appliquées, électronique et automatique. Depuis sa création en 1988, le CÉDRIC est reconnu par le ministère de tutelle comme Equipe d’Accueil (EA1395). Il est devenu EA4629 suite à l’inclusion du laboratoire LAETITIA en janvier 2011.

Le laboratoire est situé dans les locaux historiques de l’établissement dans le 3ème arrondissement de Paris, principalement au 2 rue Conté et au 292 rue saint Martin. Les personnels du Cnam étant regroupés par équipes pédagogiques nationales (dites « EPN », équivalent des départements d’enseignements), les bureaux des enseignants-chercheurs sont répartis sur trois espaces :

1. le premier étage de l’annexe au 2 rue Conté pour les membres de l’EPN 5, domaine informatique, soit 6 équipes sur 8 ;

1. Pierre Cubaud était directeur jusqu’à fin 2018, avec Didier le Ruyet comme directeur adjoint.

2. une partie du troisième étage de cette même annexe pour les membres de l'EPN 6, domaine mathématiques appliquées (équipe MSDMA) ;
3. des locaux dans un bâtiment du 292 rue St Martin pour les membres de l'EPN 3, domaine traitement du signal, électronique, automatique et robotique (équipe Laetitia).

Au 31 décembre 2022, le CÉDRIC compte 78 permanents répartis en 6 professeurs Cnam, 20 professeurs des Universités (et assimilés), 48 maîtres de conférences (dont 9 HDR), auxquels s'ajoutent 7 émérites. Nous avons 60 doctorants en cours de thèse. L'équipe administrative est constituée de 4,5 BIATSS (en ETP). Son budget annuel est basé sur la dotation de l'établissement, de l'ordre de 150 K€ annuels, et l'ensemble des contrats et conventions dont le montant est d'un ordre de grandeur 10 fois supérieur. L'ensemble des fonds annuels gérés par le CÉDRIC évolue, sur l'ensemble de la période considérée, entre 1,5 et 2 M€.

Le CÉDRIC est organisé selon une structure classique comprenant la direction du laboratoire (directeur, directrice adjointe, responsable administrative et chargée de mission doctorants) et un conseil de laboratoire élu qui se réunit 4 fois par an. Nous avons de plus, sur la période, constitué un comité de direction composé de la direction du laboratoire et des responsables d'équipe qui se réunit mensuellement. Enfin, cette structure est complétée par plusieurs commissions mises en place au cours de la période : commission des publications, commission web, commission des locaux et commission d'attribution des contrats doctoraux.

1.2.1. Equipes

Le CÉDRIC comprend huit équipes thématiques. L'intitulé complet est donné ci-dessous. Elles seront ensuite désignées par leurs acronymes respectifs. La responsabilité de l'équipe est indiquée au 31/12/2022.

Vertigo (Données Complexes, Apprentissage et Représentations, resp. M. Ferecatu)

L'équipe de recherche Vertigo s'intéresse aux problèmes soulevés par la gestion de données à grande échelle, avec une orientation forte vers des données dont la structure, explicite ou non, est complexe et nécessite des techniques spécifiques d'approximation, d'extraction et d'interrogation.

ISID (Ingénierie des systèmes d'information et de décision, resp. C. du Mouza)

Les travaux menés au sein de l'équipe ISID sont centrés sur le thème fédérateur de l'ingénierie des systèmes d'information et de décision. L'équipe conçoit des modèles, des méthodes, des techniques et des outils pour l'analyse et la conception des systèmes d'information et de décision.

SYS (Systèmes sûrs, resp. P. Courtieu)

L'équipe Systèmes Sûrs consacre ses recherches à la spécification, la conception, la vérification et l'évaluation des systèmes, en particulier des applications critiques du point de vue de la sûreté et de la sécurité.

ILJ (Interactivité pour lire et jouer, resp. G. Levieux)

L'équipe ILJ s'intéresse aux questions d'interaction humain-machine posées par la numérisation des activités autotéliques comme le jeu ou la lecture, avec une approche pluri-disciplinaire (informatique, psychologie, arts, design).

OC (Optimisation combinatoire, resp. S. Kedad Sidhoum)

Les recherches de l'équipe OC s'inscrivent dans le domaine de l'optimisation combinatoire et de la recherche opérationnelle. Elles portent sur des travaux théoriques et méthodologiques en optimisation pour trouver des bonnes propriétés structurelles de problèmes et pour développer des algorithmes efficaces pour les résoudre. L'équipe s'intéresse aussi bien à des problèmes théoriques qu'à des applications industrielles.

Équipe	Perm.	Emér.	Prof. Cnam	Prof. Univ.	MCF	dont HDR	Assoc.	Doct.	Ing.	Post-doc
vertigo	8	0	0	2	5	1	2	14	1	3
isid	10	1	1	3	5	2	0	5	1	0
sys	11	0	1	3	7	0	1	2	0	1
ilj	8	1	1	1	3	1	1	6	1	0
oc	12	2	0	4	6	2	0	6	0	1
roc	9	0	1	3	5	2	3	16	3	4
msdma	7	1	0	1	5	0	3	6	0	0
laetitia	19	1	2	3	12	1	2	5	1	1
Total	84	6	6	20	48	9	12	60	7	10

TABLE 1.2 – Effectifs du CÉDRIC au 31/12/2022

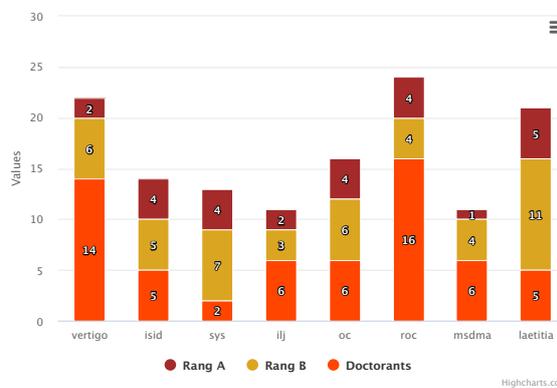
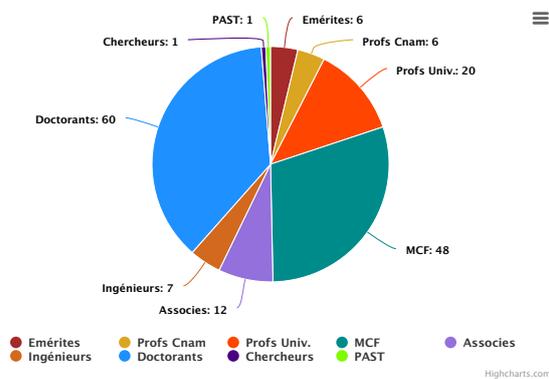
ROC (Réseaux et objets connectés, resp. S. Secci) L'équipe Réseaux et Objets Connectés (ROC) effectue ses recherches sur les nouvelles architectures réseaux et systèmes liées à la virtualisation, à la mobilité et au développement des objets connectés. Les contributions de l'équipe portent sur la conception de nouveaux protocoles et de nouvelles plateformes réseaux-systèmes, d'algorithmes les pilotant, et l'optimisation et la sécurisation de l'infrastructure de calcul et de communication.

MSDMA (Méthodes statistiques de data-mining et apprentissage, resp. N. Niang-Keita) Les activités de l'équipe concernent le traitement de données par des méthodes statistiques et informatiques. Le concept fédérateur est celui du « data mining », discipline à la frontière de la statistique, de l'intelligence artificielle et des bases de données et se propose de découvrir des relations, des structures dans des données préexistantes.

Laetitia (Traitement du signal, architectures électroniques et Automatique, resp. D. Le Ruyet) L'équipe LAETITIA se concentre sur des problématiques de traitement du signal pour les télécommunications et la sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques.

Le seul changement au cours de la période concerne l'équipe Médias Interactifs et Mobilité (MIM), qui était constituée des deux axes *Interaction pour Lire et Jouer (ILJ)* et *Système Distribués et Réseaux Mobiles Sans Fil (Sempia)*, et s'est divisée en deux équipes autonomes en 2019 : ILJ et ROC.

L'effectif du laboratoire est relativement stable sur la période, du moins en ce qui concerne les permanents. Le tableau 1.2 donne le détail des effectifs du laboratoire au 31 décembre 2022, par équipe et par statut. Il faut y ajouter un chargé de recherche INRIA rattaché à l'équipe Vertigo. Les deux figures ci-dessous permettent d'apprécier la répartition des effectifs par statut (à gauche) et par équipe (à droite).



Le ratio global entre rangs B (MCF et chargés de recherche) et rangs A (professeurs Cnam et professeurs des universités) est de 1,85, soit assez nettement au-dessus du ratio 1,5 (60 % de rang B vs 40 % de rangs A) considéré comme souhaitable. Avec 9 MCF HDR au 31/12/2022 (dont 7 soutenues sur la période), la capacité d'encadrement doctoral du CÉDRIC est importante (35 personnes). Le nombre de doctorants (lui aussi considéré de manière globale) peut être considéré comme élevé, avec 60 doctorants, soit 1,7 doctorant par HDR.

Le laboratoire compte 12 associés. Depuis 2019, ce statut est accordé à une personne extérieure au Cnam après dépôt d'un dossier, examen par deux rapporteurs et vote du conseil de laboratoire. Le CÉDRIC n'est malheureusement pas en mesure d'accorder des ressources à ces associés, qui collaborent avec leur équipe de rattachement, hors de tout engagement contractuel selon les modalités agréées d'un commun accord.

Enfin, des PAST sont rattachés au laboratoire par l'établissement. Leur activité étant principalement relative à l'enseignement, nous ne les incluons pas dans les analyses qui suivent.

Si on examine la situation par équipe (figure à droite ci-dessus), le ratio rang B / rang A apparaît déséquilibré (supérieur à 1,5) pour plusieurs équipes. Le recrutement en 2023 d'un professeur dans l'équipe Vertigo va rétablir un équilibre. Inversement, des départs prochains à la retraite vont affecter plusieurs équipes, dont ROC, en apparence pour l'instant bien dotée.

L'encadrement doctoral est actuellement concentré sur les équipes ROC et Vertigo, ce qui s'explique notamment par leur forte activité contractuelle.

1.2.2. Mobilité des permanents

Voici la liste des personnes² recrutées *sur concours* depuis 2017, avec leur statut et l'équipe de rattachement.

Année	Personnes recrutées
2017	T. Ngoc Dinh (MCF, Laetitia), V. Audigier (MCF, MSDMA), N. Thome (PU MSDMA jusqu'en 2020, puis Vertigo), S. Cherfi (PU, ISID ; promotion)
2018	S. Kedad-Sidhoum (PU, OC), S. Secci (PU, MIM puis ROC)
2019	S. Bouzefrane (PU, ROC ; promotion), N. Mimouni (MCF, ISID), N. Audebert (MCF, Vertigo)
2020	C. Rambour (MCF, MSDMA puis Vertigo), A. Buendia (Prof. Cnam, ILJ)
2021	M. Moze, (Prof. Cnam, Laetitia)
2022	P. Braconnot Velloso (MCF, ROC), F. Bouhadjera (MCF, MSDMA), L. Zerioul (MCF, Laetitia)

Il faut compléter avec les cas de Z. Alès (OC) et de F. Jacquemard (Vertigo) qui nous ont rejoint dans le cadre d'une convention avec leurs établissements respectifs (l'ENSTA pour le premier, l'INRIA pour le second). De plus, V. Legrand (Prof. Cnam) a été rattachée à l'équipe ISID en 2021 en provenance d'un autre laboratoire du Cnam.

Ont donc rejoint le CÉDRIC au cours de la période par recrutement sur concours : huit MCF, cinq professeurs des universités et deux professeurs Cnam. Deux de ces recrutements se sont faits en interne (passage de MCF à PU). En ce qui concerne les départs, donnés ci-dessous, la plupart sont des mises en disponibilité, détachement ou délégation qui ne libèrent pas de poste, à l'exception de deux mutations.

2. Cette section ne concerne que les permanents.

Année	Personnes
2017	A. Latouche (MSDMA, détachement Curie), Anne Wei (MIM, décès)
2018	N. Travers (Vertigo, détachement Léonard de Vinci), M.C. Costa (OC, retraite), S. Natkin (ILJ, retraite)
2019	E. di Bernardino (MSDMA, Lab. M2N au Cnam), M. Puech (SYS, disponibilité)
2020	A. Bar-Hen (MSDMA, délégation INRIA)
2021	M. Pischella (Laetitia, détachement ministère), T. Bouchara (ILJ, mutation Paris-Saclay), P.L. Gonzalez (MSDMA, retraite)
2022	D. Roviras (Laetitia, retraite), R. Zemouri (Laetitia, disponibilité, 2022), N. Thome (Vertigo, mutation S.-Université), J.-M. Douin (ROC, retraite), F. Saillan (ROC, détachement IMT-Atlantique)

Nous avons donc sur la période quatre personnes parties en détachement, deux en disponibilité, une en délégation, un décès, deux mutations et cinq départs à la retraite.

Par ailleurs, dans le cadre du repyramidage, trois MCF ont été promus au rang de professeur en novembre 2022. Il s'agit de N. Niang-Keita (MSDMA), C. Bentz (OC) et C. du Mouza (ISID). Ils sont comptés comme rang A dans tous nos tableaux.

Equipe	Évolution		
	Départs	Arrivées	Promotions
ISID	-	1 MCF, 1 Prof. Cnam	2 PU
SYS	1 MCF	-	-
ILJ	1 MCF, 1 Prof. Cnam	1 Prof. Cnam	-
LAETITIA	2 MCF, 1 Prof. cnam	2 MCF, 1 Prof. Cnam	-
OC	1 PU	1 MCF, 1 PU	1 PU
ROC	2 MCF	1 MCF	1 PU
MSMDA	2 MCF, 1 PU, 1 Prof. Cnam	2 MCF	1 PU
Vertigo	1 MCF, 1 PU	2 MCF, 1 CR, 1 PU	-
MIM	1 PU	1 PU	-

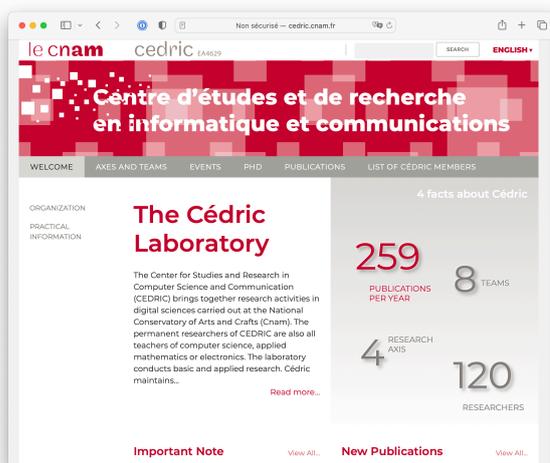
1.2.3. Equipe administrative

L'équipe administrative est restée stable durant la période, avec 4,5 ETP sous la direction de Viviane Gal. Cette stabilité ne correspond pas à la très forte augmentation de l'activité contractuelle du laboratoire qui a induit une charge croissante des tâches de gestion.

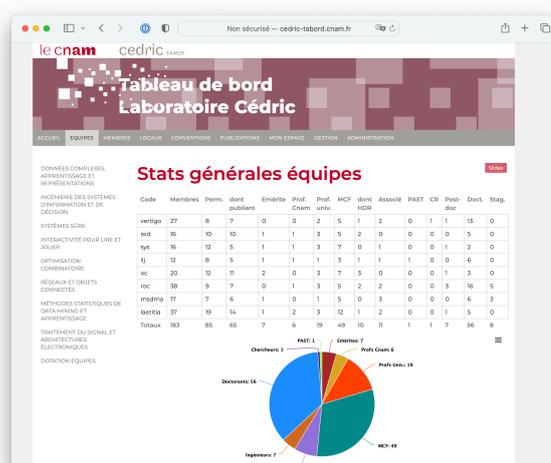
Le CÉDRIC est rattaché à la direction de la recherche du Cnam qui fournit un support appréciable, notamment pour le montage des projets, et en partie pour leur suivi. Le laboratoire a par ailleurs mis en place un système d'information interne depuis 2019, afin d'obtenir un tableau de bord de l'ensemble des indicateurs de son activité (personnel, contrats, locaux, doctorants, publications). Il n'en reste pas moins que la lourdeur des procédures internes à l'établissement, et leurs changements fréquents, sont des facteurs qui impactent négativement l'activité de recherche. Une action de simplification des tâches administratives est en cours à l'échelle de l'établissement, mais les résultats ne sont pas encore visibles à la fin de la période.

1.2.4. Communication

Le CÉDRIC dispose de deux outils de communication, l'un, (site <http://cedric.cnam.fr>), à usage externe et l'autre à usage interne (notre "tableau de bord"). Ces deux outils ont été, d'une part, rénové (pour le premier), d'autre part développé entièrement (pour le second) avec l'aide partielle d'un prestataire externe. À cette occasion, nous nous sommes complètement interfacés avec HAL pour la gestion de nos productions de recherche.



Le site public du CÉDRIC



Le tableau de bord du CÉDRIC

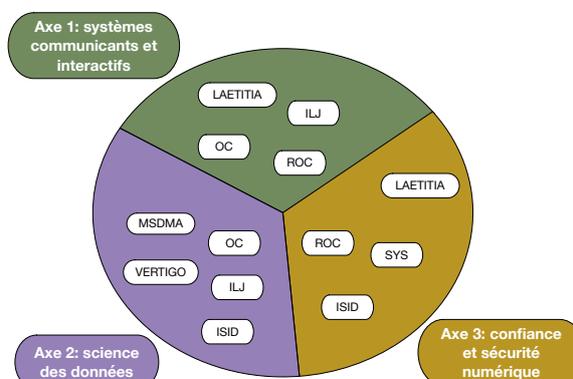
Le tableau de bord nous permet de suivre et de piloter notre activité, ou du moins les parties de cette activité pour lesquelles le laboratoire est indépendant. Cela comprend : le recensement des membres permanents et temporaires ; la gestion des publications (par une commission *ad hoc*) ; l'attribution des locaux (par une commission *ad hoc*) ; le suivi des conventions ; et enfin la saisie et le suivi des missions et achats (par l'équipe administrative). Une partie de ces informations nourrit le site public, notamment les effectifs des équipes, les publications, et l'activité contractuelle.

1.3. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

Le Cédric répond aux enjeux scientifiques sur trois axes majeurs :

- *Systèmes communicants et interactifs* : conception des infrastructures, réseaux et systèmes de communication et d'interaction homme-machine
- *Science des données* : modélisation, optimisation, extraction de connaissance et apprentissage automatique, appliquées à des masses de données complexes,
- *Confiance et sécurité numérique* : sûreté des programmes et des processus, fiabilité des systèmes et sécurité des données.

Chacune des équipes du laboratoire contribue à l'animation et au développement des axes en fonction de son expertise scientifique, selon une répartition résumée par la figure ci-contre. L'animation scientifique est également basée sur cette structure puisque le laboratoire propose un séminaire mensuel, organisé à tour de rôle par chacun des axes. Enfin, les profils recherche de demandes de postes sont maintenant proposés dans le cadre d'un des trois axes du laboratoire, en respectant une cohésion dans la thématique (conseil de laboratoire du 24/11/22).



1.3.1. Axe 1 : systèmes communicants et interactifs

Les équipes contribuant à cet axe sont : ROC, LAETITIA, OC et ILJ

Thématique. Le développement considérable des réseaux et échanges, aussi bien entre utilisateurs de systèmes numériques qu'au sein même de ces systèmes, fait naître de nouveaux défis pour les systèmes de télécommunication ainsi que pour la conception d'interactions humain-machine. Ces technologies doivent se développer pour offrir la puissance de communication et de calcul nécessaires à une industrie toujours plus connectée, au déploiement de véhicules autonomes, aux jeux vidéo, et donc plus généralement à l'interconnexion des personnes et systèmes numériques et robotiques. Les équipes contribuant à cet axe développent des recherches visant à répondre à ces nouveaux besoins sociétaux selon trois niveaux complémentaires :

- les algorithmes de traitement du signal pour la couche physique ;
- les réseaux et les systèmes de communication et calcul distribués et virtualisés ;
- le design d'objets et de systèmes interactifs, et l'évaluation de leur usage.

Activités de l'axe. L'évolution des systèmes communicants et interactifs s'effectue à plusieurs niveaux. La couche physique qui les sous-tend évolue rapidement : radio configurable/AI-based, débit utilisateur 1Tb/s, nœuds à zéro énergie, ondes millimétriques. Ces technologies amènent de nouveaux dispositifs d'interactions : casques de réalité virtuelle, spatialisation sonore, caméra de profondeur. Ces dispositifs sont accompagnés de nouveaux usages : jeux vidéo à contenu génératif, pourvus d'univers massifs et persistants, incluant un public toujours plus vaste et sous des formes toujours plus riches.

Nous étudions et évaluons les formes d'onde, les systèmes d'accès, de transmission et de localisation sans fil à très haute fréquence, ainsi que la correction des imperfections des chaînes radiofréquence. Au niveau des réseaux et de l'infrastructure de communication, nous travaillons sur la conception, la modélisation et l'expérimentation de protocoles de réseau, d'algorithmes d'orchestration et des systèmes d'allocation et gestion des ressources de communication et de calcul. Enfin, du point de vue utilisateur, nous travaillons sur la scénarisation des interactions, entre autres pour les bibliothèques numériques et le jeu vidéo. Nous étudions le *game design*, tout autant dans sa capacité à offrir de nouvelles expériences qu'à s'adapter et à inclure un public toujours plus large.

Dans cet axe de recherche, le laboratoire adopte une approche mixte de modélisation et d'expérimentation. Nous développons des modèles mathématiques pour l'évaluation et la conception d'algorithmes pour les systèmes de communication. Nous expérimentons de nouveaux modes d'interaction, de nouveaux dispositifs matériels ou plateformes logicielles, évalués sur des cas d'usage. Le laboratoire fait appel pour cela à la fois à des techniques d'intelligence artificielle par apprentissage profond ou par renforcement, aux théories de la décision comme la théorie des jeux, à la recherche opérationnelle et l'optimisation combinatoire, ainsi qu'à des approches issues du design et de la psychologie cognitive.

1.3.2. Axe 2 : science des données

Les équipes contribuant à cet axe sont : MSDMA, VERTIGO, OC, ILJ et ISID

Thématique. La croissance continue et la récente disponibilité à très grande échelle des données les plus diverses sont les facteurs déclencheurs de la nouvelle efficacité des méthodes d'intelligence artificielle (IA) dans un large spectre d'applications. À l'ère des réseaux

sociaux et des appareils connectés qui collectent en permanence des informations, la demande pour des systèmes capables de produire de l'information utile à partir de vastes quantités de données est plus forte que jamais. La puissance des nouveaux dispositifs de calcul constitue également de nouveaux défis pour les méthodes algorithmiques ou statistiques, et ouvrent des voies de recherche inexplorées jusqu'à présent.

Les équipes de cet axe développent des recherches consacrées à la représentation de données symboliques ou numériques, à la gestion de leur qualité ainsi qu'à l'extraction de connaissances par des méthodes basées sur la modélisation statistique, l'apprentissage automatique, le raisonnement ou l'algorithmique.

Activités de l'axe. Beaucoup d'applications récentes exploitent des données multi-sources, syntaxiquement et sémantiquement hétérogènes. Leur exploitation nécessite des techniques spécifiques d'approximation, d'extraction, de gestion, d'interrogation et de présentation. Il s'agit de données multimédia (collections d'images, de vidéos, de documents audios ou musicaux, etc.) mais aussi de données capteur (géographiques, multispectrales, satellite) et médicales (scanners, tomographies) ou encore de données textuelles. Un premier défi consiste à extraire ces données à partir de contenus hétérogènes, à les qualifier, à les interpréter et à les valoriser à des fins de recherche, d'analyse ou de classification. Un défi connexe au volume des données est leur constante évolution. En ce sens, l'étude des grands graphes tels que ceux des réseaux sociaux, les systèmes de recommandation, les systèmes experts et la visualisation de données massives via des algorithmes de partitionnement sont des problématiques de grande actualité autour desquelles s'articulent les travaux menés par les équipes impliquées.

Les problématiques abordées dans cet axe permettent de confronter les méthodes de résolution des problèmes combinatoires aux avancées des techniques d'apprentissage. Ces dernières permettent en effet d'améliorer les performances des algorithmes classiques et de résoudre des problèmes de taille de plus en plus grande. Réciproquement, les algorithmes d'optimisation combinatoire et continue s'intègrent au sein d'outils mathématiques fondamentaux de l'analyse de données et de l'apprentissage.

1.3.3. Axe 3 : confiance et sécurité numérique

Les équipes contribuant à cet axe sont : ISID, LAETITIA, ROC, SYS

Thématique. Les systèmes informatiques sont partout. Un citoyen d'un pays développé sollicite en moyenne plus d'une centaine de dispositifs numériques en une journée, sans d'ailleurs en être toujours conscient. Les tâches effectuées par ces systèmes sont souvent critiques : le coût, humain ou financier, d'un dysfonctionnement, fut-il provoqué par un défaut de sûreté ou une attaque intentionnelle, peut être extrêmement élevé. La confiance dans les systèmes, actuels ou à venir, est donc une condition sine qua non du développement de nos sociétés numériques.

Les équipes de cet axe explorent les techniques permettant de garantir la sécurité, la sûreté et la fiabilité des matériels, des logiciels et des systèmes d'information de demain.

Activités de l'axe. Les systèmes informatiques et électroniques ont rapidement évolué, notamment à cause de l'augmentation constante de la puissance de calcul et de stockage. Ce facteur est à l'origine de la place prépondérante du logiciel, parfois en remplacement des matériels spécialisés, dans tous les composants et processus. Elle entraîne souvent une réduction des coûts et une flexibilité accrue pour les systèmes industriels, les systèmes d'information et les réseaux de communication. En contrepartie, de nouveaux facteurs, comme la consomma-

tion énergétique de l'infrastructure numérique, ont gagné de l'importance, questionnant l'opportunité et l'efficacité des systèmes purement logiciels.

Le rôle central des composants logiciels s'accompagne d'une part d'une augmentation de leur vulnérabilité et de l'importance d'anticiper et contrer des attaques de tous types, d'autre part d'une réduction de la fiabilité.

Dans ce contexte, d'importants défis émergent dans la qualification et la détection des vulnérabilités, dans la maîtrise de la sûreté de fonctionnement, la modélisation des systèmes informatiques et cyberphysiques, la conception de protocoles et systèmes sûrs et fiables. Les compétences des équipes du CÉDRIC associées dans cet axe de recherche couvrent des expertises en sécurité des systèmes d'information (équipe ISID), en conception des systèmes de communication et cyberphysiques fiables (équipe LAETITIA), en cybersécurité des réseaux et des objets connectés (équipe ROC), et enfin en modélisation et vérification formelle des systèmes informatiques (équipe SYS). Les techniques étudiées vont de la théorie et des standards sur la fiabilité des systèmes téléinformatiques à la preuve formelle, la vérification automatique et l'expérimentation sur banc d'essai.

1.4. Profil d'activités liées à la recherche

Activités (100 points répartis sur 7 items)	
Administration et animation de la recherche	5
Aide aux politiques publiques et expertise technique	5
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	20
Dissémination de la recherche	10
Recherche et encadrement de la recherche	55
Valorisation, transfert, innovation	5
Autre activités	0

L'activité du CÉDRIC est concentrée sur la recherche et l'encadrement. Ses membres participent activement à plusieurs Masters de recherche (MPRO, Master TRIED, Master intl. réseaux). La dissémination (MOOC, dispositifs de médiation), la valorisation (brevets) et l'animation (participation aux structures et sociétés savantes) complètent le tableau.

1.5. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Les recommandations générales de l'HCERES en 2018 portaient sur les points suivants :

- la nécessité d'une meilleure gouvernance et animation scientifique ;
- la marge de progression (qualitative) de la production scientifique ;
- l'accueil des doctorants et la durée des thèses ;
- la clarification du projet scientifique et la stratégie de convergence des équipes.

Par ailleurs, le manque de personnel technique pour la valorisation des développements logiciels et le soutien aux activités du laboratoire était évoqué dans plusieurs sections du rapport. Sur cet aspect malheureusement, aucune évolution n'a pu être obtenue.

Nous indiquons de manière synthétique dans ce qui suit les évolutions apportées durant la période, en commençant par le projet porté par la nouvelle direction en 2019, projet en grande partie inspiré par les recommandations de l'HCERES.

1.5.1. Perspectives scientifiques et projet

Le rapport HCERES 2018 mentionne le positionnement peu clair du projet et recommande la mise en place d'une stratégie de convergence des équipes. Sur ce dernier aspect, la

flexion doit être nuancée. Les équipes du CÉDRIC couvrent un ensemble très large de domaines, et chacune a sa spécificité, sa trajectoire et un mode de fonctionnement bien établi et difficile à remettre en cause brutalement. Il n'est pas envisageable par exemple de remettre à plat toute l'organisation et de redéfinir de nouveaux thèmes sans risquer de laisser esseulés des collègues qui ne s'y retrouveraient pas. Le choix d'afficher quelques étiquettes porteuses (type « IA ») serait également exclu et source de tensions internes.

Un effort de convergence pertinent doit prendre en compte cette situation. Tout en préservant le cadre établi afin de ne pas ouvrir un chantier potentiellement plus perturbant que bénéfique, il doit permettre d'ouvrir des opportunités d'exploration de nouvelles thématiques, soutenues par le laboratoire, afin d'offrir des perspectives de réorientation ou de collaborations dépassant le cloisonnement en équipes. Le projet porté par la nouvelle direction en 2019 a proposé une démarche de convergence basée sur les principes exposés ci-dessus, complétée par trois objectifs transversaux :

1. favoriser l'accueil et l'épanouissement de nos jeunes collègues et futurs collègues ;
2. adopter un fonctionnement collégial pour le pilotage du laboratoire ;
3. mettre en place des outils de suivi et d'auto-évaluation des différents aspects de nos activités.

Un des objectifs de ce projet était de répondre aux recommandations de l'HCERES 2018. Nous les reprenons ci-dessous.

1.5.2. Gouvernance

Au cours de la période, un ensemble de décisions votées en conseil de laboratoire (CL) ont permis la mise en place d'un fonctionnement plus collégial et mieux informé.

- Mise en place d'un comité de direction (CL du 22/02/2019). Il est constitué des responsables d'équipe, de la chargée de mission doctorants et de la responsable administrative, et se réunit une fois par mois pour discuter des questions courantes et préparer les conseils de laboratoire.
- Création de plusieurs commissions : commission locaux (CL 8/10/2020), commission web (CL 4/07/2019), commission de soutien (CL 13/05/2019), commission des publications (CL 30/11/2020).
- Changement du règlement intérieur pour la constitution du conseil (CL 24/04/2020) : passage de 18 à 12 élus (avec suppléant).
- Mise en place d'un mandat électif pour les responsables d'équipe, basé sur un projet scientifique, afin de favoriser l'émergence de nouvelles dynamiques (CL 10/06/2021).
- Mise en place d'un tableau de bord interne avec indicateurs (locaux, doctorants, conventions, équipes, publications).
- Clarification des règles d'appartenance au CÉDRIC (dans le nouveau RI), et procédures pour l'accueil des associés et le renouvellement des émérites et associés (CL 30/11/2020).
- Encouragement à la publication de profils de postes compatibles avec plusieurs équipes d'accueil (CL 24/11/2022).

1.5.3. Animation scientifique

Deux actions complémentaires ont été menées. D'une part, la structuration en trois axes a été adoptée au conseil de laboratoire du 8/10/2020 après de longues discussions. Cette structuration vise à clarifier le positionnement du CÉDRIC, ainsi qu'à faciliter les échanges

entre équipes d'un même axe. Un résultat concret est la mise en place d'un séminaire mensuel du CÉDRIC, organisé à tour de rôle par chaque axe, et une définition des profils des futurs recrutements dans le cadre d'un axe.

La seconde action est l'affectation d'un budget d'environ 40 000 € par an à des projets dits « exploratoires ». L'objectif est de donner des moyens incitatifs à l'exploration de nouvelles thématiques en reprenant la notion de stage inter-équipe qui existait déjà, mais sur une période plus longue, avec un soutien plus affirmé et plus varié du laboratoire, et un engagement plus formalisé pour ceux qui en bénéficient. Un projet doit s'appuyer sur une thématique bien identifiée et clairement orthogonale au découpage disciplinaire actuel du CÉDRIC. Il doit présenter des objectifs précis (publications, collaborations, demande de financement, dépôt de sujets pour recrutement de doctorant). Les résultats des projets, ainsi que leurs débouchés (financements ANR ou de thèses obtenus) sont présentés en assemblée générale. La liste détaillée des projets financés et des séminaires d'axe est fournie dans le portfolio.

1.5.4. Evaluation qualitative de la production scientifique

Le rapport HCERES 2018 mentionnait une augmentation du nombre de publications non accompagnée d'une *analyse qualitative*, ainsi que la « qualité hétérogène de la production » et l'absence de valorisation des plateformes et logiciels.

Un travail important a été mené afin de répondre à cette remarque et de permettre une meilleure valorisation des résultats et productions du CÉDRIC. Le transfert complet des publications sur HAL (fin année 2019) était une étape nécessaire mais pas suffisante puisque le dépôt sur HAL est difficilement contrôlable et que les catégories HAL sont très génériques.

Le CÉDRIC a mis en place un système de classement de ses productions basé sur des référentiels internationaux. Ce système est mis en œuvre et contrôlé par une commission des publications. Il est de plus pris en compte dans la communication du CÉDRIC, puisque seules les publications dans des conférences ou revues reconnues sont présentées sur la page des équipes par exemple.

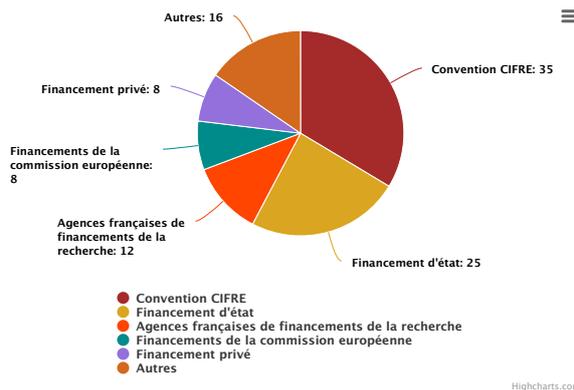
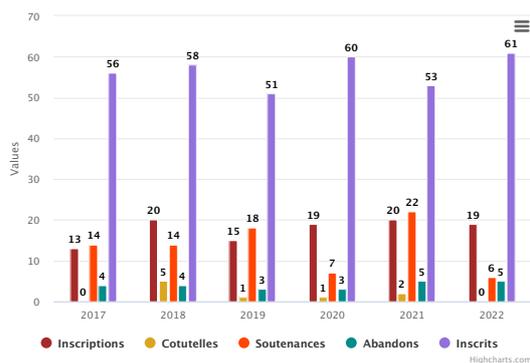
Nous avons choisi de consacrer un des documents du portfolio à la gestion qualitative, et d'y placer la production du CÉDRIC classée selon des critères qualitatifs.

1.5.5. Doctorants

L'accueil des doctorants et plus généralement le soutien aux jeunes chercheurs est une priorité du laboratoire. Une chargée de mission (Samia Bouzefrane) a pris en charge les relations avec l'ED et le suivi des doctorants en coordination avec la Direction de la Recherche.

Au début de la période, le CÉDRIC dépendait, pour des raisons historiques, de l'école doctorale EDITE (dont Sorbonne Université est le partenaire principal). Nous sommes passés en 2020 à l'ED Sciences et Métiers de l'Ingénieur (SMI), plus étroitement associée au Cnam et à la COMUE HESAM. À cette occasion nous avons pu obtenir la garantie de deux contrats doctoraux annuels pour le laboratoire. De plus, nos doctorants sont maintenant accueillis et suivis dans l'établissement par les membres de l'ED (dont notre chargée de mission) et bénéficient des formations et activités communes à tous les doctorants du Cnam.

Une commission se réunit en juin pour auditionner et sélectionner 4 ou 5 candidats doctorants, dont les dossiers sont ensuite présentés à l'ED qui effectue le classement final. Une condition imposée par le laboratoire pour candidater à cette commission est un co-encadrement systématique par un rang B, afin d'offrir à nos jeunes collègues la possibilité de développer leur recherche et de préparer leur HDR. La commission est attentive à équilibrer, sur la durée, l'attribution des contrats doctoraux. Comme pour les projets exploratoires, cette règle est un moyen de distribuer collégialement et équitablement les ressources – limitées – du laboratoire et de soutenir le développement des carrières.



Inscriptions sur la période

Sources de financement des doctorants

Le CÉDRIC maintient, d'une année sur l'autre, un vivier actif d'une soixantaine de doctorants (figure ci-dessus, à gauche). Sur la période, 81 thèses ont été soutenues, ce chiffre est en augmentation de 11% par rapport à la période précédente. Un aspect remarquable du financement est le nombre élevé de financements Cifres (même figure, à droite), ainsi que les financements sur contrat ("Commission européenne" et "Autres").

1.5.6. Evaluation des résultats

Positionnement. Le positionnement scientifique du CÉDRIC reste celui d'un laboratoire généraliste constitué d'équipes et de membres qui couvrent des domaines assez divers. Les projets scientifiques sont de ce fait essentiellement portés par les équipes, le laboratoire se devant quant à lui d'offrir des perspectives d'évolution thématique à ses membres, et un soutien aux initiatives allant dans ce sens.

L'ouverture à de nouveaux projets inter-équipes a été initiée par la définition des axes, la création d'un séminaire commun, et les projets exploratoires. Les résultats sont positifs pour les projets exploratoires. L'activité des axes reste à consolider, et le séminaire est encore trop dépendant de relances régulières.

Gouvernance. La plupart des nouvelles instances créées pendant la période fonctionnent et contribuent à une meilleure implication et à un partage des décisions. C'est le cas du comité de direction, et des commissions chargées des locaux, des publications, et du site web. Une commission de soutien visant à proposer des ressources et des aides à des collègues en difficulté n'a pas été sollicitée et a mis ses activités en sommeil. C'est le cas également de la commission du budget qui ne disposait pas de données fiables, en raison principalement de la complexité des procédures administratives au Cnam. L'absence de suivi budgétaire est un point sensible qu'il faudra corriger si possible à l'avenir. Enfin, le tableau de bord du laboratoire est une précieuse source d'informations pour suivre et synthétiser notre activité.

Progression qualitative de la production. Le passage sur HAL, complété par une gestion qualitative de nos productions, est l'un des résultats significatifs de la période écoulée. Nos principales publications sont identifiées et mises en valeur, et cela constitue un encouragement implicite pour tous nos collègues à choisir avec soin les revues et conférences où ils soumettent leurs travaux. Un angle mort reste la mise en valeur des logiciels. Nous avons créé un espace commun sur l'outil de partage GitHub, associé à HAL, mais aucune production significative n'y a été publiée. On peut mettre ce relatif échec en lien avec l'absence de support technique au CÉDRIC, demandé à l'issue de l'évaluation précédente, et qui n'a toujours pas abouti.

Chapitre 2. Portfolios

2.1. Introduction du portfolio CÉDRIC

Nous avons choisi de présenter un portfolio constitué de documents représentatifs de l'activité globale du laboratoire. Ces documents permettent de détailler des actions qui nous semblent importantes, dont l'exposé est incompatible avec les limites de place du rapport principal.

2.2. Document 1 : classement de la production scientifique du CÉDRIC

Ce document expose les principes de la classification complémentaire des productions du CÉDRIC, sur la base des données HAL. Cette démarche de qualité était une demande forte de la précédente évaluation, et un apport nécessaire dans le cadre d'une auto-évaluation de notre activité. Toutes les publications *classées* du CÉDRIC sont données dans le document, par équipe, catégorie et classement (fichier `portfolio-publis.pdf`).

2.3. Document 2 : projets exploratoires et séminaires

Ce document illustre les actions visant à assurer une convergence des activités des équipes. Les *projets exploratoires* sont l'outil principal que nous avons mis en place pour encourager sur une période pluri-annuelle des efforts de travaux inter-équipe et d'exploration de nouvelles thématiques. Nous donnons la liste de ces projets, avec les équipes participantes. Les *séminaires des axes* ont été mis en place pour assurer un rendez-vous commun au laboratoire, dans lequel chaque axe à tour de rôle présente ses travaux. (fichier `portfolio-projex.pdf`).

2.4. Document 3 : activité contractuelle du CÉDRIC, 2017-2022

Ce document est complémentaire au fichier Excel des productions. Il donne quelques statistiques générales sur les contrats obtenus sur la période, et la liste détaillée des conventions par équipe (fichier `portfolio-conventions.pdf`).

Chapitre 3. Autoévaluation

3.1. Autoévaluation de l'unité

3.1.1. Domaine 1. Profil, ressources et organisation de l'unité

Référence 1 : L'unité s'est assigné des objectifs scientifiques pertinents

La précédente évaluation HCERES avait fait le constat d'un manque de pilotage de la politique de publication du CÉDRIC (notamment en ce qui concerne l'aspect qualitatif) et l'absence d'une politique d'incitation et de soutien à la publication. La nouvelle direction, à sa prise de fonction en 2019, a donc initié une réflexion sur cette question. Nous avons commencé par une étude des pratiques dans d'autres laboratoires et centres de recherches, en distribuant un questionnaire :

- Existe-t-il un référentiel de classement des publications ?
- Existe-t-il une commission (ou autre comité) validant les publications à afficher par le laboratoire ?
- Existe-t-il une commission pour aider les membres du labo à évaluer leur production et à l'adapter en fonction de leurs objectifs (qualif, HDR, RIPEC...) ?
- Y a-t-il un suivi global / par équipe / individualisé pour évaluer la production en fonction du référentiel ?
- Existe-t-il une politique incitative (p.e. répartition de la dotation) ?
- Existe-t-il une démarche spécifique à l'attention des non publiants ?

Les résultats¹, présentés par le groupe de travail au conseil de laboratoire, ont amené ce dernier à valider les décisions suivantes : (i) création d'une commission de soutien à la publication et à l'autoévaluation des activités, (ii) création d'un référentiel basé sur les sources internationales reconnues et utilisation de ce référentiel pour évaluer nos productions, valoriser les plus importantes, et inciter les chercheurs à se donner des objectifs ambitieux, enfin (iii) orientation des (modestes) ressources financières du laboratoire pour soutenir les activités et les orienter vers des objectifs qualitatifs (voir section suivante pour cet aspect).

La commission de soutien. Une commission de soutien à la publication et à l'activité a été créée en 2019, avec un membre volontaire de chaque équipe. Elle a collecté les pratiques de publication (très variables) des différentes équipes et établi leur référentiel. Elle a également établi et maintenu les critères d'évaluation en pratique dans les différentes institutions d'évaluation pour la qualification MCF et PU, la RIPEC, l'HDR, les CRCT et délégations. Enfin, le laboratoire a intégré dans son budget 2022 une ligne de crédit de 15 000 € destinés au soutien à la publication. Cette aide, aussi bien qualitative que financière, était notamment orientée vers les membres du laboratoire en difficulté : doctorants financés hors projets, MCF surchargés de cours, ou non publiants. La commission de soutien a été très peu sollicitée et a mis

1. Disponibles dans un document interne

ses activités en sommeil fin 2020. Il se peut que la période COVID ait eu un effet négatif sur cette initiative, et qu'une relance soit envisagée après réflexion sur les raisons de l'absence de demande significative. Le suivi des publications a été transmis à la commission *ad hoc*.

Evaluation qualitative des publications. En 2019, l'ensemble des publications du laboratoire a été transféré dans l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL (elles étaient auparavant gérées dans un système interne). HAL offre malheureusement peu de support pour l'évaluation qualitative. Le CÉDRIC a établi un référentiel basé sur des sources internationales d'une part, sur des sources internes d'autre part. Un système de classement basé sur ces référentiels est en place depuis 2021 et a été appliqué de manière rétroactive. Nous en présentons les principes, ainsi qu'une analyse détaillée de la production scientifique du CÉDRIC, dans un document du portfolio. Les résultats globaux sont résumés dans le domaine *Production scientifique* ci-dessous.

Référence 2. L'unité dispose de ressources adaptées à son profil d'activités et à son environnement de recherche et les mobilise.

La dotation de l'établissement. Le Cnam attribue une dotation annuelle basée sur le nombre de producteurs (est considéré comme producteur tout enseignant-chercheur permanent – hors émérite – ayant publié au moins deux articles internationaux au cours des 5 années passées). Le montant par personne est de 2 700 € (plus 300 liés à la LPR ces deux dernières années), et le nombre de producteurs du CÉDRIC, selon ces critères, est de 55 sur 75, à quelques unités près d'une année sur l'autre. Nous recevons donc environ 150 K€ de dotation annuelle.

Contrats et conventions. L'activité contractuelle du CÉDRIC est forte. Les ressources provenant des conventions sont (en montant annuel) dix fois plus élevées que le montant de la dotation de l'établissement (l'activité contractuelle est analysée dans la section consacrée à l'attractivité, référence 3). Le conseil de laboratoire a voté fin 2020 un prélèvement de 2 % sur une partie de ces ressources afin d'abonder le budget du soutien à la publication et aux activités financées par le laboratoire. Cette décision n'a pas encore été appliquée, en raison d'une part de l'absence de demande de soutien, et d'autre part de la complexité de sa mise en œuvre administrative. Elle ne concerne que la partie des conventions dont les montants sont librement affectables (à l'exclusion donc, notamment, des projets ANR et Européens).

Les choix budgétaires. Le budget propre du CÉDRIC est de l'ordre de 180 K€, si on prend en compte le prélèvement sur les projets. La nouvelle direction a constitué une commission chargée de réformer les règles de répartition de la dotation entre les équipes du laboratoire, afin d'avoir une affectation plus équilibrée (CL 12/04/2021). En effet, le soutien aux équipes est basé sur le nombre de permanents publiants. Il était au début de la période calculé sur une base complexe incluant le nombre de publications (sans évaluation qualitative), ce qui introduisait un fort déséquilibre et privait certains membres de ressources. La nouvelle règle aboutit à une dotation individuelle proche de celle accordée par le Cnam (soit 2 700 € par publiant), ce qui reste modeste en l'absence d'autres ressources. Elle évite également le biais d'un encouragement à la publication en quantité.

En plus du soutien aux équipes, le budget du laboratoire finance des projets exploratoires et un soutien à la publication. Plus précisément, il était par exemple de 181 268 € en 2021. Si on met à part les dépenses de fonctionnement, les principaux montants affectés à l'activité scientifique sont :

1. Le soutien aux équipes, de loin la part la plus large (105 568 € en 2021).
2. Le financement de projets exploratoires, (40 700 € en 2021).

3. Un soutien à la publication (15 700 € en 2021).

Le dernier montant était destiné à encourager une reprise d'activité ou à soutenir des collègues en difficulté, mais faute de sollicitations, il n'a pas été reconduit, dans l'attente d'une révision de la politique de soutien.

Locaux. L'organisation du Cnam est basée sur les structures d'enseignement, et les locaux occupés par les enseignants/chercheurs sont donc répartis sur les trois EPNs couvertes par le laboratoire. Seule une petite partie des bureaux est affectée en tant que telle au CÉDRIC, et sert à héberger principalement l'équipe administrative et une (faible) partie des personnels temporaires.

Dans l'ensemble, nous sommes hébergés dans des locaux rénovés et confortables. Leur capacité est cependant à peine suffisante pour l'ensemble des membres du laboratoire, notamment pendant la période d'activité des stagiaires. Nous avons mis en place une commission chargée de l'affectation des bureaux, avec un représentant par équipe, et un support fourni par l'un des modules de notre système d'information. Elle ne gère que les bureaux propres au CÉDRIC et ceux de l'EPN5 (informatique), soit six équipes sur les huit du CÉDRIC (les deux équipes indépendantes étant MSDMA et Laetitia).

Des règles mises en place et affinées depuis 2019 nous permettent de gérer de manière collégiale nos ressources et – pour l'instant – de faire face sans débordement aux afflux ponctuels de membres temporaires. Le tableau suivant donne quelques indicateurs sur les locaux gérés par la commission du CÉDRIC et leur utilisation. Ces données sont produites au 31 décembre : la période de charge est celle de l'arrivée des stagiaires, de mars à juillet. Le taux d'occupation durant cette période est proche des 100 %.

Indicateur	Valeur
Nb de personnes	175, dont 75 EC, 3 admin., 60 doctorants, 7 Postdoc, 4 ATER, 8 stagiaires, 8 ingénieurs et 7 émérites
Surfaces	887 m ²
Surface moyenne/pers.s	4,7 m ²
Taux d'occupation	87 %

Ressources matérielles. En ce qui concerne les matériels du laboratoires, au-delà des ordinateurs personnels et d'une machine hébergeant nos services web, nous avons envisagé au cours de la période de mettre en place des grappes de serveur afin d'effectuer des calculs distribués, dans le cadre notamment des méthodes d'apprentissage basés sur des réseaux de neurones. Nous avons rapidement rencontré les limites de locaux peu adaptés à des infrastructures nécessitant un refroidissement constant. Après une étude et de longs échanges avec les services du Cnam, le coût de l'adaptation d'une salle à nos besoins est apparu prohibitif et nous avons renoncé à cette option.

Une grappe constituée de 8 serveurs de calcul avec un total de 23 cartes graphiques de calcul NVIDIA (allant de GTX 1080 Ti à RTX A6000) a été installée dans un (petit) local dédié. Ces serveurs de calcul sont utilisés pour les travaux de recherche des membres des équipes Vertigo, ISID et OC. Suivant les conventions, certains doctorants et post-docs font également appel à des ressources de calcul externes (Lab-IA, Jean Zay, etc.). Sur la période, 19 doctorant ont utilisé ces machines (dont 11 en cours) et 4 postdocs (dont 3 en cours), ainsi que de nombreux stagiaires (une demi-douzaine chaque année).

Personnel technique. En ce qui concerne le personnel technique, nous n'avons pas pu sur la période obtenir le renfort d'un (au moins) ingénieur qui aurait pu prendre en charge soit l'administration de nos machines, soit la réalisation de nos outils de communication. Malgré nos

demandes annuelles, les choix de l'établissement n'ont pas permis de dégager de ressources. Nous nous appuyons en partie sur les ingénieurs des EPNs (départements d'enseignement) qui acceptent ponctuellement (et nous en remercions) de nous assister pour des installations ou des évolutions de logiciels ou de matériel.

Référence 3. Les pratiques de l'unité sont conformes aux règles et aux directives définies par ses tutelles en matière de gestion des ressources humaines, de sécurité, d'environnement, de protocoles éthiques et de protection des données ainsi que du patrimoine scientifique

Parité. Sur l'ensemble des permanents actifs durant la période, le CÉDRIC compte 27 % de femmes. Toujours sur cette même période, nous avons formé 199 doctorants dont 72 femmes, soit 36 %.

La direction du laboratoire est constituée de 3 femmes et un homme. Sur la période, la direction adjointe a été assurée par deux maîtresses de conférences HDR. Il s'agit d'un choix délibéré consistant à assurer une meilleure représentativité des membres du CÉDRIC au niveau de la direction. Le fait en particulier d'avoir un rang B à un poste de responsabilité encourage les collègues à remonter plus spontanément les problèmes, sans se sentir exclus des décisions du fait de leur statut.

Au-delà de cette représentativité, le laboratoire n'a pas mis en œuvre de politique spécifique. Les recrutements sont trop peu nombreux pour viser la parité, même approchée. Signalons que nous avons recruté 5 MCF hommes, pour 3 MCF femmes, 2 rang A hommes pour 2 rangs A femmes. Il n'y a donc pas de signe de déséquilibre significatif. Le directeur de laboratoire a suivi une formation aux biais de genres et est attentif à cet aspect pendant la tenue des commissions.

Synthèse de l'autoévaluation

Le CÉDRIC a significativement renforcé son organisation et sa gouvernance durant la période. Que ce soit sur la gestion des ressources, l'autoévaluation de notre production ou la convergence de nos activités scientifiques, des progrès importants ont été réalisés.

Certaines actions ne sont pas encore abouties. Les tentatives de soutien aux collègues en difficulté n'ont pas rencontré de demande. Les ressources sont limitées (budget), tendues (locaux), voire insuffisantes (personnel technique). Dans le cas du budget, le suivi reste très imprécis, ce qui pénalise le pilotage. Certaines de ces faiblesses ne pourront pas être réglées en interne sans un soutien de l'établissement.

3.1.2. Domaine 2. Attractivité

Référence 1. L'unité est attractive par son rayonnement scientifique et s'insère dans l'espace européen de la recherche.

La liste détaillée des faits marquants du CÉDRIC et des ses interactions avec l'extérieur étant fournie dans le fichier excel DCP et dans les rapports d'activité des équipes, nous donnons ici une synthèse des faits illustrant le rayonnement et l'attractivité du laboratoire.

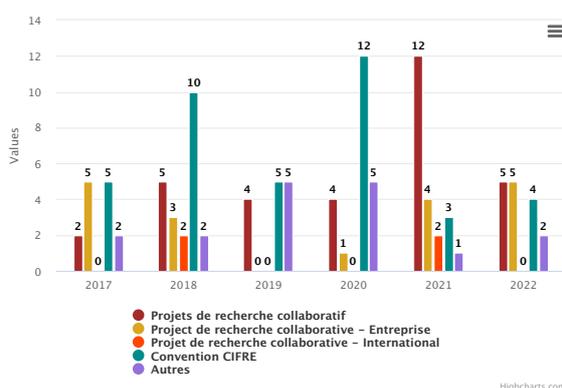
Depuis 2017, le CÉDRIC a consolidé les relations internationales engagées sur la période précédente, et de nouveaux partenariats, notamment européens, ont été mis en place à travers l'obtention de 4 projets européens sur la période. Notons de plus qu'un membre du laboratoire est président de la société Africaine des sciences digitales. Les nombreux projets de recherche académiques ou industriels ont renforcé les collaborations nationales du laboratoire, et le CÉDRIC a pérennisé ses collaborations avec l'entreprise Orange à travers la signature d'un accord cadre. Par ailleurs, les membres du CÉDRIC se sont largement investis dans

l'organisation d'une vingtaine de conférences internationales qui ont eu lieu au Cnam. Ils ont de plus participé à l'organisation de nombreuses journées de recherche pour la communauté nationale, dont la plupart se sont déroulées au Cnam.

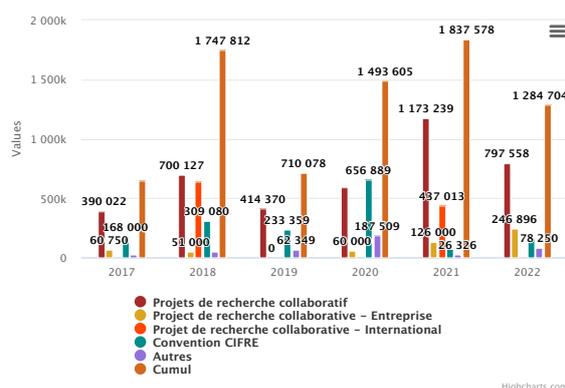
Certains membres ont de fortes responsabilités nationales et internationales, notamment dans le pilotage des sociétés savantes de leur discipline de recherche, dans l'animation scientifique de Groupes de Recherche du CNRS, ou bien au sein du pôle de compétitivité Cap Digital. Plusieurs membres du laboratoire ont été lauréats de distinctions récompensant leurs travaux de recherche, et 11 articles ont été récompensés par des prix de conférences ou de journaux internationaux. De plus, un doctorant a obtenu le prix national de thèse délivré par l'AFIA. Enfin, sur la période, 5 brevets ont été déposés et plusieurs logiciels en accès ouvert ont été distribués.

Référence 3. L'unité est attractive par la reconnaissance de ses succès des appels à projets compétitifs.

L'activité contractuelle du CÉDRIC a été extrêmement soutenue sur la période, ce qui lui permet de financer ses actions de recherche, et notamment le financement des doctorants et autres contractuels. La figure ci-dessous (partie gauche) donne, année par année, le nombre de conventions (la date de notification faisant foi).



Obtention de contrats sur la période



Montants contractuels sur la période

Nous adoptons la classification suivante :

- Les projets de recherche collaborative (nationaux) sont les projets de recherche avec partenaires académique, type ANR ou FUI.
- Les projets de recherche collaborative - Entreprise sont les contrats avec des partenaires industriels avec objectif de valorisation.
- Les projets de recherche collaborative (internationaux) sont les projets de recherche avec partenaires académique, type projet H2020.
- Les conventions CIFRE sont distinguées en raison de leur importance et récurrence pour le CÉDRIC.
- La catégorie "Autres" regroupe des partenariats divers, dont les financements de portée régionale.

Le portfolio présente le détail des conventions de la période, groupées par type et par équipe. Le bilan global selon les catégories précédentes est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Intitulé	Nb	Montant
Projets de recherche collaboratif	32	4064523
Project de recherche collaborative - Entreprise	18	544646
Projet de recherche collaborative - International	4	1075451
Convention CIFRE	39	1604328
Autres	17	429401

Le nombre de conventions CIFRE est remarquable et constitue un point fort de l'activité du CÉDRIC. Si on y ajoute les projets collaboratifs avec des entreprises, on constate des relations suivies et fructueuses du laboratoire avec le monde industriel.

Les projets collaboratifs de type ANR sont également nombreux, et ils représentent la principale contribution financières à nos activités de recherche. Ce résultat est d'autant plus notable que la sélectivité des projets ANR a été très forte sur une bonne partie de la période, avant de s'améliorer depuis 2 ou 3 ans. Les contrats CIFRE ont connu un pic en 2018, et tendent à décroître depuis. Pour les projets collaboratifs, le pic se constate plutôt en 2021.

Nous avons obtenu quatre projets internationaux sur la période, dont trois H2020, ce qui peut être considéré comme satisfaisant. Ces projets sont très sélectifs, demandent un travail important avant la soumission et après acceptation, et nécessitent de s'appuyer sur un réseau international riche pour s'intégrer dans des consortium solides.

Il est difficile d'évaluer le rôle du laboratoire dans la réussite à ces différents appels à projet. En ce qui concerne les CIFRE et conventions avec les entreprises, les services administratifs du Cnam sont efficaces et expérimentés, ce qui aide considérablement. Une des actions entreprises pour encourager la soumission à des AAP collaboratifs est le mécanisme des projets exploratoires, mis en place en 2019, qui permet d'explorer des thèmes nouveaux sous divers angles : stagiaires, invitations, développement de collaborations. Une demande explicite du laboratoire est qu'un projet exploratoire se place dans la perspective d'une réponse à un AAP extérieur pour un financement plus pérenne. Sur au moins deux projets ANR, cette méthode a produit un résultat.

Synthèse de l'autoévaluation

Les nombreux indicateurs mentionnés ci-dessus montrent une visibilité et une attractivité forte du CÉDRIC, aussi bien pour son environnement social et économique que pour ses partenaires académiques. C'est particulièrement net au niveau national, un peu moins au niveau international où notre activité peut s'améliorer au regard de notre taille.

3.1.3. Domaine 3. Production scientifique

Référence 1. La production scientifique de l'unité satisfait à des critères de qualité.

Le CÉDRIC a effectué un effort important d'auto-analyse de sa production scientifique et de clarification de ses pratiques de publication. Cet effort a débouché sur plusieurs résultats concrets : établissement de référentiels pour chaque équipe, basés sur des sources communes (essentiellement SCIMAGO), reconnaissance mutuelle de pratiques de production et de modalités d'évaluation très variables selon les domaines, enfin mise en place d'un contrôle et d'un classement systématique complémentaire aux catégories HAL, accompagné d'une valorisation des productions-phares du laboratoire sur son site web. Toutes ces innovations sont implantées par une commission des publications qui se réunit régulièrement pour maintenir le classement de nos productions.

Le premier document du portfolio au niveau de l'unité est consacré à notre politique de classement. Nous présentons ici quelques faits marquants qui se dégagent de l'analyse rendue possible par cette démarche qualitative.

Le tableau suivant résume la production du CÉDRIC sur la période. Les deux premières lignes correspondent à la catégorie la plus exigeante, celle des conférences et revues internationales avec comité de lecture.

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Revue	216	86	58	19	11		
Conférences	74	162	70	14	103		
Chapitre						41	
Ouvrages						17	
Brevets							5
Logiciel							7

On peut constater que la plus grande part se classe dans les quartiles Q1 et Q2, correspondant à la moitié la plus sélective. Les résultats sont remarquables sur la catégorie Revues-Q1, ce qui correspond à une productivité forte, orientée vers l'excellence, et visant les revues scientifiques à forte visibilité. La part des conférences est plus modeste. Il faut souligner que cette distinction n'est pas de nature hiérarchique, mais résulte de différences traditionnelles selon les domaines. Il existe en gestion de données par exemple des conférences extrêmement sélectives et à très fort impact.

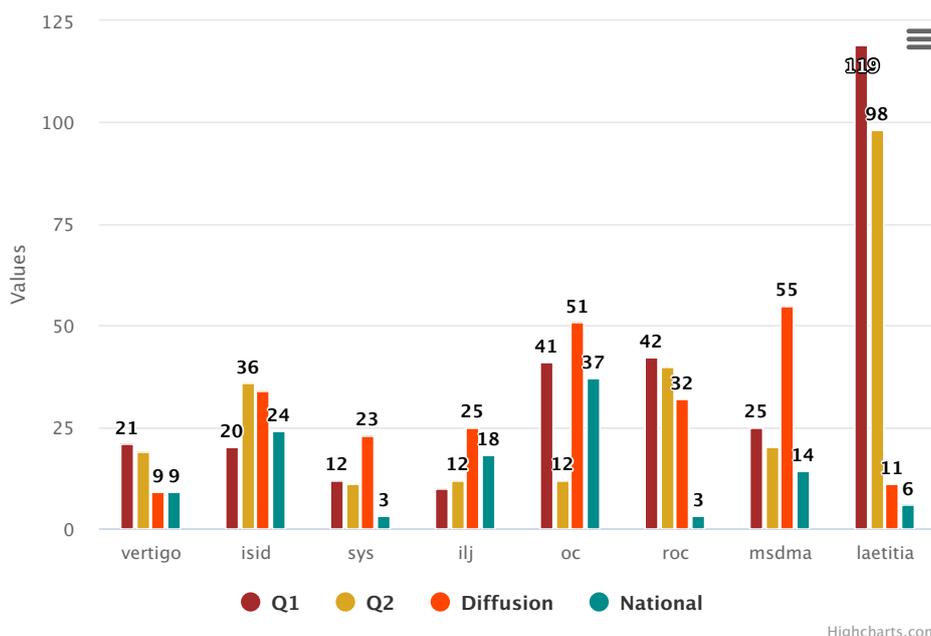


FIGURE 3.1 – Répartition des publications par équipe

Ces différences de culture expliquent en partie la disparité du volume de publications selon les équipes. La figure 3.1 illustre ces disparités pour les principales catégories. Une équipe (Laetitia) se distingue à la fois par sa très forte productivité, et l'évidente exigence de qualité de ses travaux. Les autres équipes ont des écarts moins significatifs. Tout en s'inclinant devant ces résultats notables (fortement influencés d'ailleurs par quelques têtes d'affiche très productives), il faut souligner que les comparaisons doivent être interprétées avec prudence, en raison encore une fois des spécificités fortes de chaque domaine. Publier en revue ou conférence Q1

dans des disciplines de l'informatique combinant recherche théorique ou conceptuelle, implémentation et expérimentation, nécessite un très gros effort qui limite nécessairement la quantité. Le CÉDRIC est un laboratoire généraliste dont les résultats doivent s'analyser à la granularité des équipes.

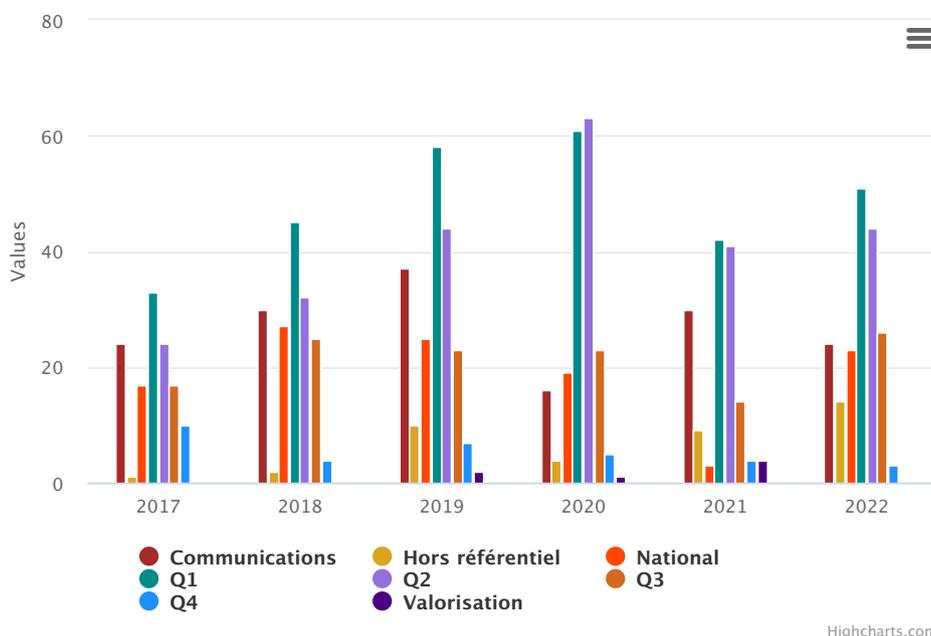


FIGURE 3.2 – Analyse qualitative : publications selon le classement CÉDRIC

La figure 3.2 donne la répartition par classement et par année. On remarque une évolution de la répartition entre les différents quartiles, la très grande majorité de nos publications se situant maintenant en Q1 et Q2. On peut espérer que cette évolution soit consécutive à la mise en place de notre système d'évaluation qualitative qui encourage nos collègues à choisir avec soin les conférences ou revues où ils publient. Notons que l'année 2021 (post covid) est marquée par une légère baisse en quantité dont on peut espérer qu'elle sera provisoire, comme semblent l'indiquer les résultats 2022.

Référence 2. La production scientifique de l'unité est proportionnée à son potentiel de recherche et correctement répartie entre ses personnels.

Nous avons analysé la productivité des membres du laboratoire en la groupant par tranches. La figure 3.3 donne en abscisse ces tranches, associées en ordonnée au nombre de membres ayant un nombre total de publications dans cette tranche, sur la période. La première barre indique donc le nombre de non-publants, la seconde le nombre de membres ayant publié entre 1 et 5 articles, etc. Ne sont concernés que les *permanents* rattachés au CÉDRIC sur l'ensemble de la période (dont les émérites, considérés comme permanents au Cnam). Les publications prises en compte sont celles classées Q1-Q4 pour la première barre, et les productions de tous types confondus pour la seconde barre.

Il est important de mentionner qu'il ne s'agit que d'une vision *très partielle* du travail scientifique des membres du laboratoire, réduite à l'activité de publication, mais qui prend en compte sa qualité. La première remarque est que le nombre de non-publants est élevé. Les raisons sont diverses : certains collègues sont fortement investis dans d'autres tâches de l'établissement.

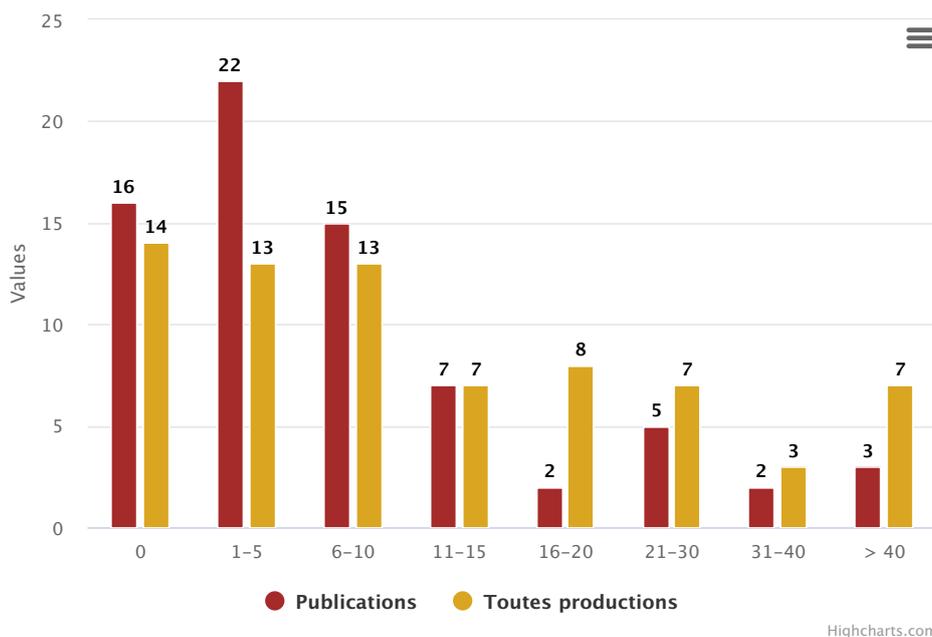


FIGURE 3.3 – Répartition des publiants

ment², d'autres subissent visiblement l'usure ou le découragement de conditions souvent peu propices à une recherche intense et sereine. La surcharge en heures de cours est également un facteur souvent évoqué. Ces raisons ne sont pas exclusives entre elles, et s'y ajoutent bien entendu des facteurs individuels.

Si on ajoute aux non-publiants ceux dont la quantité de publications (classées) peut être considérée comme faible (entre 1 et 5, sur une période de 6 ans), on s'approche de la moitié des enseignants-chercheurs en activité rattachés au laboratoire. Quand elle concerne les rangs A, cette situation correspond à une perte de capacité d'encadrement et d'animation scientifique. Pour les rangs B, elle implique qu'une partie de nos jeunes collègues perdent les perspectives de développement de leur carrière. Les mesures d'encouragement et de soutien prises au cours de la période n'ont pas vraiment rencontré de succès. Il s'agit d'un aspect sur lequel des efforts doivent être poursuivis.

Une dernière observation peut être tirée de la figure 3.3 : seules dix personnes ont une production dépassant 16 publications internationales avec actes sur la période. Ce dernier indicateur souligne une certaine fragilité de notre activité, dépendante d'un nombre relativement restreint de « locomotives ».

Référence 3. La production scientifique de l'unité respecte les principes de l'intégrité scientifique, de l'éthique et de la science ouverte. Elle est conforme aux directives applicables dans ce domaine.

Le Cnam a nommé une référente déontologue en 2021. Un référent intégrité scientifique a été également nommé en 2022. Suite à une présentation de ses missions devant le Conseil scientifique, le Cnam a entrepris au début de l'année 2023 une campagne de sensibilisation de tous les personnels impliqués dans des activités de recherche, qui ont tous pris connais-

2. Le règlement intérieur du Cnam impose le rattachement de tout enseignant-chercheur à un laboratoire, même en cas de choix de carrière différent.

sance du Code de conduite européen pour l'intégrité en recherche (proposé par ALLEA : All European Academies).

Depuis 2022, l'établissement travaille également à la mise en place d'un comité d'éthique de la recherche au sein du Cnam et qui se mettra en place en 2023.

Synthèse de l'autoévaluation

La production scientifique du CÉDRIC prise à un niveau global, est forte et de qualité. Cependant, elle reste inégalement répartie, en raison d'une part des grandes différences de pratique dans les domaines scientifiques couverts par le CÉDRIC, et d'autre part d'un trop grand nombre de collègues qui rencontrent des difficultés pour développer une activité soutenue.

3.1.4. Domaine 4. Inscription des activités de recherche dans la société

Référence 1. L'unité se distingue par la qualité et la quantité de ses interactions avec le monde non-académique.

Le CÉDRIC maintient sa tradition ancienne d'une forte interactivité avec les entreprises, et cette interactivité nous apporte plusieurs types de bénéfices. Le plus visible (outre les projets collaboratif entreprise déjà cités) est le nombre important de contrats doctoraux et notamment de conventions Cifre. Nous disposons d'une véritable expertise dans l'élaboration de sujets de recherche à vocation industrielle et dans le montage et la finalisation de conventions. Dans certains (accord cadre avec Orange par exemple), ces conventions sont récurrentes et pluriannuelles, ce qui montre la confiance que les entreprises mettent dans l'actualité de nos sujets de recherche et notre capacité à les développer. On peut dire, réciproquement, que ces relations sont, en retour, un encouragement à diriger une partie de nos recherches vers des objectifs de valorisation. Notons enfin que l'équipe Laetitia, sous l'égide d'HESAM Université, a participé au lancement de l'Alliance européenne Upcell (<https://ucpcell.org>), intégrant une centaine de membres industriels et universitaires, dont l'objectif est d'assurer une autonomie industrielle et une souveraineté économique en Europe dans le domaine de la production de batteries électriques.

Référence 2. L'unité développe des produits destination du monde culturel, économique et social.

Le CÉDRIC a déposé 5 brevets sur la période, et propose un nombre modeste (7) de logiciels diffusés sur la plate-forme Github, sans réelle dynamique par manque de soutien technique. Les brevets sont principalement portés par l'équipe Laetitia, sur des thèmes de nature industrielle (infrastructures de communication) porteurs d'enjeux importants. Enfin, l'équipe ILJ a proposé un ordinateur mécanique utilisant des billes comme moyen de stockage de l'information qui pourrait servir de démonstrateur pour les espaces muséologiques consacrés à l'informatique.

Référence 3. L'unité partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Un membre du Laboratoire est président et fondateur de l'association CapGame (<https://www.capgame.fr/>) créée en 2013 qui agit pour améliorer l'accessibilité aux et des jeux vidéo, et plus largement pour l'inclusion des personnes en situation de handicap à la vie numérique. Il a participé dans ce cadre à plusieurs débats de société. Un projet exploratoire transverse à deux équipes du Cédric et portant sur l'accessibilité des manuels scolaires a été

financé par le laboratoire. Ce soutien a aidé à développer cette thématique sociétale, et les participants ont obtenu un financement ANR pour poursuivre leurs recherches.

3.2. Autoévaluation de l'équipe ISID

Composition de l'équipe

Permanents	
Responsable	Cedric du Mouza
Emérites	Jacky Akoka.
Profs Cnam	Véronique Legrand.
Profs Université	Cedric du Mouza, Samira Si-Said Cherfi, Elisabeth Metais.
MCF	Fayçal Hamdi (HDR), Elena Kornyshova, Nada Mimouni, Nadira Lammari (HDR), Faten Atigui.
Non permanents	
Ingénieurs CDD	Celine Dercourt.
Doctorants	Quentin Goux, Juliette Bourquin, Maxime Prieur, Jonathan Brosard, Ferdinand Tchadji.

La responsabilité de l'équipe a été assurée par N. Lammari jusqu'en septembre 2021.

3.2.1. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

Les travaux menés au sein de l'équipe ISID sont centrés sur le thème fédérateur de l'ingénierie des systèmes d'information et de décision. L'enjeu scientifique est de concevoir des modèles, des méthodes, des techniques et des outils pour l'analyse et la conception des systèmes d'information et de décision. Les activités de l'équipe sont structurées sur la période autour de trois axes : *i*) le web sémantique, *ii*) la qualité des systèmes d'information, *iii*) les données massives et la décision.

Web sémantique : Grâce à son expertise reconnue, l'équipe a été invitée à participer à de nombreux projets dans des contextes très variés comme la sécurité, le bâtiment, la santé ou la musicologie pour lesquels elle a développé des ontologies originales, intégrant des concepts complexes comme la temporalité, l'incertitude.

Nous avons notamment développé une ontologie formalisant les concepts des domaines de la sécurité physique et cyber et leurs relations [[hal-03718365](#)], une ontologie du domaine de l'amiante [[hal-03722804v1](#)], de la mémoire de patients atteints d'Alzheimer [[hal-02465275v1](#)] ou encore de l'expertise des musicologues et de la notation musicale [[hal-02475753](#)]. Ces ontologies ont été couplées à des bases de règles-métier élaborées également par l'équipe avec l'aide des utilisateurs. Nous avons pu alors proposer des règles d'inférence ou des techniques d'extraction de connaissances.

Nous avons également travaillé sur l'enrichissement de graphe de connaissances en proposant des approches, basées sur des algorithmes d'apprentissage, pour trouver par exemple de manière semi-automatique, un ensemble de propriétés, pour un contexte d'identité donné, qui peuvent être propagées entre des entités contextuellement identiques [[hal-03031081](#)], ou encore une approche pour enrichir une base de connaissances à partir de documents textuels pour lesquels on extrait les entités et les relations que l'on lie (ou pas) à des données déjà présentes dans la base [[hal-03937780v1](#)]. Nous avons aussi travaillé sur l'enrichissement des graphes de connaissance avec des données temporelles imprécises et sur une approche basée sur une ontologie et la théorie de la logique floue permettant la représentation et le raisonnement sur des données temporelles et leurs relations précises et/ou imprécises [[hal-03233168](#)].

Qualité des systèmes d'information : L'équipe a développé une expertise sur l'élaboration de différents critères de qualité des SI et notamment des données, ainsi que leur évaluation.

Dans le contexte des données liées, nous nous sommes intéressés à définir des critères de qualité pertinents avec l'hypothèse du monde ouvert du Linked Open Data où les données et leurs schémas évoluent au gré des contributeurs. Les contributions principales ont adressé la complétude et la concision des données, deux critères importants qui nécessitent d'être gérés ensemble en assurant un équilibre qui impactera la qualité souhaitée pour le graphe de connaissances [[hal-02474469](#)].

Nous avons également travaillé sur la qualité des données historiques, par nature souvent imprécises et incertaines. Nous avons conçu un modèle générique de bases de données propographiques intégrant la notion d'incertitude [[hal-01966374](#)]. Nous avons proposé des méthodes d'extraction de l'incertitude dans les données sources [[hal-03843641](#)] et proposé des règles de propagation ainsi que d'agrégation de cette incertitude pour l'établissement d'hypothèses pour les historiens [[hal-02283278](#)].

Durant la crise de la COVID, nous avons été sollicités avec des membres de la communauté scientifique afin de proposer des clefs de lecture et de compréhension de la crise sanitaire. Dans cette recherche, nous définissons précisément la qualité des données dans le but de faciliter la production de données de qualité. Nous illustrons cette problématique de la qualité avec les indicateurs COVID puis nous proposons des voies de solution permettant d'améliorer cette qualité.

Afin d'améliorer la qualité des SI, l'équipe a également travaillé sur l'application de l'ingénierie des méthodes situationnelles qui représente la construction des méthodes adaptables aux contextes des projets à partir de l'ensemble de composants organisés [[hal-02471299](#)]. Enfin nous avons proposé des contributions originales pour améliorer la qualité des recommandations dans les réseaux sociaux en considérant des filtrages intelligents sur la diversité des recommandations ou sur les profils des utilisateurs et leur similarité avec d'autres utilisateurs [[hal-01679120](#)].

Données massives et décision : L'avènement des données massives a révolutionné la manière dont les entreprises prennent des décisions. L'équipe ISID a développé une expertise en modélisation et exploitation de BD massives à des fins décisionnelles.

L'équipe ISID a proposé une démarche globale, basée sur une architecture dirigée par les modèles (MDA), qui facilite et automatise le processus de transformation d'un modèle conceptuel en modèles physiques relatifs aux 4 familles NoSQL. L'équipe a aussi proposé une approche permettant de transformer un modèle multidimensionnel en modèle de graphes NoSQL [[hal-03615656](#)]. Notre approche assure le mapping automatique des schémas multidimensionnels en modèles de graphes NoSQL à l'aide d'un ensemble de règles définies entre le méta-modèle multidimensionnel et le méta-modèle de graphes NoSQL. Nous avons proposé également une approche pour la B.I. qui permet d'extraire, de transformer et de charger des sources NoSQL, orientées documents et qui détecte automatiquement des attributs de jointure entre plusieurs collections en l'absence des contraintes d'intégrité [[hal-02295340v1](#)].

L'équipe a également travaillé sur de la modélisation de comportement à des fins décisionnelles par exemple dans le contexte de la cyber-sécurité en recherchant des motifs d'attaques dans les journaux d'événements des systèmes informatiques. En s'appuyant sur un algorithme d'apprentissage artificiel guidé par une ontologie de la sécurité nous avons proposé une identification de motifs pour conduire à la reconstitution des modes opératoires des attaquants ou des fonctionnements des systèmes informatiques vis-à-vis de leurs propriétés de sécurité [[hal-02471081](#)]. Par ailleurs, il existe peu de méthodes d'aide à la décision permettant d'évaluer l'opportunité de recourir à des technologies émergentes. Nous avons proposé une démarche générique que nous avons instancié aux deux cas de la blockchain et de la découverte des données intelligentes (Smart Data Discovery) [[hal-02374087v1](#)].

Enfin, dans le contexte de l'industrie 4.0 nous avons appliqué des techniques d'apprentissage et des frameworks de comparaison des approches de la fouille des intentions dans le but de proposer des approches d'adaptation des processus aux technologies digitales [hal-03250113]. Par ailleurs le défi auquel sont confrontées les organisations est de développer des mécanismes de gouvernance des données et de l'information composés de politiques, de structures et de processus, y compris un système d'évaluation des performances. Nous avons proposé un cadre conceptuel qui facilite l'aide à la décision et l'évaluation. Notre approche prend en compte les dimensions valeur, risque et coût pour une meilleure appréhension de la valeur résultante. Cette contribution est fondée sur une approche multifacettes et multicritères.

3.2.2. Profil d'activités liées à la recherche

Les membres de l'équipe ISID sont reconnus et ont une longue expérience dans le domaine des systèmes d'information. Ils ont contribué aux méthodes et outils actuellement couramment utilisés dans ce domaine. Les recherches actuelles s'orientent sur la prise en compte de nouvelles technologies ou concepts comme l'apprentissage, les outils de gestion de données massives, l'incertitude, au plus tôt dans le processus de conception d'applications.

Activités (100 points répartis sur 7 items)	
Administration et animation de la recherche	10
Aide aux politiques publiques et expertise technique	05
Contribution à l'adossment d'enseignements innovants à la recherche	10
Dissémination de la recherche	20
Recherche et encadrement de la recherche	45
Valorisation, transfert, innovation	10
Autre activités	0

3.2.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Suivant les recommandations transmises lors de la précédente évaluation de l'HCERES, l'équipe ISID a recentré ses actions au niveau des publications. Ce recentrage résulte d'un choix d'équipe et aussi de l'implication des membres de l'équipe dans 3 projets importants à savoir les projets H2020 Safecare (modélisation des exigences et web sémantique), l'ANR Daphné (modélisation des exigences et qualité des données) et la collaboration avec AIRBUS (modélisation des exigences, qualité des données). L'équipe a ainsi ciblé des conférences et revues reconnues dans le domaine de la modélisation et de la représentation des connaissances (CAISE, ER, HICSS, RCIS), du web sémantique (ISWC, KSEM, KES) et des revues plus généralistes sur la représentation et gestion de données très reconnues comme DKE, EDBT, WISE, DEXA, SSDBM, ICDM...

Durant la période, l'équipe a pu, comme recommandé par la précédente évaluation, augmenter son nombre de thèses industrielles. Ainsi 4 doctorants CIFRE (Jonathan Debure 2018-2021 Airbus, Thamer Mecharnia 2018-2022 CSTB, Maxime Prieur 2022- ? Airbus, Ferdinand Tchadji 2022- ?) ainsi que deux doctorants financés par une entreprise (Amadou Fall Dia 2015-2017 ATOS, Jonathan Brossard 2021- ? Moabi) ont été accueillis par l'équipe.

Par ailleurs, le rapport précédent recommandait l'augmentation de l'implication des MCF de l'équipe dans l'encadrement des thèses. Cette recommandation a été suivie puisque sur les 12 thèses en cours en 2022, 8 ont impliqué un co-encadrement d'un membre non-HDR de l'équipe (les 4 autres sont des thèses CIFRE ou financées par une entreprise et impliquent un collègue non-HDR d'une autre équipe du laboratoire ou d'un autre laboratoire). Ainsi la totalité des permanents, et notamment tous les MCF non-HDR, sont impliqués dans la supervision de thèse avec pour objectif la rédaction d'une HDR dans les 2 prochaines années de 2 des 3 collègues MCF non-HDR.

L'équipe ISID a mis en place un séminaire interne qui fait intervenir des membres de l'équipe (permanents ou doctorants). Pour les intervenants extérieurs elle les invite lors des séminaires d'axe (donc multi-équipes).

3.2.4. Introduction du portfolio

Le portfolio de l'équipe est composé des éléments suivants :

- Revue internationale (IEEE Access, 2022) [[hal-03718442](#)]. Cet article, réalisé dans le cadre du projet Européen SAFECARE qui a impliqué plusieurs permanents et doctorants, décrit un framework pour les infrastructures critiques basé sur un modèle sémantique et sur un moteur de raisonnement pour anticiper la propagation des impacts des attaques cyber-physiques.
- Site de la plateforme du projet ANR Daphné : <https://daphne.ouestware.com/studium> (lien avant bascule sur HumaNum). Le projet ANR Daphné a impliqué plusieurs membres de l'équipe pendant 4 ans et le site permet de montrer une partie des résultats du projet notamment en instanciant un modèle de données intégrant la notion d'incertitude.
- Revue internationale (IEEE DKE, 2020) : [[hal-03024598](#)]. Cet article propose une typologie d'imperfection des données saisies par les patients Alzheimer (en raison des troubles de la mémoire causés par la maladie) ainsi qu'une méthode d'estimation de la crédibilité de chaque donnée saisie.
- Programme de l'école thématique CNRS MDD <https://cedric.cnam.fr/lab/confs/mdd2022/>. L'école thématique biennale "Masses de Données Distribuées" (MDD) pilotée par C. du Mouza est issue de la communauté des chercheurs en science des données. Elle permet d'exposer les thèmes fondamentaux pour la compréhension de l'évolution de notre domaine de recherche, et de préparer les doctorants à suivre ses évolutions.

3.2.5. Auto-évaluation de l'équipe

Domaine 3, production scientifique

D3 R1 – Production scientifique

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Reuves	216	86	58	19	11		
Conférences	74	162	70	14	103		
Chapitre						41	
Ouvrages						17	
Brevets							5
Logiciel							7

La production scientifique de l'équipe repose sur des fondements théoriques et méthodologiques solides.

La stratégie pour la production scientifique adoptée par l'équipe a été la suivante sur la période : 1) recentrer les publications sur les conférences et revues reconnues sur les thématiques de l'équipe, 2) privilégier les conférences et revues les plus sélectives, 3) autoriser des soumissions dans des conférences ou revues les plus reconnues même si elles sont non

classées ou mal classées pour les domaines émergents, par exemple les humanités numériques, pour lesquels peu de conférences et revues classées existent, 4) autoriser la soumission d'articles à des conférences ou revues moins reconnues pour des doctorants en première publication. L'équipe a continué d'avoir une forte présence au niveau national à travers ses publications dans des conférences ou revues. Il s'agit d'une volonté d'avoir la meilleure visibilité de nos travaux et notre expertise au niveau national et d'avoir un retour assez rapide de la communauté sur nos travaux.

Par ailleurs, l'équipe compte de nombreuses collaborations tant nationales qu'internationales, qui se sont traduites par de nombreuses publications ainsi que des projets de recherche. Au niveau national, l'équipe a publié avec des chercheurs des universités et écoles reconnues comme Sorbonne-Université, Panthéon-Sorbonne, Paris-Saclay, Université de Toulouse Capitole, ESSEC, ISEP, ... ainsi que des entreprises publiques ou privées de premier plan comme Airbus, Thalès ou IGN. Ses collaborations internationales, anciennes ou plus récentes ont conduit à la publication de travaux de recherche réalisés avec l'Université de Sfax (Tunisie), l'Université de Los Andes de Merida (Venezuela), l'Université d'Utrecht (Pays-Bas), San José State University (California, USA), l'Université de Salford (UK), Maastricht University (Pays-Bas), University of South Florida (USA), Georgia State University (USA), ...

D3 R2 – Production scientifique proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe et répartie entre ses personnels L'équipe a une bonne activité de publication sur la période avec une moyenne d'environ 10 publications par permanent sur la période. La moitié de ces publications sont de niveau Q1 ou Q2 ce qui montre un effort particulier de l'équipe à publier dans les conférences et revues les plus reconnues du domaine (voir fig. 3.4). Même s'il y a encore place à l'amélioration, on note une amélioration globale de la qualité des publications par rapport à la période précédente, résultant de la stratégie de publication mise en place et décrite précédemment.

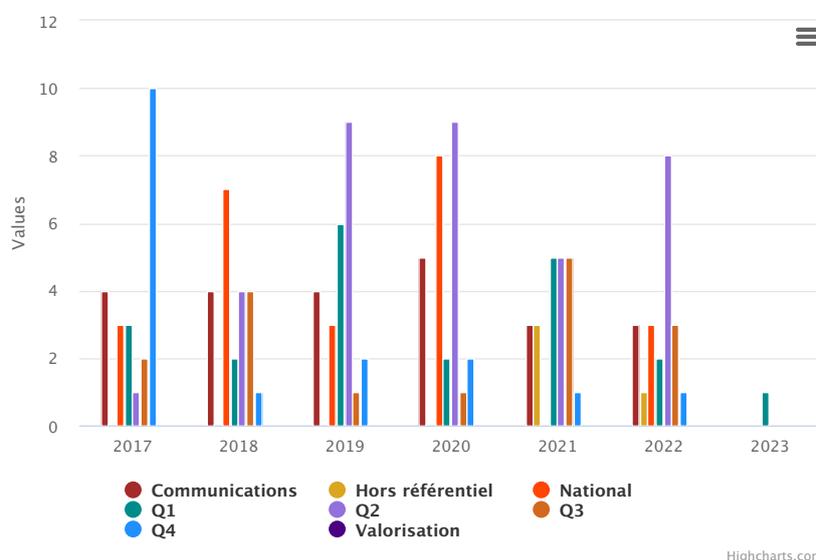


FIGURE 3.4 – Nombre de publications par catégorie

Si la moyenne de publications par permanent publiant est de 13,5 (avec une médiane de 9) témoigne d'une bonne activité de publication globale de l'équipe, il faut noter que la production scientifique n'est pas encore répartie de façon homogène entre les membres de l'équipe (voir Campagne d'évaluation 2023-2024 – Vague D

fig. 3.5). En effet 2 permanents ont une activité soutenue avec plus de 40 productions sur la période alors que 3 permanents en ont moins de 5. Il y a une explication néanmoins dans chaque cas : nouveau maître de conférences s'insérant dans l'équipe, collaboration industrielle, dans le cadre du projet européen SAFECARE et des autres projets de cyber-sécurité, avec des règles strictes de sécurité conduisant à des délais de publications très importants, congés maternité, etc. De plus les jeunes maîtres de conférences encadrent peu/pas de thèses. La situation a évolué sur tous ces critères et la production scientifique devrait être beaucoup plus homogène sur la prochaine période.

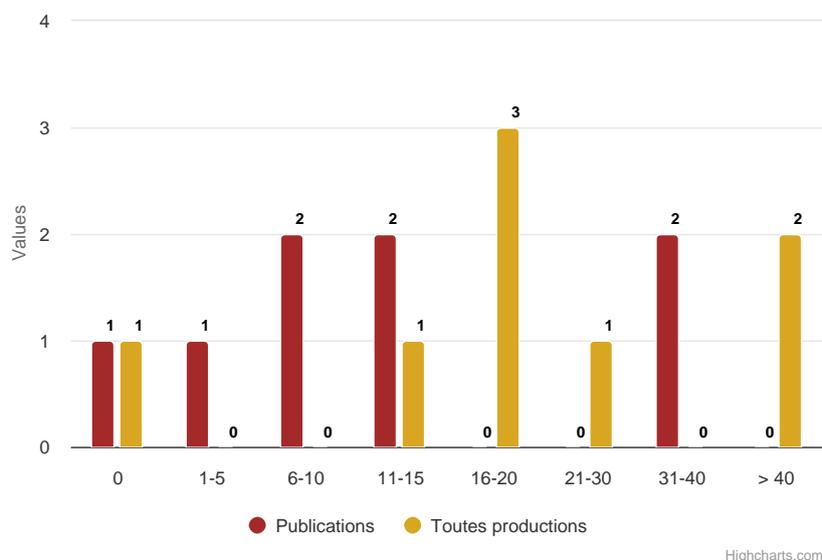


FIGURE 3.5 – Nombre de publications par permanent

Les doctorants et post-doctorants sont très fortement impliqués dans la production scientifique de l'équipe. Ainsi près de 50 publications sur la période impliquent un doctorant ou un post-doctorant. Chaque doctorant a co-écrit au minimum 3 publications lors de sa soutenance (moyenne de 4,5 par doctorant).

Pour accompagner les jeunes chercheurs, l'équipe a généralisé le co-encadrement de thèses. Par ailleurs, ils sont impliqués dans les projets de recherche internes au laboratoire de collaboration entre équipes, ainsi que dans les projets nationaux publics (comme les ANR) ou industriels.

Domaine 2, attractivité

Invitations dans des institutions académiques ou des congrès internationaux . L'équipe ISID a participé au programme d'échange ERASMUS entre le CNAM et l'Université de Carthage en 2022 (enseignement et recherche) dans lequel nous bénéficions de 3 bourses pour financer une mission du 27 au 31 mars 2022 (F. Atigui) à l'Institut National des Sciences Appliquées de Tunis (INSAT), une mission d'une semaine, qui aura lieu en 2023, pour accueillir Sonia GABBOUJ, Professeure à l'Université de Carthage et pour accueillir un doctorant au CNAM durant 4 mois en 2023. E. Métais a présenté "Le potentiel de la technologie" aux rencontres "Comment réussir une société de longévité", en octobre 2018, à Paris. Cette conférence invitée était à destination des députés de l'Assemblée nationale, afin de leur apporter un éclairage scientifique sur les solutions à apporter au vieillissement de la société.

J. Akoka a organisé une table ronde sur les indicateurs de pilotage de la COVID-19, 2021.

Organisation de congrès internationaux majeurs et participation aux comités scientifiques de ces manifestations

L'équipe ISID a co-organisé plusieurs conférences internationales reconnues sur la période : la conférence IEEE ICDE (Core A+, 500 participants) en 2018, la conférence on Natural Language & Information Systems (NLDB) en 2018 et 2019, de l'atelier ISESL de la conférence CAISE en 2020 et 2022 et Journées du consortium européen Heloise (European Network on Digital Academic History, <http://heloise.ish-lyon.cnrs.fr/>), 2022. Elle a organisé également des événements au niveau national : l'atelier de la conférence INFORSID SI et Humanités Numériques en 2018 et 2022. Par ailleurs elle a également pris part en tant que general ou program committee chair dans des conférences internationales comme EDOC'2019, RCIS'2021, NLDB'2018, 2019 et 2022, IEEE ICC'2019, CBI'2021, et chair pour des tracks de ER'2017 et 2019, CAISE'2020, CBI'2021, etc.

Participation aux comités de programme de conférences et aux comités scientifiques de revues.

L'équipe ISID est reconnue pour son expertise et cela se reflète dans son implication dans de nombreux comités de programme de conférences et comités de rédaction, tant au niveau international que national. En effet, les membres de l'équipe ont été régulièrement sollicités pour participer à des comités de programme de conférences de renom tels que DESRIT, ICIS, DEXA, NLDB, DBKDA, ADBIS, BDA, RCIS, CBI, EGC, etc, ainsi que des comités de lecture de revues prestigieuses comme DKE, Information Systems Journal (IJ), Information System (IS), Revue Ouverte d'Ingénierie des Systèmes d'Information (ISI), BISE,KAIS, etc.

Responsabilités éditoriales dans des revues et des collections de haut niveau.

L'équipe ISID a eu plusieurs responsabilités éditoriales sur la période, notamment le rôle de Rédacteur en Chef Adjoint de Data and Knowledge Engineering Journal (DKE) ou l'appartenance au comité de rédaction des revues International Journal On Advances in Software, Computers (MDPI) et Applied Science, Ingénierie des Systèmes d'Information (ISI), Journal of Database Management (JDM). Par ailleurs elle a piloté plusieurs numéros spéciaux pour les revues DKE, Enterprise Computing, Inf. Syst. et ISI, et a été en charge de l'édition des actes de plusieurs conférences comme NLDB chaque année, la conférence Research Challenges in Information Science RCIS (2021), la conférence IEEE International Conference on Business Informatics CBI (2019).

Participation à des instances de pilotage de la recherche et d'expertise scientifique.

L'équipe ISID est régulièrement sollicitée pour réaliser des expertises auprès de l'ANR, de l'ANRT ou encore pour l'évaluation de dossiers de crédit d'impôt recherche (CIR). Plusieurs de ses membres sont aussi membre de comités d'experts au niveau national (ANR, Univ. de Franche-Comté, Région Centre-Val de Loire) comme au niveau international (Conseil de la Recherche Roumain, STIC Amsud, Univ. Zayed de Dubaï). Par ailleurs E. Kornyshova est membre du CNU Section 27 depuis 2022 et C. du Mouza du comité de pilotage de la communauté Gestion de Données — Principes, Technologies et Applications (BDA) et est responsable pédagogique et d'organisation de l'école thématique biennale CNRS Masses de Données (MDD).

Prix, distinctions. J. Akoka a été nommé ER Fellow Award en 2021
N. Lammari et C. du Mouza ont été promus MCF Hors Classe par le CNU
4 membres de l'équipe sont récipiendaires de la PEDR

D2 R2 Attractivité

Post-docs, doctorants. Les membres de l'équipe ISID ont encadré ou co-encadré 23 thèses sur la période dont les financements sont répartis comme suit : 4 ont obtenu une bourse ministérielle, 3 une bourse de co-tutelle, 4 une bourse CIFRE, 1 une bourse du CNAM, 9 un financement par un CDD avec une entreprise, 1 une bourse de l'IGN et enfin 1 un financement d'une autre université (co-encadrement Paris 1). A cela s'ajoute 3 postdoctorants et deux ingénieurs de recherche.

Chercheurs et enseignants-chercheurs invités de renom. Judith Barrios (Univ. de Los Andes de Merida, Venezuela) a été invité 3 fois 1 mois sur la période 2017-2022, Sjaak Brinkkemper (Univ. d'Utrecht, Pays-Bas) et John Murray (San José State Univ., USA). Par ailleurs l'équipe ISID a invité pour un séminaire et des échanges Nathalie Aussenac-Gilles (IRIT-Univ. Paul Sabatier), Pierre Mounier-Kuhn (CNRS, Sorbonne Univ. et CentraleSupélec) et Alan Hevner (Univ. of South Florida).

Accueil, environnement et encadrement de qualité pour les post-docs, doctorants, chercheurs et enseignants-chercheurs. Un grand nombre de doctorants et post-doctorants ont été recrutés et financés dans un contexte de projet national ou international, de recherche fondamentale ou appliquée ce qui leur a permis d'avoir un cadre bien défini pour leur recherche et de bénéficier de la collaboration de plusieurs permanents de l'équipe et de ses ressources, ainsi que d'avoir l'opportunité d'échanger avec d'autres chercheurs nationaux ou internationaux. Il y a eu également sur la période plusieurs doctorants en CIFRE ou en CDD en entreprise, pour qui, en plus du double encadrement (1 ou 2 membres de l'équipe, plus une personne de l'entreprise), nous disposons d'un financement pour l'achat de matériel et de missions dans le cadre de la thèse. Par ailleurs tous les non-permanents ont pu disposer de bureaux et des ressources de l'équipe. L'équipe dispose principalement de 2 bureaux pour ses doctorants ce qui leur permet notamment d'échanger sur leurs thèmes de recherche. Une journée doctorale a lieu tous les ans afin de présenter et d'échanger sur le sujet et les avancées de chaque doctorant et post-doctorant.

Succès aux appels à projet. Sur la période l'équipe a été impliquée sur de nombreux projets de recherche théorique ou appliquée, avec des partenaires du public comme privé, en France et à l'international. Ces projets ont porté essentiellement sur deux grands domaines applicatifs traduisant l'intérêt fort de l'équipe pour ces sujets au cours de la période : la cyber-sécurité et les humanités numériques. Pour la cyber-sécurité, l'équipe a été impliquée sur le projet européen H2020 SafeCare (2018-2021) ainsi que sur 4 projets nationaux, FUI Huma (2017-2019), ANR CoRRéau (2022-2025), BPI ARC (2022-2025), projet KirrK (2022-2025), avec un rôle de coordinateur pour les 2 derniers. Le thème des humanités numériques a également conduit à plusieurs projets dont l'ANR Daphné (2017-22), un projet CNRS MASTODONS QUALHIS (2017) et un projet inter-équipe du laboratoire Humanum (2021), tous avec un rôle de coordinateur. En plus de ces 2 thèmes, l'équipe a eu un certain nombre de projets avec des entreprises (2 projets de collaboration avec Airbus ainsi que 2 thèses Cifre) ou établissements publics (projet de collaboration avec l'IRSN (2021-2023), Micro projet du labex CAP (2015-2017)).

Domaine 4 inscription des activités de recherche dans la société

L'équipe ISID réalise une recherche fondamentale et industrielle sur des sujets d'importance sociétale comme :

- en cybersécurité, avec la sécurité pour les infrastructures critiques de santé
- en santé, avec le travail sur l'élaboration d'une prothèse de mémoire pour les malades atteints d'Alzheimer
- en humanités numériques, avec notre recherche sur la représentation de l'incertitude et l'extraction d'hypothèses dans les données historiques
- en interaction homme/machine avec la modélisation de la prise en compte du contexte et du profil utilisateur

Ces différentes recherches ont permis d'établir des relations partenariales avec de grandes entreprises comme Airbus notamment sur des aspects cybersécurité (projet H2020 Safecare, projet FUI, 2 thèses CIFRE, prestation d'audit des processus métiers) mais également avec des PME comme ALEKSO et KIRK en cybersécurité (respectivement pour un projet de recherche collaborative) ou encore la qualité des données avec Kwanko (thèse sur CDD) ou le Web sémantique avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB, thèse co-encadrée) ou l'IGN (thèse co-encadrée).

3.2.6. Trajectoire de l'équipe

Le Web sémantique, la qualité des données et la modélisation des outils d'aide à la décision sont des domaines de recherche importants en informatique. Ils visent à améliorer l'efficacité et la précision des systèmes d'information en utilisant des techniques avancées pour représenter, traiter et analyser les données. Les membres de l'équipe ISID ont développé une expertise reconnue dans ces domaines, mais de nouvelles techniques sont apparues récemment, telles que l'apprentissage, les techniques NoSQL et l'incertitude. Il est donc important d'explorer comment intégrer ces nouvelles techniques pour améliorer la recherche dans ces domaines.

Les algorithmes d'apprentissage peuvent aider à améliorer la recherche sémantique, par exemple en découvrant des relations complexes entre les entités comme des synonymes, des antonymes ou des relations de hiérarchie entre les concepts. Ils permettent aussi la classification de données, la détection de changements dans les données et leur représentation, la recommandation de contenus, l'élaboration de profils et la prédiction de tendances.

Les bases de données NoSQL sont adaptées au stockage et à la gestion de données complexes et hétérogènes comme par exemple les vastes collections de données RDF en Web sémantique. Elles peuvent être utilisées également pour la validation et la gestion de la qualité des données. Dans un contexte Business intelligence les bases de données document NoSQL permettent de stocker des données semi-structurées et de les analyser à l'aide d'outils d'agrégation et de requête avancés. Elles sont de plus adaptées au stockage de données historiques et peuvent être utilisées pour la mise en place de solutions de Data Warehouse avec performances de lecture élevées pour les analyses ad hoc.

L'incertitude peut affecter la qualité des données et leur utilisation et est donc un verrou dans de nombreux domaines de recherche. Les données peuvent être incertaines en raison de problèmes tels que l'ambiguïté, l'imprécision ou l'incomplétude. Les approches de gestion de l'incertitude comprennent la vérification de la qualité des données, la fusion de données, l'enrichissement de données et la gestion de la provenance des données. Les domaines de la cyber-sécurité, des humanités numériques et de santé sont particulièrement concernés par cette problématique et nous envisageons de continuer nos travaux sur la modélisation et la prise en compte de l'incertitude dans ces contextes par exemple.

L'intégration de ces nouvelles techniques et problématiques permet de compléter et enrichir nos travaux sur le Web sémantique, la qualité des données et la modélisation des outils d'aide à la décision et cela pourrait être appliqué dans de nombreux domaines, tels que l'industrie 4.0, la santé, la sécurité et les sciences sociales, qui sont des domaines dans lesquels s'inscrivent une large part des travaux récents de l'équipe, notamment via des collaborations académiques et/ou industrielles.

Matrice SWOT

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> — Expertise technique solide dans le domaine des SI et notamment du Web sémantique, de la qualité des SI et de l'aide à la décision — Capacité à collaborer avec des partenaires externes académiques comme industriels — Publications régulières dans des conférences et revues prestigieuses 	<ul style="list-style-type: none"> — Temps limité pour travailler sur des projets en dehors des obligations d'enseignement, notamment avec des charges administratives de plus en plus lourdes — Manque de personnels administratifs et d'ingénieurs pour pouvoir porter des projets ambitieux comme des projets européens
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> — Les avancées technologiques dans les bases NoSQL et en apprentissage offrent de nouvelles opportunités de recherche dans le domaine des systèmes d'information — Les domaines sur lesquels l'équipe travaille (cyber-sécurité, humanités numériques, santé, industrie 4.0) sont de part leur fort impact sociétal en plein essor — Possibilité de participer à des appels d'offres publics ou privés pour obtenir des financements et des doctorants supplémentaires car l'expertise de l'équipe très recherchée — Le bon taux de co-encadrement de doctorants et de publications des MCF non-HDR laisse prévoir des soutenances d'HDR de 2 membres de l'équipe prochainement 	<ul style="list-style-type: none"> — Difficulté à obtenir des financements publics dans un contexte économique difficile — Risque de perdre des membres HDR et des départs à la retraite prochainement

3.3. Autoévaluation de l'équipe ILJ

Composition de l'équipe

Permanents	
Responsable	Guillaume Levieux
Emérites	Stéphane Natkin.
Profs Cnam	Axel Buendia.
Profs Université	Pierre Cubaud.
MCF	Guillaume Levieux, Jérôme Dupire (HDR), Stéphanie Mader.
Ingénieurs	Viviane Gal.
PAST	Antonin Fourneau.
Non permanents	
Associés	Isabelle Barbet.
Doctorants	Tristan-Gael Bara, Chloé Vigneau, Axel De Conti, Elise Lincker, Noemie Kempa.

3.3.1. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

L'équipe ILJ effectue des recherches centrées sur les problématiques d'interaction humain / machine, avec le jeu vidéo comme principal tropisme. Plus particulièrement, nos recherches abordent la théorie du game design, les systèmes d'adaptation et de génération automatique de contenu et l'accessibilité, avec une ouverture vers l'interaction humain machine dans un sens plus large.

Théorie et outils du game design : Cette thématique porte sur l'étude et la conception d'outils conceptuels et informatiques pour le design des média interactifs numériques au sens large et des jeux vidéo en particulier. Nos recherches portent tout autant sur des applications de pur divertissement que sur des usages plus spécifiques tels que les jeux thérapeutiques ou éducatifs. Plus spécifiquement, il s'agit d'étudier certaines propriétés du gameplay, boucle d'interaction fondamentale, et de sa variation dans le temps au travers de la difficulté, du rythme ou de la narration. Cette étude se conçoit principalement dans son impact sur le joueur / interacteur, ainsi que du point de vue du designer, dans l'étude des outils et méthodes qui permettent de l'élaborer. Durant ces dernières années, nous avons étudié un des paramètres majeurs des jeux vidéo, le niveau de difficulté, et son évolution dans le temps. Nous avons par exemple démontré qu'un lien fort existe entre la confiance du joueur et l'adaptation automatique du niveau de difficulté d'un jeu [[hal-01678476](#),[hal-02141897](#)]. Egalement, au travers d'un partenariat avec Ubisoft, nous avons pu mettre au point un algorithme d'évaluation de la difficulté sur des données temporelles de grande taille, et démontré, sur deux productions Ubisoft, le lien entre le temps jeu total des joueurs et la difficulté à laquelle ces joueurs avaient été soumis [[hal-02436676](#)]. Dans le cadre du projet Dysapp, un projet de jeu santé visant à aider à la détection et l'entraînement des élèves Dyspraxiques du second cycle, nous avons pu évaluer l'impact de différentes formes de courbes de difficulté sur la motivation des joueurs, et montré l'impact de leur rythme sur la durée de jeu [[hal-03847459](#)]. Au-delà de la confiance ou de la motivation, nous avons étudié le comportement du joueur et notamment sa variabilité face à plusieurs variations d'un même gameplay, ici Tetris [[hal-02456200](#),[hal-02456200](#)]. Nous poursuivons également une activité centrée sur la méthodologie de conception des jeux vidéo. Nous avons dans ce cadre proposé un modèle de conception et plusieurs templates, permettant l'enseignement d'une partie du programme de seconde générale au travers d'activités de création de jeu vidéo [[hal-03726368](#),[hal-03726343](#)].

Adaptation et Génération Automatique : Une partie des travaux de l'équipe se concentre sur l'adaptation et la génération de contenu pour le jeu vidéo. Tout d'abord, la thématique précédente a montré que certaines de nos études se concentrent sur l'impact d'une variable de gameplay comme la difficulté sur le comportement du joueur. Une fois mise en évidence ce type de relation, et d'un point de vue expérimental pour être capable d'étudier cette relation, il est intéressant et nécessaire d'être en mesure d'influer sur ces variables. La difficulté, par exemple, est généralement manipulée au moment du design des différents niveaux du jeu, de manière itérative et empirique. Une autre approche consiste à s'appuyer sur un algorithme capable d'évaluer la difficulté et de la faire varier pour atteindre une valeur cible, clairement définie. Nous avons développé un algorithme de ce type pour le projet Dysapp, capable d'adapter la difficulté de certains types de jeu avec un temps de jeu très réduit [[hal-02436725](#)]. Une autre variable de l'expérience joueur à laquelle nous nous intéressons est le niveau de curiosité du joueur, que nous cherchons à maximiser. Pour cela, le contenu du jeu doit être renouvelé au maximum. Les algorithmes de génération de niveau peuvent permettre d'atteindre en partie cet objectif, à l'exécution, pour certains types de jeu, ou offrir des outils capables d'alimenter le travail des designers. Nous avons exploré la génération de niveaux pour le projet UnitedVR, dont l'objectif est de mettre au point un jeu de type FPS, donc de tir à la première personne, en réalité virtuelle et multijoueur regroupant différents sites, et le projet KIWI, centré en partie sur les méthodes de génération pour le jeu vidéo. Nous avons pu y développer un algorithme de génération procédurale de niveaux alliant approche évolutionnaire et satisfaction de contraintes, qui cherche à maximiser la variabilité perçue des niveaux générés [[hal-03770729](#), [hal-03807178](#)]. L'inconvénient d'un tel algorithme réside cependant dans son temps d'exécution, et nous avons donc mis en place une collaboration avec l'équipe VERTIGO pour explorer l'application de méthodes d'apprentissage à la génération de niveau, notamment au travers d'algorithmes focalisés sur la diversité [[hal-03678280](#)]. Cette thématique est fortement liée à la thématique précédente : un algorithme de génération ne saurait opérer sans un système d'évaluation de contenu, et donc de prédiction de l'expérience joueur. Nous avons pour cela proposé un modèle basé sur la simulation et l'analyse des dynamiques de jeu, de manière à mieux formaliser l'évaluation d'un niveau généré [[hal-03847511](#)]. Au delà de la génération de niveaux, nous effectuons également des recherches sur la génération temps réel d'animations, avec par exemple l'objectif d'apporter une certaine coloration émotionnelle à une animation existante [[hal-03899236](#)].

Accessibilité : Une partie des recherches d'ILJ peut être examinée sous l'angle de l'accessibilité numérique, et en particulier de celle des jeux vidéo. Cette thématique est une extension naturelle des deux axes précédents. Tout système de génération ou d'analyse de jeu vidéo cherche à modéliser le joueur pour comprendre ses capacités et motivations et s'en inspirer pour générer ou adapter le contenu du jeu. L'accessibilité offre un regard particulier sur cette problématique, en explorant le continuum des capacités du joueur sous le prisme du handicap. Le projet Dysapp a ainsi permis la création des modèles présentés précédemment en abordant l'adaptation de la difficulté pour un public dyspraxique : le jeu développé devait proposer des activités particulièrement complexes pour ce type de public afin d'offrir une capacité de détection et un entraînement maximal, tout en conservant un confort de jeu et en offrant une activité valable pour l'ensemble de la classe. Il est également nécessaire de mettre en place les aspects méthodologiques du design de jeux plus accessibles afin de permettre à l'industrie vidéoludique d'effectuer les adaptations nécessaires [[hal-03112338](#),[hal-03697441](#)] et d'effectuer des recherches sur la pertinence de différentes méthodes d'interactions pour ce type de public [[hal-03855181](#)]. Egalement, il peut être particulièrement intéressant de se poser la question non pas de l'adaptation du gameplay à une population en situation de handicap, mais de son inclusion dès la phase de design. Par exemple, nous avons proposé une mé-

canique de jeu s'appuyant sur un chien guide, permettant d'inclure dans l'expérience globale de jeu un public n'ayant pas les capacités nécessaires pour traiter efficacement le challenge visuo-moteur central propre à un jeu de type FPS [hal-02456188].

Interaction Humain Machine : Si les recherches menées au sein d'ILJ peuvent avoir une forte coloration vidéoludique, elles n'en restent pas moins connectées à un champ d'étude plus large, celui de l'interaction humain machine. Certaines de nos recherches peuvent ainsi être focalisées sur un dispositif d'interaction, hors d'un champ d'application spécifique, ou à l'inverse porter sur un champ d'application plus large. Pour la création musicale, nous avons étudié un système d'interaction co-localisé pour une forme de composition collaborative favorisant l'engagement de l'utilisateur [hal-01596000], et proposé un système de création musicale en AR/VR [hal-03183302]. Nous avons proposé, dans le cadre d'une collaboration sur le projet européen ViDock porté au CNAM par le laboratoire GBCM³, une méthode de sonification de la surface d'une protéine [hal-02922706]. Nous avons également réalisé un prototype d'outil de visualisation pour un grand corpus de correspondances numérisées [hal-03788227], et proposé un système de reconnaissance d'objets 3D pour la maintenance industrielle en réalité augmentée [hal-03611407,hal-03324093]. Nous avons exploré des méthodes d'affective computing, utilisant des capteurs physiologiques pour évaluer l'expérience joueur [hal-03724911]. Pour finir, nous avons proposé des guidelines de conception et mis au point un système en réalité étendu proposant des stratégies sensorielles pour la prise en compte des troubles de l'autisme chez l'enfant [hal-03817662,hal-03817642].

3.3.2. Profil d'activités liées à la recherche

Activités (100 points répartis sur 7 items)	
Administration et animation de la recherche	15
Aide aux politiques publiques et expertise technique	5
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	5
Dissémination de la recherche	10
Recherche et encadrement de la recherche	60
Valorisation, transfert, innovation	5
Autre activité	0

3.3.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Le rapport précédent portait sur l'équipe MIM, dont est issue ILJ. Une première remarque portait sur le fait que les deux axes principaux de l'équipe MIM, *interaction humain machine* et *conception des systèmes embarqués pour l'intelligence ambiante* semblaient assez distincts. Cette remarque était en effet pertinente, et la richesse et la diversité de chacun des axes ont permis la création de deux équipes, intégrées aux axes du laboratoire. Chaque équipe gagne ainsi en clarté, l'écosystème du laboratoire est plus lisible, sans que les collaborations en souffrent, le laboratoire menant une politique active d'incitation à la collaboration inter-équipes.

Un autre recommandation portait globalement sur un effort à poursuivre concernant le niveau des publications journal. D'une manière générale, nous nous efforçons de publier dans les conférences et journaux les plus sélectifs, tout en maintenant une visibilité dans les conférences les plus axées sur nos thématiques. Notre équipe présente en effet une forte coloration jeu vidéo, et les conférences et journaux Q1/Q2 sont en général issus d'un domaine plus large, comme l'interaction humain machine ou l'intelligence artificielle. Lorsque nos travaux ont adressé plus particulièrement ces communautés, nous avons donc effectivement pu participer à ces conférences ou journaux (22 publications Q1/Q2 dans la période). Egalement, nous

maintenons un flux de publication vers des conférences considérées comme moins sélectives, mais dont l'alignement plus marqué avec nos thématiques permet un autre type d'échange, tout aussi fructueux.

Pour finir, le rapport précédent mettait en avant la baisse du nombre de permanents, notamment lié à la retraite d'un permanent cadre et au décès d'un MCF. Au cours de la période, nous avons pu recruter un Professeur CNAM qui assure le remplacement du permanent cadre et une MCF. Une MCF a obtenu une mutation à la fin de la période, et nous avons obtenu un recrutement de MCF en session synchronisée pour la rentrée prochaine. Nous avons donc finalement un effectif constant, maintenu une forte dynamique, dans une période de transition. La période qui s'annonce devrait bénéficier fortement de la dynamique construite pendant cette période, et nous espérons pouvoir maintenir un effort de recrutement.

3.3.4. Introduction du portfolio

Notre portfolio contient deux publications Q1 appartenant respectivement aux thématiques *Théorie et outils du game design* [[hal-02141897](#)] et *Adaptation et Génération Automatique* [[hal-03770729](#)]. Le portfolio contient des éléments descriptifs de l'ordinateur à billes décrit dans la partie trajectoire, symbole du type de recherches propres à la thématique *Interaction Humain Machine*. Pour finir, nous avons également inclus une présentation du projet DysApp, qui présente une vision plus imagée d'un échantillon des recherches effectuées pour la thématique *accessibilité*.

3.3.5. Production Scientifique

Notre équipe effectue des recherches en design, techniques, méthodes, systèmes et algorithmes pour l'interaction en général et le jeu en particulier. A ce titre, plusieurs types de publications peuvent être adressés, en reposant toujours sur des fondements théoriques et méthodologiques solides. Nos publications sont sélectionnées par des conférences et journaux scientifiques reconnues, et donc évaluées par des pairs, ce qui en soi valide la méthode de production tout autant que la production elle-même. Cependant, nous pouvons ajouter que, notre domaine de recherche étant particulièrement proche de l'utilisateur, une grande partie de notre travail consiste à évaluer expérimentalement l'impact de nos recherches. Il est donc, pour ILJ, nécessaire de produire des systèmes ou algorithmes pertinents du point de vue théorique tout autant que de mettre en place des expérimentations rigoureuses qui permettent d'en évaluer l'effet produit sur l'interacteur / joueur.

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Reuves	4	1	2	1	0		
Conférences	7	11	2	1	18		
Chapitre						1	

Au cours de la période, l'équipe ILJ a publié 23 articles de recherche classés en catégorie Q1 / Q2, sur 48 articles au total, et a également effectué 21 communications en conférence. Nous avons obtenu un *Reviewer's Choice Award* [[hal-01678476](#)] et un *Best Work In progress Award* [[hal-03847457](#)]. Cette production est à répartir entre 7 des 9 permanents d'ILJ. Les deux permanents non-publiants sont un professeur émérite n'étant plus impliqué dans de larges projets de recherche depuis 2018, et un PAST arrivé dans l'équipe en 2021 dont l'activité de recherche se met en place. Les doctorants et post doctorants sont largement impliqués dans ces publications : la grande majorité des publications Q1/Q2 impliquent des doctorants et post-doctorants, la plupart du temps en premier auteur.

3.3.6. Attractivité

Rayonnement scientifique

- Collaboration avec univ. Stockholm (Suède) / Thomas Westin (Accessibilité numérique / interactions visuelles)
- Chercheuse invitée au TAG Lab (Concordia University, Montréal, Canada) avec conférence invitée « Games as Research » et table ronde méthodologies de recherche en game design - 2018
- Membre élu au conseil d'administration du cluster Cap Digital, représentant le Cnam depuis 2018.
- Participation aux groupes de travail GAIAX autour de la souveraineté numérique européenne notamment au niveau des outils numériques d'enseignement.
- Co-responsable scientifique, participation au montage d'une recherche-action pour la création de jeux pédagogiques par des enseignants du secondaires (2021 - 2022)
- Membre du comité d'organisation IHM'22 (conférence francophone d'interaction humain-machine) à Namur, Belgique (avril 2022) : Co-responsable des ateliers de la conférence avec Julie Henry (Univ. Namur).
- Organisation et co-animation de la partie sonore de l'école chercheur Ouïe-MO du réseau Matière Organique soutenue par l'INRAE, le CNRS et plusieurs autres laboratoires et instituts.
- Participation à la construction d'un réseau francophone international des laboratoires de recherche en jeux vidéo (Franjeu) - 2018
- Revue d'articles : Entertainment Computing, Colloque international « Les langages du jeu vidéo », Science du jeu.

Attractivité

Thèses portées par ILJ :

- Thèse ANR Noemie Kempa (Debut 2022, en cours) : Accessibilité des Manuels Scolaires Numériques (ANR MALIN).
- Thèse ANR Elise Lincker (Debut 2022, en cours) : Extraction et enrichissement de contenu multimodal : Application au cas des manuels scolaires (ANR MALIN).
- Thèse Chloé Vigneau (Debut 2020, en cours) : Améliorer l'apprentissage grâce à la création de jeux vidéo en classe. Propositions pour le développement d'un moteur de jeu scolaire dédié à l'enseignement secondaire.
- Thèse CIFRE Kévin Colombier (2017-2019) : En partenariat avec l'équipe Optimisation Combinatoire. Réalisation d'un système de planification plus humain et moins parfait que les systèmes actuels.
- Thèse Raphael Bailly (Projet Kiwi) (2019 - 2022) - Génération procédurale de niveaux de jeu alliant approche constructive et optimisation
- Thèse William Rao Fernandes (Projet DysApp) (2018-2022) - Etude des courbes de difficulté dans les jeux vidéo avec forte variabilité du niveau des joueurs et une faible quantité de donnée

Succès aux appels

Au cours de la période, ILJ a obtenu 12 projets financés, consultables en annexe, pour un budget total d'environ 1400K€. La grande majorité de ces projets ont une coloration jeux vidéo : UnitedVR traite des jeux en réalité virtuelle et à distance (200K€) et Kiwi (150K€) de génération procédurale de niveaux, avec pour partenaire industriel principal Ubisoft. Le projet DysApp (150K€) traite quant à lui de jeux vidéo pour le dépistage et l'entraînement d'élèves dyspraxiques, et l'ANR DSTRESS (150K€) de jeu vidéo VR pour la détection de stress post traumatique. Le RFSI Tetris (70K€) nourrit un projet d'analyse plus théorique du comportement du joueur et de l'interprétation du gameplay, et le RFSI Chien Guide Virtuel une approche de l'accessibilité des jeux vidéo comme partie intégrante de la conception du gameplay, le projet SAXV aborde l'aide offerte par le jeu vidéo pour l'entraînement sportif (rugby), le projet PIA Consultation Médicale Virtuelle (65K€) qui porte la conception d'un jeu sérieux de formation des étudiants en médecine aux bonnes pratiques d'entretien. Les autres projets abordent l'interaction humain machine de manière plus générale. Du point de vue de l'accessibilité, avec l'ANR malin (450K€) qui développe une adaptation automatique des manuels scolaires pour les élèves en situation de handicap, JENII (120K€) qui se focalise sur l'apprentissage à distance en réalité virtuelle, et les DIM RFSI AudioXR4TSA (10K€) et AudioRV-NSU (10K€), qui étudient la réalité mixte et virtuelle audio pour la réhabilitation de patient autistes ou souffrant de négligence spatiale unilatérale.

Inscription des activités de recherche dans la société

- Relation suivie avec plusieurs partenaires industriels, notamment au travers des appels à projet.
- Conseil scientifique de l'Education nationale – GT Ecole inclusive et élèves en situation de handicap, GT Jeux Vidéo de l'assemblée nationale, GT DINUM accessibilité numérique (préparation CNH 2023)
- Co-créditation, participation aux réunions de travail du Groupe de Travail Numérique : Utilisation de la création de jeux vidéo comme support d'apprentissage au collège et au lycée.
- Membre du Think Tank « Pratiques numériques » d'Action Innocence (Genève, Suisse) sur l'observation des usages et pratiques du numérique chez les enfants et adolescents (2016-2021).
- Conférences grand public avec chaire Jeu Vidéo de l'école polytechnique : « Le jeu vidéo pour favoriser l'inclusion des personnes handicapées », « La génération procédurale de contenu au service de l'expérience du joueur » 01/04/21
- Co-Organisation de la 15ème réunion du GT IA des Jeux au CNAM. Journée de conférences / table ronde, ouverte au grand public, 12/01/2023.
- Organisation chaque année des *Enjminales* : cycle de conférences spécialisées sur le thème de la production et du design des jeux vidéo
- Organisation du Séminaire "Médias créatifs : une vision prospective" dans le cadre de Confluence Creative, un projet de coopération franco-mexicain financé par l'Agence Française de Développement (AFD).
- Co-responsabilité de la conférence RES#2.
- Présidence de l'association CapGame, spécialisée dans l'accessibilité des jeux vidéo.
- Accompagnement de la mise en accessibilité des productions de jeux vidéo (crédité en 2022 sur Deathloop (Arkane) et SIFU (Sloclap))

- Activité de formation : Ecoles de jeux vidéo (ISART, Rubika, IIM, ENJMIN), Instituts de formation des ergothérapeutes (IFE Berck-Loos), professionnels (jeu vidéo, médico-social, culture)
- Organisation récurrente de Game Jams : Global Game Jam à l'ENJMIN (Chaque année) et Digital Art Jam avec le Centre Pompidou (Trois éditions 2017 - 2019). Diffusion des méthodes de design et de création de jeu au grand public.

3.3.7. Trajectoire de l'équipe

SWOT

Forces	Faiblesses
Thématiques de recherche bien identifiées couvrant différents domaines de l'interaction et du jeu vidéo. Travaux collaboratifs au niveau de l'équipe et du laboratoire. Nombreux projets de recherche impliquant des partenaires industriels.	Les recherches centrées sur les jeux vidéo restent relativement récentes et la communauté, en particulier française, est encore peu structurée autour de ces questions. Les efforts de création d'une communauté autour du <i>GT IA des Jeux</i> (AFIA/ GDR RADIA) semblent à ce titre particulièrement intéressants et méritent d'être encouragés et poursuivis.
Opportunités	Menaces
L'influence de l'informatique sur les activités de design et de création n'a jamais été aussi riche et complexe qu'aujourd'hui, et les opportunités de recherche et de collaboration sont d'autant plus nombreuses et prometteuses.	L'équipe est à taille constante depuis 2014 mais la charge d'enseignement s'est fortement élargie. Nous avons besoin de recruter pour maintenir à la fois une activité de recherche forte et l'ensemble de nos formations.

Les axes de recherches définis dans notre bilan nous semblent toujours alignés avec nos perspectives de recherches. Il est à noter que suite à la mutation de notre MCF spécialisée dans l'interaction sonore, nous ne devrions plus porter de projets spécifiquement axés sur cette problématique, même si nous souhaitons maintenir une collaboration. D'un autre côté, le recrutement en cours d'un-e MCF devrait contribuer à enrichir nos problématiques de recherche. Plus spécifiquement, nous avons plusieurs directions de recherches que nous souhaiterions développer dans les années à venir.

Tout d'abord, ces dernières années ont révélé, au sein de l'équipe, une dynamique autour de la génération de contenu procédurale que nous souhaitons maintenir et élargir. C'est une problématique centrale, actuelle, qui touche tout autant le design, l'étude de la perception et des motivations du joueur que la conception de modèles génératifs proprement dite. Les récentes avancées en génération d'images et de textes peuvent permettre de porter nos problématiques, dans le sens où les grands modèles récemment publiés peuvent être étendus / spécialisés pour traiter des problématiques plus spécifiques de génération de niveau de jeu, de bâtiments, ou de contenus narratifs par exemple. Plusieurs thèses et projets sont en cours de montage autour de ces problématiques.

En terme d'accessibilité, trois thèses viennent de débiter sur les projets de manuels inclusifs et de jumeaux numériques, ce qui devrait permettre d'enrichir nos contributions sur ce thème.

Sur un axe d'interaction humain machine plus général, nous souhaitons poursuivre nos travaux sur les bibliothèques numériques. La société astronomique de France (SAF) dispose d'un patrimoine historique très riche, avec en particulier l'ensemble des archives de son fondateur Camille Flammarion, dont la numérisation d'une sélection d'archives a démarré au CEDRIC en 2022 et doit s'achever en 2024. Le lieu même de conservation de ces archives, l'observatoire de Flammarion à Juvisy, est en très mauvais état et un projet de rénovation est en cours pour permettre l'accès public. Pour faciliter le dialogue entre les parties prenantes et la prise

de décision, une approche réalité virtuelle paraît utile. L'équipe a beaucoup étudié dans les années 2000-2010 les interfaces 3D de bibliothèques numériques (thèses d'A. Topol, J. Dupire, R. Almeida) et la démocratisation des dispositifs de VR pourrait donner une nouvelle impulsion à ces travaux.

Nous souhaitons également poursuivre un projet de médiation, portant sur la manipulation et visualisation du fonctionnement des ordinateurs. Il est possible de rendre les opérations interne de l'ordinateur tangibles, c'est-à-dire ramenées aux dimensions physiques (temps, espace, etc.) accessibles aux humains. Nous avons dans un premier temps proposé l'esquisse d'un ordinateur complet, reposant sur l'utilisation de billes pour la signalisation et le stockage de l'information. Suite à un concours, ce projet a été retenu par Universcience en juin 2022 pour constituer une des cinq nouvelles attractions du Palais de la découverte en cours de rénovation. Un démonstrateur est en cours de réalisation par un contractant extérieur d'Universcience (société Hakimaki) avec la participation de l'équipe LAETITIA (C. Alexandre, L. Zerioul). De nombreuses questions d'appropriation par le public pourront alors être étudiées dans les années à venir, ainsi certainement que des reconceptions et des "produits" dérivés. Ces travaux pourront en particulier faire l'objet de thèses, par exemple dans le cadre du réseau Remedis auquel le Cnam participe.

Pour finir, un partenariat est en cours de montage autour de la reconnaissance d'émotions basée sur les capteurs physiologiques.

3.4. Autoévaluation de l'équipe MSDMA

Composition de l'équipe

Permanents	
Responsable	Ndeye Niang
Émérites	Gilbert Saporta.
Profs Université	Ndeye Niang.
MCF	Giorgio Russolillo, Luan Jaupi, Vincent Audigier, Ferial Bouhadjara, Meziane Yacoub.
Non permanents	
Associés	Michel Bera, Genane Youness, Mory Ouattara.
Doctorants	Mouhamoudou Lamine Ndao, Houda Gadacha, Ndeye Awa Dieye, Yasmine Agliz.

3.4.1. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

Les activités de l'équipe MSDMA (Méthodes statistiques de data-mining et apprentissage) se situent dans le domaine des mathématiques appliquées, particulièrement la statistique (analyse de données, la biostatistique, théorie des valeurs extrêmes, contrôle de qualité multivarié, apprentissage profond, ...). Elles concernent le traitement de données par des méthodes statistiques et informatiques dont le concept fédérateur est celui du « data-mining ». Cette discipline, qui a émergé ces dernières années se situe à la frontière de la statistique, de l'intelligence artificielle et des bases de données. Elle se propose de découvrir des relations, des structures dans des données préexistantes à travers des méthodes d'apprentissage supervisé et non supervisé. La théorie de l'apprentissage lui donne ses fondements conceptuels. L'équipe répond ainsi à des enjeux scientifiques autour de la science des données. Les travaux des membres de l'équipe visent au développement d'outils méthodologiques et informatiques pour l'amélioration de méthodes d'analyse de données de plus en plus complexes (données éparses, données aberrantes, données manquantes, données mixtes mélangeant

des variables quantitatives et qualitatives, données de grande dimension, données structurées en blocs ou multi-tableaux, données hétérogènes, ...) en liaison avec l'augmentation en volume et en variété des bases de données et plus généralement avec l'émergence des nouveaux domaines du data mining et actuellement du big data. Ces travaux font une grande part à l'application à des données réelles provenant de divers domaines tels que l'environnement, la télédétection, les procédés industriels, les images, la médecine, la santé... Au début de la période, en 2017, les activités de recherche de l'équipe sont structurées autour des grandes thématiques suivantes : l'analyse multidimensionnelle de données complexes, le risque et les valeurs extrêmes, la biostatistique et le deep learning. Jusqu'en août 2018, l'équipe a eu une activité de recherche autour de la thématique du risque et des valeurs extrêmes avec les travaux de E. Di Bernardino [[hal-04043151](#), [hal-01549196](#), [hal-01763060](#), [hal-01347869](#)]. Ceci a permis le passage de son HDR et une évolution positive dans sa carrière à travers son recrutement comme PU. Les activités de recherche sur le deep learning portées essentiellement par N.Thome, dont certaines en collaboration avec d'autres membres de l'équipe (A.Bar-Hen, à travers des co-publications, et V.Audigier, avec des dépôts de projets ANR) ont également abouti à plusieurs publications de qualité ([[hal-04071275](#), [hal-03508401](#), [hal-02073644](#), [hal-02073649](#), [hal-02291601](#), [hal-02469747](#), [hal-02470742](#), [hal-02073640](#), [hal-02073637](#)]). Cette thématique est mise en veille au sein de MSDMA depuis le changement d'équipe de N. Thome en septembre 2020. Il en est de même depuis 2020 pour les biostatistiques suite au départ en détachement à l'institut Curie de A.Latouche.

Ainsi, les trois dernières thématiques étant portées par des membres ayant quitté l'équipe au cours de la période (en 2018 E. Di Bernardino , 2019 A.Latouche et 2020 A. Bar-Hen et N.Thome), les principaux travaux ont été recentrés sur la première thématique des données complexes et concernent aussi bien l'apprentissage supervisé que non supervisé. L'équipe renforce donc sa cohésion sur cette thématique unique et fédératrice. Celle-ci se décline en sous-thèmes, reliés à la nature des données, sur lesquels collaborent différents membres : la thématique de la grande dimension, des données hétérogènes, des données incomplètes et de la gestion de valeurs aberrantes.

Concernant la grande dimension, les travaux sur les méthodes non supervisées traitent du cas où les variables présentent une structure en groupes homogènes dont il faut tenir compte. Ceux-ci ont conduit à la proposition de méthodes efficaces de classification de variables comme alternative à la sélection de variables. Aussi, afin de faciliter l'interprétabilité des résultats, des variantes parcimonieuses ont été développées. Les travaux sur la parcimonie portent aussi sur les méthodes d'analyse factorielle des correspondances ou la classification d'individus via des méthodes de subspace clustering [[hal-03541520](#)]. D'autres travaux sur ce thème sont relatifs à l'apprentissage supervisé avec des méthodes de modélisation statistique autour de la régression PLS [[hal-02941462](#)].

La gestion des valeurs aberrantes est traitée par différentes approches dans le domaine du contrôle de qualité et la détection d'anomalies, par exemple à travers les travaux de Méziane Yacoub [[hal-03381644](#), [hal-03791193](#) , [hal-03381663](#)] et la thèse CIFRE en cours de H. Gadacha qui porte sur le contrôle technique des véhicules.

Les autres travaux se situent davantage à l'intersection de plusieurs sous-thèmes favorisant les collaborations entre membres de l'équipe. Par exemple, à l'intersection de la grande dimension et des données incomplètes, on retrouve dans le cas supervisé des travaux autour des méthodes de sélection de variables en régression sur données incomplètes ([[hal-02635566](#)]); à l'intersection de la grande dimension et de l'hétérogénéité, on retrouve des travaux sur des méthodes de régression clusterwise multiblocs pour données hétérogènes [[hal-02470765](#)] ainsi que des méthodes de régression clusterwise régularisée [[hal-02470028](#), [hal-03541125](#)]; à l'intersection de l'hétérogénéité et des données incomplètes, des travaux ont été proposés sur l'imputation multiple pour des données hiérarchiques (ou multiniveaux)

[[hal-02469133](#)] ou encore sur l'imputation multiple dans un contexte de classification non supervisée [[hal-03766733](#)] et se poursuivent dans le cadre de la thèse CIFRE de Yasmine Agliz.

Les travaux de l'équipe portent aussi sur le biais, l'équité et l'explicabilité des méthodes de machine learning, sujets communs à l'ensemble des sous-thèmes, notamment à travers la thèse de M.L. Ndao et les travaux de G. Saporta

Ainsi, l'équipe répond aux enjeux scientifiques autour de la science des données à travers des thématiques classiques, mais également en explorant des thèmes émergents tel que celui de l'explicabilité des méthodes d'IA.

3.4.2. Profil d'activités liées à la recherche

Activités (100 points répartis sur 7 items)	
Administration et animation de la recherche	5
Aide aux politiques publiques et expertise technique	5
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	5
Dissémination de la recherche	10
Recherche et encadrement de la recherche	75
Valorisation, transfert, innovation	0
Autre activités	0

Notre activité se concentre essentiellement sur la recherche, sa dissémination et sur l'encadrement de la recherche avec notamment une augmentation du nombre de thèses en cours par rapport à la période précédente. Une partie importante de cette activité de recherche est réalisée en collaboration avec le monde industriel à travers des thèses CIFRE. Les membres de l'équipe ont également d'autres activités autour de l'animation scientifique au sein et à l'extérieur de l'équipe avec le séminaire interne de l'équipe, l'organisation de conférences et de journées de formation. Les autres activités concernent les enseignements innovants tels que le certificat de spécialisation en analyse de données massives et la participation à des comités d'experts publiques et privés.

3.4.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Le rapport de l'HCERES en 2018 faisait état de plusieurs points à améliorer et de recommandations générales. Concernant les produits et activités de la recherche, le comité d'experts recommandait à l'équipe de poursuivre l'effort vers les publications sélectives et de répondre à des appels type ANR plus fondamentaux et particulièrement pour les jeunes chercheurs et regrettait un manque d'interactions entre les membres qui fait perdre de la cohérence à l'équipe. Le comité d'experts recommandait de veiller à la capacité d'intégration des nouveaux arrivants.

L'équipe a maintenu son effort de publications sélectives et a amélioré les interactions entre les membres comme le montrent les nouvelles collaborations fructueuses. Parmi elles on peut citer la publication commune de G. Russolillo et G. Saporta. Aussi, V. Audigier, maître de conférences recruté au début de la période, s'est bien intégré au niveau de l'équipe et du laboratoire. En effet, plusieurs de ses travaux collaboratifs ont été effectués par le biais d'encadrements doctoraux (MSDMA, ROC), d'encadrements de stage, de publications communes et réponses à des appels à projets ANR par exemple. Cette dynamique d'intégration se poursuit avec F. Bouhadjera la maîtresse de conférences nouvellement recrutée, notamment à travers un co-encadrement de M2 et des projets de co-encadrement de thèse. Par ailleurs, la présentation régulière de doctorants pour des bourses de thèse académiques à l'école doctorale SMI permet de travailler sur des thématiques plus fondamentales qu'appliquées comme en témoigne la nouvelle thèse de N.A.Dièye (encadrée par N.Niang et G. Russolillo) portant sur des aspects théoriques de la calibration des méthodes de classification supervisée.

Au niveau de l'implication dans la formation par la recherche, le comité d'experts soulignait la possible difficulté de maintenir le même nombre de doctorants sur la prochaine période suite aux différents départs de professeurs et habilités. Il suggérait qu'une discussion avec la tutelle soit organisée pour renforcer l'équipe en enseignants-chercheurs. Avec la soutenance de HDR de N.Niang en 2018 et une politique inter équipe de co-encadrements (avec les équipes OC, ROC), l'équipe est parvenue à augmenter le nombre de doctorants sur la période en dépit des départs de plusieurs membres de rang A (thèses de H.Gadacha, Y. Ameur, M.Milliet de Faverges). L'implication de l'équipe dans la gestion du master TRIED a aussi offert un vivier d'étudiants pour favoriser l'encadrement doctoral (thèses de M.L. Ndao, L. Themyr par exemple). Ainsi, la dynamique quant à l'encadrement doctoral est bonne et sera amenée à s'intensifier suite à de nouveaux projets en cours qui seront présentés dans la partie trajectoire de l'équipe. Toutefois, l'équipe reste de petite taille en dépit de demandes auprès de la tutelle pour renforcer l'équipe en enseignants-chercheurs ce qui constitue un risque de surcharge d'encadrement pour les membres de l'équipe.

Le précédent rapport notait également que malgré une volonté d'unité, le projet ressemblait à un grand ensemble de projets individuels avec certaines parties très ambitieuses. Suite au départ de plusieurs membres, l'équipe s'est recentrée sur une unique grande thématique autour du traitement des données complexes améliorant ainsi la cohérence de son projet. Davantage de travaux scientifiques et de projets (notamment encadrement de thèse) entre membres de l'équipe ont été entrepris, comme évoqué précédemment. L'équipe a renforcé son intégration avec les autres à travers la mise en place d'un journal club (avec l'équipe Vertigo), la participation au séminaire de l'axe "Science des données" du laboratoire et le maintien d'un séminaire mensuel de l'équipe ouvert à tous. Par ailleurs, le renforcement de cette intégration se traduit par des encadrements de thèse (déjà cités), des co-encadrements de stages (via les projets exploratoires), une implication dans des projets ANR avec d'autres équipes du CEDRIC (Laetitia, ROC, OC) et d'autres laboratoires du Cnam (MESuRS, GBCM) et extérieurs au Cnam (CESI-LINEACT)

Enfin, un autre point concernait les moyens liés au développement de partenariats socio-économiques dans le traitement des données massives au regard du temps, de l'énergie, des compétences techniques et des moyens de calcul qu'ils nécessitent (ingénieurs, accès à des clusters et autres ressources de calcul). L'équipe profite des serveurs du laboratoire pour ses travaux de recherche. Toutefois, le départ en retraite non renouvelé (à l'heure actuelle) d'un ingénieur constitue un frein à moyen terme.

3.4.4. Introduction du portfolio

Les travaux de recherche de l'équipe concernent le domaine du traitement de données complexes tant sur le plan théorique qu'appliqué et trouvent leur place dans divers domaines : l'environnement, la télédétection, les procédés industriels, les images, la médecine, la santé, etc... Ces travaux sont menés dans le cadre de collaborations intra et inter équipes du Cedric ainsi qu'avec autres établissements français et étrangers comme le montrent les publications communes sélectionnées ci-après :

Publication sur le plan théorique avec des collaborations internationales et nationales :

- E. Di Bernardino, H. Biermé, C. Duval, A. Estrade "Lipschitz-Killing curvatures of excursion sets for two-dimensional random fields" (2019), *Electronic Journal of Statistics*, Volume 13, Issue 1, Pages 536-581 (Q1)

Publications sur le plan méthodologique avec des applications, notamment en médecine, dans le cadre de collaborations internationales et nationales

- [[hal-02349043](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02349043)] Peter Austin, Aurélien Latouche, Jason Fine. A review of the use of time-varying covariates in the Fine-Gray subdistribution hazard competing risk regression mo-

del, *Statistics in Medicine*, 2019.

- Vincent Audigier. Ian R. White. Shahab Jolani. Thomas P. A. Debray. Matteo Quartagno. James Carpenter. Stef van Buuren. Matthieu Resche-Rigon. "Multiple Imputation for Multilevel Data with Continuous and Binary Variables." *Statist. Sci.* 33 (2) 160 - 183, May 2018. <https://doi.org/10.1214/18-STS646> (Q1)
- Bar-Hen, A. ; Gey, S. and Poggi, J-M. Spatial CART Classification Trees. In *Computational Statistics*, 2021 (Q2)

Publications intra et inter équipe :

- Corbière, C. ; Thome, N. ; Bar-Hen, A. ; Cord, M. and Pérez, P. Addressing Failure Prediction by Learning Model Confidence. In *33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019)*, pages 2898-2909, Curran Associates, Inc., Vancouver, Canada, 2019. (Q1)

3.4.5. Auto-évaluation de l'équipe

Domaine 3, production scientifique

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
D3 R1 Revues	17	17	8	5	3		
Conférences	8	4	3	0	12		
Chapitre						13	
Ouvrages						6	

Le niveau de publication de l'équipe est satisfaisant, avec de bonnes revues bien classées par SCImago ou Core (17 revues et 8 conférences classées Q1 et 17 revues et 4 conférences classées Q2). Les publications sont en statistiques avec des journaux comme *Statistical Science* ou *Electronic Journal of Statistics*, mais également dans des revues à l'intersection entre statistiques et des domaines d'application ainsi que des revues plus orientées vers les applications (*Statistics in Medicine*, *Ocean Sciences*, *Critical Care*). Ceci montre l'ancrage dans les communautés applicatives. La composition de l'équipe avec des membres en 26e et 27e sections du CNU, a permis une approche pluridisciplinaire porteuse avec des publications communes entre membres de l'équipe (A.Bar-Hen et N.Thome). Après le changement d'équipe de N.Thome membre de rang A, en 27e section, ce travail multidisciplinaire a été maintenu et l'équipe garde cette orientation à travers des collaborations inter-équipes (ROC, LAETITIA) avec des co-encadrements de thèses et stages.

D3 R2 L'augmentation constante depuis quelques années de la masse de données, ainsi que de leur variété, associées à la part de plus en plus importante des méthodes d'apprentissage statistique et de l'intelligence artificielle basées sur ces données et les problèmes sociétaux qu'ils engendrent (biais, équité, explicabilité, données hétérogènes, issues de capteurs, véhicules autonomes,...) offre de nombreuses opportunités pour les thématiques de l'équipe autour de la statistique et ses applications. Les travaux de l'équipe abordent un grand nombre de questions autour de la science des données, les classiques, mais aussi d'actualité comme celles dans le domaine de l'XAI. Comme déjà évoquée, la composition mixte 26-27 renforcée par des collaborations avec d'autres équipes (LAETITIA, ROC, LINEACT...) offre également un plus grand spectre de possibilités. L'ensemble des membres de l'équipe sont publiant avec une répartition assez équilibrée. L'intégration des nouveaux membres (N.Thome et V.Audigier) au sein de l'équipe a été réussie à travers des travaux communs avec des membres de l'équipe et ceux d'autres équipes du laboratoire. Au niveau de la diffusion interne des connaissances,

un journal club mis en place avec l'arrivée des nouveaux membres a permis de mieux communiquer. Par ailleurs, l'équipe organise un séminaire mensuel dans lequel des enseignants-chercheurs confirmés sont invités à présenter leurs travaux les plus récents. En outre, tous les mois, à tour de rôle, les doctorants présentent l'état d'avancement de leurs recherches permettant ainsi à chacun d'aborder des sujets de recherche variés et d'actualité. Ce dynamisme permet un environnement favorable aux échanges scientifiques.

D3 R3 Dans le cadre de la nouvelle politique du laboratoire, les enseignants-chercheurs sont invités à déposer l'ensemble de leurs travaux sur la plateforme HAL. Par ailleurs, les membres de l'équipe sont encouragés à publier leurs travaux sur d'autres plateformes telles que arXiv. Aussi, les contributions des membres faisant une part importante aux outils informatiques pour la mise en œuvre des propositions méthodologiques, elles incluent la mise à disposition de programmes, implémentés principalement en R, et disponibles en libre accès notamment à travers des packages R facilitant leur diffusion.

Domaine 2, attractivité

D2 R1 Les membres contribuent activement au rayonnement scientifique de l'équipe. On peut citer par exemple plusieurs conférences invitées de G. Saporta. Les membres de l'équipe occupent également des responsabilités au niveau national et international dans plusieurs institutions : vice-présidente de la société francophone de classification, (N.Niang), membre de la commission des méthodes statistiques de l'AFNOR (G. Saporta), du comité scientifique mathématiques-statistique du Laboratoire national de métrologie et d'essais (G. Saporta), expert CIR MESRI (N.Niang), Expert-évaluateur de projets de recherches pour le Ministère italien de l'enseignement supérieur et de la recherche (G. Saporta). Les membres de l'équipe sont impliqués d'une part dans diverses conférences nationales et internationales tant comme membre de comités de programme qu'organisateur (Chimiométrie 2018, ICML Artemiss 2020) et d'autre part dans l'animation de plusieurs manifestations telles que les ateliers de la statistique (2020), organisation et animation des Journées d'Etudes en Statistique (JES, 2018, 2021) pour la SFDS, animation d'un atelier sur les données manquantes lors de la conférence EPICLIN (2022), modérateur pour les événements satellites des Journées de la statistique (2018). Enfin les membres de l'équipe ont des responsabilités éditoriales : relecteurs de différentes revues (Biometrika, Bioinformatics, CSDA, Neural Processing Letters, Journal of Chemometrics, ADAC, Sociological Methods and Research, Statistics and Probability Letters, Bernoulli Journal, ...), éditeur associé pour *Advances in Data Analysis and Applications* et de plusieurs ouvrages issus des JES (G.Saporta).

D2 R2 L'équipe a une tradition d'accueil de chercheurs invités collègues d'universités étrangères. Ainsi Paula Brito (Université de Porto, Laboratoire LIADD– INESC TEC) et Genane Youness (CNAM Liban, Laboratoire ISSAE) ont effectué chacune un séjour dans l'équipe. Ces séjours ont donné lieu à différents projets (encadrement de thèse (M.L.Ndao), échanges officiels entre groupes de recherche des deux pays, co-organisation de conférences, etc) qui se poursuivent à ce jour. Genane Youness est désormais membre associée de l'équipe, de même que M. Ouattara, ancien doctorant et aujourd'hui enseignant chercheur en Côte d'Ivoire.

L'intégration des nouveaux recrutés passent essentiellement par les interactions avec les membres de l'équipe. Les séminaires et les réunions d'équipe constituent un cadre privilégié pour celles-ci. Ainsi, les nouveaux recrutés effectuent leur recherche dans un environnement favorable. Cependant, pour des raisons diverses (délégation, détachement, promotion, retraite), l'équipe a eu des difficultés à maintenir ses rangs A en son sein.

D2 R3 Les membres de l'équipe prennent une part active dans la participation à des appels ANR. Parmi les projets qui ont vu le jour sur la période, on peut citer les ANR *deepomatics* et *ORCHID* où sont impliqués N. Thome et V. Audigier.

Aussi, l'équipe est sollicitée par des organismes nationaux et internationaux dans le cadre de contrats de recherche comme par exemple avec le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM), le CESI, l'ANSES, Université de Laval ou McGill, qui donnent lieu à des financements de thèse, de stages et à des échanges d'étudiants entre établissements.

Domaine 4 inscription des activités de recherche dans la société

D4 R1 L'équipe maintient des liens importants avec le secteur socio-économique. C'est l'une de ses forces. Ces liens s'illustrent d'une part par des contrats CIFRE signés régulièrement pendant la période avec diverses entreprises (UTAC, CDC, SNCF, Orange). Ceci témoigne d'une réelle volonté de conserver un lien fort avec des problématiques de recherche bien ancrées dans le milieu professionnel. Cette stratégie assure par ailleurs une insertion professionnelle de qualité. D'autre part, ces liens se traduisent par la participation active des membres à l'animation de formations continues dans différentes structures aussi bien publiques comme la DGI Maroc, ou la SFDS que privée comme la société Pro Btp.

D4 R2 En matière de développement de produits à destination du monde économique, certains membres participent à la rédaction de normes AFNOR par exemple, et mènent des activités d'expertise et de conseil auprès d'entreprises.

3.4.6. Trajectoire de l'équipe

Les évolutions dans la composition de l'équipe (départ des membres de rangs A, notamment en section 27, HDR et promotion interne PU) ont conduit à la restructuration de ses thématiques de recherche avec d'une part l'abandon progressif de celles portées essentiellement par un seul membre (Biostatistique, valeurs extrêmes, deep learning) et d'autre part par le recentrage sur une thématique unique et fédératrice autour de l'analyse des données complexes. A travers l'intégration des domaines de spécialité des deux nouveaux arrivants (données manquantes, données complexes, modélisation non paramétrique,...) l'équipe renforce sa cohésion via des collaborations entre les membres actuels sur les différents sous-thèmes précédemment évoqués.

D'une part, ces collaborations se matérialisent par des co-encadrements de thèses théoriques, traduisant de la part de l'équipe une ouverture sur des sujets plus fondamentaux autour de la calibration de méthodes de classification supervisée et de l'explicabilité en IA. D'autre part, les co-encadrement de thèse CIFRE gardent une place importante, en accord avec la tradition de l'équipe à maintenir des liens forts avec le secteur socio-économique. Ces collaborations sont amenées à se poursuivre au sein de l'équipe : une collaboration naissante avec la nouvelle MCF autour des méthodes non paramétriques se traduit par l'encadrement d'un stage de M2 et une candidature à un contrat doctoral dans le cadre de l'ED SMI. Il en est de même pour les collaborations inter équipe avec notamment la nouvelle thèse CIFRE sur la modélisation prédictive pour l'optimisation des essais d'homologation de véhicules autonomes avec l'UTAC co-encadrée avec l'équipe LAETITIA dans la suite du projet exploratoire PRALINE.

Par ailleurs, l'équipe participe activement au dépôt de projets ANR portés par d'autres équipes au sein du CNAM ou à l'extérieur. Parmi ces derniers, un (intitulé *ORCHID*) débute actuellement et amènera au développement de nouveaux travaux sur des modèles explicables pour la prédiction de l'origine de maladies cardiaques. L'équipe entretient également des partenariats avec différents établissements, privés (Hôpital Foch DRCI, LOBIP) comme publics

(ANSES, SHOM-DGA), à travers différents contrats de recherche et des co-encadrements doctoraux avec d'autres universités françaises (Paris Cité) comme étrangères (Lausanne, Lisbonne). Enfin, au-delà de ces collaborations contractualisées, l'équipe collabore avec des chercheurs français et internationaux provenant de différents établissements (Université Paris Cité, Institut Agro, Université de Montpellier 2, ANSES, London School of Hygiene & Tropical Medicine, Université du Texas, Beihang University, Beijing Information Science and Technology University, . . .) montrant ainsi sa bonne implication dans l'animation de la recherche au niveau national et international ainsi qu'un bon rayonnement. L'intégration de M.Ouattara comme membre associé permet un soutien en termes d'encadrement de stages et mémoires de recherche pour des étudiants africains du réseau AIMS dont certains aboutissent à des publications [[hal-03541520](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03541520)]. A plus long terme, l'équipe envisage d'initier des recherches sur d'autres sujets potentiellement porteurs. Parmi eux, celui de la signature de chemin pour l'apprentissage statistique pourrait être exploré (par exemple sous la forme de stage). D'autres projets seront amenés à être renforcés, notamment la modélisation non-paramétrique, la grande dimension ou l'explicabilité des méthodes de machine learning qui devient un sujet central pour la société tout comme la protection des données personnelles.

Forces	Faiblesses
<ol style="list-style-type: none"> 1. Recrutements de 2 MCF et soutenance d'une HDR suivie d'une promotion interne PU. 2. Thématiques de recherche appliquées et théoriques bien identifiées 3. Production scientifique de bon niveau. 4. Collaborations inter Cnam et intra CEDRIC fructueuses. Nombreuses interactions avec les mondes académique et industriel 5. Adossement/Formation par la recherche à travers le master TRIED (Responsabilité), encadrements de stagiaires préalablement au recrutement de doctorants 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Départs de membres PU PRCM, pas de rang A changement de direction. 2. Un départ à la retraite de PRCM non renouvelé (aujourd'hui émérite membre associé). Eventuelle perte d'une visibilité nationale académique et industrielle. 3. A renforcer : pas de projets ANR et européens portés par l'équipe mais la participation des membres de l'équipe
Opportunités	Menaces
<ol style="list-style-type: none"> 1. Renforcement de la recherche statistique sur le plan théorique via nouveau recrutement. Possibilité d'ANR JCJC 2. Recherche en données massives est un domaine en plein essor avec beaucoup d'opportunités de collaborations 3. Spécificité thématique (analyse de données complexes) au coeur des problématiques appliquées auxquelles sont confrontées les autres équipes du laboratoire (objets connectés, capteurs, etc) et autres laboratoires du CNAM (MeSur, GBCM, ...). Ceci est en faveur du développement de projets de plus grande ampleur de type ANR, ERC 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La recherche en données massives est très concurrentielle, nécessitant ouverture et adaptation des thématiques. Cependant, la faiblesse de notre effectif ne nous permet pas de répondre à la demande de collaboration interne et externe et rend plus difficile le développement de nouveaux thèmes de recherche. Ceci est renforcé par des charges administratives et d'enseignement des permanents. 2. Futur départ à la retraite

3.5. Autoévaluation de l'équipe Laetitia

Composition de l'équipe

Permanents	
Responsable	Didier Le Ruyet
Emérites	Maurice Bellanger.
Profs Cnam	Pascal Chevalier, Mathieu Moze.
Profs Université	Didier Le Ruyet, Tarek Raïssi, Michel Terré.
MCF	Thach Ngoc Dinh, Jérémy Van Gorp, Hmaied Shaiek (HDR), Christophe Alexandre, Iness Ahriz, Dariush Ghorbanzadeh, Luc Fety, Samuel Garcia, Christian Pautot, Pierre Provent, Lounis Zerrioul, Herve Guillard.
Ingénieurs	Ali Dziri.
Non permanents	
Associés	Rafik Zayani, Rostom Zakaria.
Post-doctorants	Thomas Chevet, Xiaotian Fu.
Doctorants	Franco Falconi, Mahmoud Naamani, Minjung Zhang, Maria Molina, Chaima Beldi, Dang Khai Nguyen.
ATER	Khaled Tahkoubit, Chaima Zammali, Ghassen Marouani.

3.5.1. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

— Thématiques scientifiques :

Après plusieurs réorganisations, la recherche en électronique et automatique au CNAM (sections CNU 61 et 63) est aujourd'hui principalement regroupée au sein de l'équipe LAETITIA du CEDRIC. Les thématiques scientifiques de l'équipe sont les suivantes :

-axe "traitement du signal pour les communications" (48 % des EC) : cet axe regroupe les activités de recherche en lien avec le développement de la 5G puis la 6G pour les réseaux cellulaires ainsi que les problématiques liées à la couche physique pour les réseaux faible puissance longue portée pour l'internet des objets. Parmi les thématiques de cet axe nous pouvons citer l'étude de nouvelles formes d'onde, les systèmes MIMO multi-utilisateurs et les traitements pour l'estimation des canaux et la réduction des interférences, le développement d'algorithmes pour l'allocation de ressources (optimisation de puissance, énergétique, ...), les techniques de correction des imperfections dues à la chaîne RF ainsi que l'étude de nouveaux algorithmes de localisation.

-axe "sûreté de fonctionnement de systèmes dynamiques" (26 % des EC) : regroupe les activités de recherche en Automatique et couvre les thèmes complémentaires "détection, localisation et identifications de défauts" qui porte sur le développement de procédures permettant d'améliorer le diagnostic des fautes des systèmes complexes et "commande tolérante aux défauts" qui a pour objectif de reconfigurer en ligne les lois de commande en présence de pannes.

-axe "implémentation temps réel" (26 % des EC) : mise en œuvre des algorithmes proposés par l'équipe LAETITIA pour des applications en télécommunication et en instrumentation-mesure. Les solutions temps-réel sont en général basées sur des architectures à base de FPGA. Les chercheurs de cet axe sont impliqués dans la mise au point de plusieurs démonstrateurs et prototypes pour des projets collaboratifs.

— Positionnement et avancées scientifiques dans la période :

Axe "Traitement du signal pour les télécommunications"

Formes d'onde filtrée post-OFDM

La détermination d'une forme d'onde versatile et robuste aux communications asynchrones pour les futures générations de réseaux de communication sans fil (6G, ...) en remplacement de l'OFDM reste un sujet d'actualité. Dans le cadre du projet ANR

WONG5, nous avons mené une comparaison exhaustive et critique des différentes formes d'onde candidate pour la 5G dans le contexte des communications machine vers machine. Nous avons proposé une forme d'onde BF-OFDM qui présente la propriété de garantir la quasi-orthogonalité complexe et qui permet de conserver un récepteur OFDM classique (thèse de David Demmer) [[hal-02470207](#)]. L'optimisation des filtres prototypes pour les schémas FBMC-OQAM et FBMC-QAM a fait l'objet de la thèse de landra Galidino [[hal-03026525](#)] [[hal-03940318](#)]. Dans le cadre de la thèse de Hayfa Fhima, nous avons travaillé sur l'étude et la mise en œuvre d'égaliseurs largement linéaires (Widely-Linear) et FRESH appliqués à la forme d'onde FBMC-OQAM. Nous avons évalué ces égaliseurs dans différents scénarios synchrones et asynchrones, avec des transmissions et des numéologies mixtes [[hal-02953528](#)]. Dans le cadre de collaboration avec le Brésil, nous avons proposé de nouvelles formes d'onde précodées à base de bancs de filtres (2D precoded FMBC, generalized pruned DFT spread FBMC) (thèse de Rogério Pereira) et étudié les algorithmes d'estimation de canal et des données de la forme d'onde Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) (thèse de Dayse Bandeira) [[hal-03715532](#)] [[hal-03026587](#)]. Par ailleurs, dans le contexte des modulations OFDM précodées, nous avons proposé plusieurs approches originales de conception de modulations multidimensionnelles exploitant la diversité basées sur un dictionnaire composé d'une grille prédéfinie et de plusieurs entrelaceurs (thèses de Juliana C. Inácio et de Xiaotian Fu) [[hal-03026550](#)] [[hal-02470216](#)].

Dans le cadre de la thèse de Titouan Petitpied, nous avons développé, pour les liaisons Faster-Than-Nyquist, de nouveaux récepteurs EP (Expected Propagation), à complexité raisonnable, permettant d'atteindre des efficacités spectrales jusqu'à 5bits/s/Hz pour des systèmes SISO [[hal-02547067](#)] [[hal-02461662](#)] [[hal-02463300](#)] [[hal-03324345](#)] [[hal-02463307](#)] [[hal-02463321](#)].

Dans le cadre de la thèse de Jean-Baptiste Fraisse, nous avons développé une nouvelle forme d'onde, appelée FTN-DSSS, issue du couplage deux deux technologies : L'étalement spectral par séquence directe (DSSS) et le Faster-Than-Nyquist. L'objectif est d'accroître l'efficacité spectrale des liaisons DSSS de Nyquist, tout en gardant leurs avantages, et, pour des codes iid, d'augmenter leur discrétion cyclique. Cette invention a fait l'objet du brevet [[hal-03951117](#)].

Systèmes MIMO multi-utilisateurs, multi-cellulaires

Bien que les antennes multiples soient une technologie clé dans les systèmes de communication, il reste de nombreux verrous que nous avons adressés durant la période 2017-2022. Dans le cadre d'un projet PHC franco-coréen STAR, nous avons proposé un schéma de modulation et de formation de voie conjoint pour les systèmes MIMO utilisant des convertisseurs numériques analogiques DAC à 1 bit à l'émission [[hal-02433279](#)]. Dans le cadre d'un contrat de recherche externe avec Orange, nous avons étudié l'adaptation de lien des systèmes MIMO 5G et proposé un algorithme pour la détermination pratique des précodeurs par codebooks type 1 et type2 [[hal-03791187](#)]. Dans le cadre de la thèse de Xinying Cheng, nous nous sommes intéressés à l'étude des interférences causées par des utilisateurs utilisant des numéologies différentes dans les systèmes massif [[hal-03082323](#)], [[hal-02447518](#)].

Plus récemment, nous avons commencé des travaux de recherche sur l'estimation des canaux et le précodage/postcodage dans un contexte Cell Free MIMO dans le cadre du projet ANR Poséidon (thèse de Chaima Beldi). Nous avons également proposé une approche générique pour la construction des dictionnaires (thèse de Bruno Fontana) et des algorithmes de détection par propagation de croyance/décodage par sphère (thèse de Xiaotian Fu) pour les codes parcimonieux SCMA [[hal-02470159](#)] [[hal-03541812](#)].

Dans le cadre de la thèse de Mustapha Sadok, nous avons développé des récepteurs SIMO MVDR ainsi que des récepteurs SISO/SIMO MMSE de Volterra d'ordre 3 robustes aux interférences. Ces récepteurs améliorent les performances des récepteurs linéaires MVDR et MMSE pour des interférences potentiellement non circulaires et/ou non Gaussiennes. Ces travaux ont engendré les publications suivantes [[hal-01869124](#)] [[hal-01869129](#)], [[hal-02461523](#)] [[hal-01629454](#)], [[hal-02465012](#)].

Allocation de ressource

Nous avons étendu nos travaux sur les techniques d'allocation de ressource aux systèmes multi-porteuses, multi-cellulaire et asynchrone avec objectif de maximisation de l'efficacité énergétique (thèse de J. Denis) [[hal-02446295](#)]. Des algorithmes robustes avec connaissance statistique du canal ont été obtenus. Nous avons également proposé différents algorithmes d'allocation de ressource performants pour les communications Device-to-Device (D2D) asynchrones dans le cadre du projet ANR ACCENT5 [[hal-02515209](#)] et NOMA [[hal-02446283](#)].

Correction des imperfections dues à la chaîne RF

L'optimisation de l'efficacité énergétique des réseaux cellulaires a été un défi majeur dans le développement des systèmes 5G. Au niveau des transmetteurs, cette optimisation nécessite de faire fonctionner les amplificateurs de puissance aussi près que possible de leurs zones de saturation. Comme la plupart des formes d'ondes candidates pour la 5G souffrent d'un facteur de crête (PAPR) élevé, l'optimisation de l'efficacité énergétique induit un élargissement du spectre du signal amplifié, ainsi qu'une distorsion au niveau du signal transmis. Dans le cadre du projet ANR WONG5, nous avons proposé des solutions algorithmiques pour la réduction du PAPR et/ou la pré-distorsion numérique des amplificateurs de puissance [[hal-02448462](#)], [[hal-02448153](#)]. La faisabilité des solutions proposées a été prouvée via le développement d'un banc d'essai à base de radio logicielle [[hal-02448157](#)]. Dans le cadre d'une collaboration avec l'Algérie (thèse de Khaled Tahkoubit), nous avons proposé une autre approche pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes utilisant des formes d'onde multi-porteuses. Cette solution modifie l'architecture de la chaîne RF en amplifiant le signal via plusieurs amplificateurs de puissance, assurant des performances au moins égales aux schémas classiques, mais avec une consommation énergétique réduite [[hal-02448264](#)], [[hal-03348942](#)]. Le déploiement de systèmes MIMO massif nécessite l'utilisation de transmetteurs à faibles coûts et économes en énergie. Ces transmetteurs peuvent présenter des imperfections, en particulier liées à l'utilisation d'amplificateurs de puissance bas de gamme. Dans le cadre du projet Marie Skłodowska-Curie Individual European Fellowship (Rafik Zayani et Daniel Roviras), différentes solutions ont été proposées pour améliorer l'efficacité énergétiques des systèmes MIMO massif [[hal-02447523](#)] [[hal-02448151](#)].

Localisation

Grâce à l'émergence croissante de l'Internet des Objets et à l'importance de l'information de position dans ce contexte, la localisation attire de plus en plus d'attention dans la communauté scientifique. La localisation outdoor est assurée par le système GNSS dont les signaux ne sont pas accessibles en intérieur rendant cette solution inexploitable dans de tels environnements. Plusieurs techniques de localisation indoor ont été proposées offrant des avantages et des inconvénients. Les méthodes existantes sont des méthodes géométriques ou des méthodes par empreinte radio (fingerprinting). Nos travaux ont pour objectif d'améliorer les techniques de localisation existantes tout en maintenant une précision de localisation satisfaisante avec une faible complexité de calcul. Pour la trilatération, elle a été combinée avec un processus d'optimisation qui vise à compléter la matrice de distances inter-nœuds à partir des données partiellement connues

[[hal-02445622](#)]. En ce qui concerne le fingerprinting, nous l'avons exploité pour développer des systèmes de localisation pour une architecture IoT centralisée. Une étude comparative entre les différentes métriques d'évaluation de similarité [[hal-02451683](#)]. Cette étude a été suivie par le développement d'un modèle linéaire générant une relation mathématique qui relie les puissances du signal reçues par un objet à ses coordonnées [[hal-02445612](#)]. Cela aide à diminuer la complexité de calcul en ligne et adapter notre système au temps réel. Cela est assuré aussi par le développement d'un modèle Convolutional Neural Network (CNN) qui traite le problème de localisation comme un problème de classification d'images radio [[hal-02445617](#)]. Ce travail a fait l'objet de la thèse de Wafa Njima.

Les méthodes de fingerprint utilisant le RSS comme empreinte radio souffre d'une dégradation importante des performances due à la dynamique de l'environnement de propagation. L'information sur l'état du canal, Channel State Information (CSI) de la couche physique, qui indique la qualité du canal au niveau de plusieurs sous-porteuses orthogonales, est capable d'apporter des informations spécifiques à l'emplacement plus riches pour les empreintes RSS en intérieur. Cette structure complexe de CSI conduit inévitablement à une complexité de calcul accrue pour la mise en œuvre pratique de la localisation. En outre, l'environnement intérieur complexe peut également générer des signatures radio similaires parmi certains points de référence prédéfinis, qui peuvent être distribués de manière aléatoire dans la zone d'intérêt, altérant ainsi la précision de la cartographie de localisation. Deux systèmes d'empreintes de localisation en intérieur basés sur CSI ont été proposés, à savoir EntLoc [[hal-02444914](#)] et AngLoc [[hal-02444920](#)]. Ce travail a été mené dans le cadre de la thèse de Luan Chen.

Les technologies de communication dédiées à l'IoT offrent également un bon support de localisation de par leurs caractéristiques longue portée. Des travaux ont également été entamés dans le cadre d'une collaboration avec le CNAM du Liban utilisant la technologie LoRa [[hal-03952506](#)]. La technologie Bluetooth Low Energy (BLE) commence également à être investiguée dans le cadre de la thèse de Maria Camila Molina [[hal-03956848](#)].

Axe "Sûreté de fonctionnement de systèmes dynamiques"

Durant la période 2017-2022, les activités de recherche de cet axe se situent dans le domaine de l'automatique. Elles sont consacrées essentiellement à la commande robuste des systèmes dynamique, à la commande prédictive, au diagnostic de défauts, au pronostic et à la commande tolérante aux fautes.

Capteurs logiciels et observateurs ensemblistes

Les systèmes que nous étudions nécessitent un modèle mathématique décrits par des équations différentielles ordinaires dont les grandeurs (l'état) représentent l'évolution des phénomène en jeu. L'ensemble des informations disponibles au cours du temps sur l'état du système est fourni par des capteurs physiques. A partir de cette modélisation et des informations mesurées, l'un des objectifs de nos études est de reconstruire l'état actuel du système à l'aide des informations partielles disponibles.

Dans ce contexte, une classe d'algorithmes d'estimation en temps réel a été particulièrement étudiée ces dernières années, il s'agit des observateurs dynamiques (des capteurs logiciels). Ces derniers fournissant une estimation obtenue par intégration d'un système dynamique. Un tel algorithme ne peut exister que si les mesures fournies par des capteurs physiques contiennent suffisamment d'informations pour déterminer l'état du système (propriété structurelle d'observabilité). Le cœur de nos recherches porte en particulier sur la construction d'observateurs ensemblistes. Un observateur ensembliste est un système dynamique auxiliaire fournissant un intervalle dans lequel se trouve l'état. Les observateurs ensemblistes donnent la possibilité de considérer le cas où le système

considéré est soumis à des perturbations et à bruits importants. Cette approche s'avère efficace dans le cadre de la commande robuste de systèmes dynamiques incertains et du diagnostic de défauts.

Les travaux que nous avons effectués sur ce sujet ont donné lieu à de nombreuses publications dans des revues de référence et présentés dans des conférences du premier rang du domaine. Dans le cadre du projet post-doc DIM RFSI-ONERA de T. Chevet : nous avons proposé, dans un premier temps, des outils pour des systèmes à entrées inconnues (systèmes linéaires à paramètres variants [hal-03239385], [hal-03332064] et systèmes descripteurs [hal-03332068] [hal-03239436], à temps continu et à temps discret). Ensuite, nous avons considéré des systèmes décrits par un modèle de Fornasini-Marchesini (appelé système bidimensionnel ou 2D) [hal-03550645] [hal-03239436] et une approche de construction d'observateurs itératifs [hal-03595002] [hal-03659338] développée dans le cadre d'une collaboration avec Prof. Andreas Rauh de l'université d'Oldenburg. Dans le cadre des thèses de G. Marouani et de C. Zammali, des observateurs ensemblistes pour des systèmes à commutation ont été construits [hal-03762561], [hal-02434041], [hal-03023667], [hal-02434053], [hal-03346702], [hal-02466808], [hal-02490939], [hal-02466780], [hal-02466800] avec des applications à la détection de défauts [hal-03418563], [hal-03649852], [hal-03874705], [hal-03781918], [hal-02894762], [hal-02490954], [hal-02496648], [hal-02896416], [hal-02903636] et à des machines électriques. Par ailleurs avec différents partenaires, nous avons développé un observateur dit exact pour une famille des systèmes à commutation linéaires et non linéaires à temps discret [hal-03770971] [hal-02433998] ; des observateurs ensemblistes d'ordre complet et réduit pour des systèmes linéaires [hal-03346716], non linéaires [hal-02903636] [hal-03113667] [hal-03239489], systèmes Takagi-Sugeno [hal-02614999] [hal-02434057], [hal-02516094], systèmes cyber-physiques [hal-03790972]...

Commande robuste - commande prédictive

En plus des capteurs logiciels et des observateurs ensemblistes, nous avons proposé une commande robuste par mode glissant pour une famille de systèmes d'ordres fractionnaires [hal-02433993] et étudié une loi de commande « hands-off » [hal-03418562] pour stabiliser asymptotiquement un système non linéaire issu de la quantification d'entrée. Une nouvelle technique de stabilisation dans un temps prédéfini pour des systèmes non linéaires et cyber-physiques basée sur des fonctions de Lyapunov scalaires et vectorielles est en cours d'étude et a abouti à des résultats préliminaires [hal-03814390] [hal-03917921]. Ces travaux de recherche considèrent également le développement de techniques de commande prédictive en présence d'incertitudes bornées. Cette thématique est développée dans le cadre d'une collaboration avec l'Inria et avec Xidian University ([hal-03054206] [hal-03385020] [hal-03297175]). Elle a également été étudiée dans la thèse de F. Falconi (thèse Cifre) pour répondre à des préoccupations industrielles de notre partenaire Schneider Electric.

Axe "Implémentation temps réel"

L'équipe LAETITIA a réalisé plusieurs implémentations temps réel des algorithmes et solutions qu'elle propose. Les solutions retenues sont en général basées sur des architectures à base de FPGA. Durant la période écoulée, l'équipe a ainsi été impliquée dans la mise au point des démonstrateurs et prototypes.

Dans le cadre du projet RAPID financé par la DGA DOREDO (PME CISTEME, le laboratoire Lab-STICC de l'ENSTA Bretagne et le CNAM), nous avons réalisé la partie système embarqué à base de FPGA d'un radar anticollision embarqué sur un drone [hal-03959871]. Dans le cadre du projet de métrologie européen LaVA qui consiste à localiser avec une bonne exactitude ($50 \mu\text{m}$) la position d'un objet dans une pièce, nous avons réalisé la partie électronique numérique des télémètres laser [hal-03349168] [hal-02448852]

Nous avons participé au projet de métrologie FIRST-TF SESH0 avec le SYRTE de l'Observatoire de Paris dont l'objectif est de réaliser une horloge optique atteignant une stabilité extrême en 1 seconde. L'équipe LAETITIA a réalisé la maquette FPGA permettant l'asservissement des lasers du système. Dans le cadre d'un contrat de prestation de recherche avec NOKIA Bell Labs nous avons proposé et validé une architecture hardware fonctionnelle permettant l'acquisition, le transfert et le traitement de données de "sensing" provenant d'une fibre optique excitée mécaniquement. L'objectif était de permettre un temps de traitement qui s'approche du temps réel. Finalement, dans le cadre du projet ANR WONG5, nous avons réalisé un démonstrateur utilisant des USRP afin de mesurer l'impact de la non-linéarité des amplificateurs sur des formes d'onde de type CP-OFDM, WOLA-OFDM et BF-OFDM.

3.5.2. Profil d'activités liées à la recherche

Activités (100 points répartis sur 7 items)	
Administration et animation de la recherche	10
Aide aux politiques publiques et expertise technique	0
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	15
Dissémination de la recherche	10
Recherche et encadrement de la recherche	60
Valorisation, transfert, innovation	5
Autre activités	0

En plus des activités principales de recherche, d'encadrement de la recherche et de dissémination de la recherche, l'équipe Laetitia a participé à la gestion de projets collaboratifs, déposé plusieurs brevets et fait du transfert technologique (thèses CIFRE et contrats industriels). Elle a également mis en place un master recherche international.

3.5.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Le comité d'experts recommandait à l'équipe LAETITIA de veiller à ce que ses résultats soient concrétisés par des réalisations diffusables et de mieux définir sa stratégie de valorisation des résultats. Durant cette période, nous avons mis en place une politique spécifique concernant le choix des publications. Nous nous sommes efforcés de publier dans les journaux les plus sélectifs des domaines du traitement du signal et des télécommunications (IEEE Transactions on Signal Processing, IEEE Transactions on Communications, IEEE Transactions on Vehicular Technologies, IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE Communications Letters, IEEE Wireless Communications Letters, Signal Processing, ...), de l'automatique (IEEE Transactions on Automatic Control, IEEE Transactions on Circuit and Systems II, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, IEEE Systems Journal, IEEE Control Systems Letters, Automatica, ...) et de l'électronique (IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements).

Concernant l'organisation et la vie de l'équipe, le comité d'experts recommandait à l'équipe de veiller à la bonne cohésion entre les trois axes notamment avec l'axe implémentation temps-réel. Dans la limite de nos capacités et de nos moyens, nous avons amélioré les synergies entre l'axe traitement du signal pour les télécommunications et l'axe implémentation temps-réel (projet ANR WONG5 sur les formes d'ondes post 5G). Les autres projets ANR en cours (Mésanges et Poséidon) ainsi qu'un projet ANR sur la localisation indoor récemment soumis vont également renforcer les interactions. Le recrutement d'un nouveau professeur du CNAM (Mathieu Moze) et d'un nouveau maître de conférences en électronique (Lounis Zeroul) devrait permettre également d'améliorer les travaux communs entre les axes sûreté de fonctionnement et l'axe implémentation temps-réel. Par ailleurs, la visibilité internationale de l'équipe a été significativement accrue durant la dernière période.

3.5.4. Introduction du portfolio

Les trois premiers éléments du portfolio sont des productions représentatives du positionnement scientifique de chacun des axes thématiques de l'équipe. Les deux derniers éléments démontrent les activités de l'équipe à destination du monde professionnel

Le portfolio de l'équipe LAETITIA est composé de :

1. Un article scientifique de l'axe traitement du signal pour les télécommunications sur la réduction du peak-to-average power ratio (PAPR) dans un système de communication MIMO, multi-porteuses et multi-utilisateurs. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet européen H2020 Marie Skłodowska-Curie IF fellow ADAM5 : R. Zayani, H. Shaiek and D. Roviras, "PAPR-Aware Massive MIMO-OFDM Downlink," dans IEEE Access, vol. 7, pp. 25474-25484, 2019, doi : 10.1109/ACCESS.2019.2900128. [[hal-02448151](#)]
2. Un article scientifique de l'axe sûreté de fonctionnement de systèmes dynamiques : W. Tang, Z. Wang, Y. Wang, T. Raïssi, Y. Shen, Interval Estimation Methods for Discrete-time Linear Time-invariant Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 64(11), 2019, doi : 10.1109/TAC.2019.2902673. [[hal-02467321v1](#)]
3. une note descriptive relative aux travaux de l'axe implémentation temps-réel en lien avec l'implémentation d'algorithmes sur des architectures à base de FPGA. Cette note décrit nos contributions dans le cadre du projet RAPID supporté par la DGA intitulé DOREDO (Détection d'Obstacles par Radar Embarqué sur DrOne) et dont les partenaires sont la PME Cisteme et le laboratoire Lab-STICC de l'ENSTA Bretagne. Un article a été présenté lors des journées ENVIREM 2022 : P. Morgand, S. Reynaud, A. Khenchaf , C. Christophe, A. Disserand, et al., "Détection d'obstacles par radar embarqué sur drone", envirem, onera, Oct 2022, Palaiseau (91), France.
4. une note descriptive sur le projet ANR WONG5, l'un des quatre projets ANR dans lesquels l'équipe LAETITIA a été impliquée durant cette période. Le projet WONG5 portant sur les formes d'onde pour les communications machine to machine en 5G a été piloté par l'équipe LAETITIA de 2016 à 2019 (autres partenaires : THALES, CEA Leti, CentraleSupélec).
5. une note descriptive de l'implication de l'équipe Laetitia dans le montage de projets industriels dans le cadre de la décarbonation des transports comme l'alliance Upcell, l'école de la batterie et le projet STAFFER. L'alliance Upcell est composée d'un groupe d'industriels et d'universitaires dans le domaine de la production de batteries électriques <https://upcell.org>.

3.5.5. Auto-évaluation de l'équipe

Domaine 3, production scientifique

D3 R1 – Production scientifique :

- La production scientifique de l'équipe repose sur des fondements théoriques et méthodologiques solides : nous avons privilégié les publications dans des revues de meilleures qualités plutôt que dans des grandes conférences internationales essentiellement en raison des difficultés de déplacement durant la période.
- Qualité des supports ciblés : nous nous sommes efforcés de publier dans les journaux les plus sélectifs des domaines du traitement du signal et des télécommunications (IEEE Transactions on Signal Processing, IEEE Transactions on Communications, IEEE Transactions on Vehicular Technologies, IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE Communications Letters, IEEE Wireless Communications Letters, Signal Processing), de l'automatique (IEEE Transactions on Automatic Control, IEEE Transactions on

Circuit and Systems II, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, IEEE Systems Journal, IEEE Control Systems Letters, Automatica, ...) et de l'électronique (IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements).

- Co-publications avec des partenaires du meilleur niveau international :

L'équipe a mené un grand nombre de collaborations avec des acteurs académiques et industriels de tout premier plan au niveau national – avec des chercheurs du Télécom Sud Paris, , CEA Leti, Inria, Onera, Thales, Orange Labs – et international – avec des chercheurs de l'université de Naples (Italie), Tampere (Finlande), Harbin Institute of Technology (Chine), Hangzhou Dianzi University (Chine), université d'Oldenburg (Allemagne), Ilmenau (Allemagne), université catholique de Louvain (Belgique), université d'Izmir (Turquie), université fédérale de Rio de Janeiro (Brésil), université fédérale de Santa Catarina (Brésil), université de Séoul (Corée), Kyushu Institute of Technology (Japon), Indian Institute of Technology (Inde) ...

D3 R2 – Production scientifique proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe et répartie entre ses personnels :

- La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe. Celle-ci est de très bon niveau sur la période avec en moyenne 19 publications par permanent. Environ 80% des publications de l'équipe sont de niveau Q1 ou Q2 ce qui montre un effort particulier de l'équipe à publier dans les conférences et revues scientifiques les plus reconnues de nos domaines de recherche.

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Reuves	106	29	14	3	2		
Conférences	20	74	35	0	4		
Chapitre						10	
Ouvrages						2	
Brevets							4

- La production scientifique n'est pas encore bien répartie de manière homogène entre les membres de l'équipe : en effet, si la moyenne de publications par permanent publiant est de 19, la médiane est égale à 9 montrant des disparités entre les membres de l'équipe.
- Les doctorants et post-doctorants participent activement à la production scientifique.
- Pour accompagner les jeunes chercheurs, l'équipe a essayé de généraliser le co-encadrement de thèses. Ceux-ci sont également impliqués dans des projets collaboratifs (projets inter équipe, projets ANR, ...).

Domaine 2, attractivité

D2 R1 Rayonnement scientifique :

- Invitations dans des institutions académiques ou des congrès internationaux Tarek Raïssi est professeur invité à Xidian University (Chine), programme "High-end Projects for Foreign Experts", 2018 – 2022 (1 mois par an). Séjours d'un mois en 2018 et d'un mois en 2019 à Xidian University. Interventions en distanciel depuis 2020 à cause de la crise sanitaire. Ce programme a été renouvelé en 2022 pour 4 ans. Tarek Raïssi a effectué deux séjours à Harbin Institute of Technology (Chine), 7 janvier 2018 - 22 janvier 2018 puis du 20 au 27 mai 2019.

Didier Le Ruyet a été récipiendaire "Pesquisador Visitante Especial" (special visiting researcher) du programme brésilien Sciences sans frontière (2014-2018 durée 4 ans). Il a

effectué deux séjours de cinq semaines en 2017 et 2018 à l'université fédérale de Santa Catarina (UFSC). Didier Le Ruyet est récipiendaire d'une bourse de mobilité internationale FAPJ (Fondation de recherche de l'état de Rio de Janeiro, Brésil)- Ambassade de France au Brésil en 2022-2023. Il a été professeur invité pendant deux mois à l'UFRJ de Rio de Janeiro (Novembre 2022-Janvier 2023).

Thach Ngoc Dinh a été chercheur invité au Department of Intelligent and Control Systems, Kyushu Institute of Technology, Japon (22 Février 2019-02 Mars 2019). Le séjour a été financé par Pr Hiroshi Ito dans le cadre d'une recherche collaborative à travers des séminaires et des discussions en automatique.

- Organisation des congrès internationaux majeurs et participation aux comités scientifiques de ces manifestations

L'équipe LAETITIA a participé à l'organisation des conférences suivantes :

La conférence International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) 2019, Oulu, Finlande (Didier Le Ruyet, general co-chair). Didier Le Ruyet est également membre du comité d'organisation de la conférence ISWCS depuis 2013.

Tarek Raïssi a été membre du comité d'organisation des conférences ICCAD'23, ICSC'2022), ICCAD'21, ICSC'2021, 16th IFAC Symposium on Control in Transportation et MSR 2021.

Thach Ngoc Dinh a été membre du comité d'organisation de la conférence MSR 2021 et membre du comité de programme de deux conférences d'IFAC COSY2022 et SSSC2022.

Depuis octobre 2020, Tarek Raïssi est co-fondateur et co-animateur du séminaire international «International Online Seminar on Interval Methods in Control Engineering» avec Andreas Rauh (Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Allemagne) et Zhenhua Wang (Harbin Institute of Technology). Le séminaire a lieu vendredi à 13h tous les 15 jours. Le 53ème séminaire a eu le 31 mars 2023. Les présentations sont disponibles sur <https://www.interval-methods.de/seminars>.

- Responsabilités éditoriales dans des revues et des collections de haut niveau

Pascal Chevalier est éditeur associé de l'EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking (JWCN) depuis 2003. Il est également Membre du Best Paper Awards Committee du journal JWCN de l'EURASIP depuis 2021. Didier Le Ruyet est éditeur associé de Journal of Communication and Information Systems (JCIS) depuis 2020.

Membre du comité technique de la société Eurasip (TAC) Signal Processing for Multisensor Systems SPMuS (Pascal Chevalier 2016-2022, Didier Le Ruyet 2022-2024)

Membre du comité technique IEEE Sensor Array and Multichannel (SAM) de la société IEEE Signal Processing (Pascal Chevalier 2015-2022, Didier Le Ruyet 2022-2025)

- Participation à des instances de pilotage de la recherche et d'expertise scientifique

Tarek Raïssi est président du conseil scientifique du CNAM depuis 2018.

Hmaïed Shaïek est membre du conseil scientifique du CNAM depuis 2022.

Pascal Chevalier a été évaluateur sur la période 2017-2022 pour l'ANR et l'ANRT.

Didier Le Ruyet a été évaluateur sur la période 2017-2022 pour l'ANR et le CEFIPRA et est membre du conseil d'évaluation de la recherche de l'ISEP.

- Prix, distinctions

Pascal Chevalier est membre émérite de la SEE

« IFAC Young Author Award » pour Elinirina Robinson (thèse soutenue le 10 octobre 2018) lors de la conférence Safeprocess'2018.

D2 R2 Attractivité :

— Post-docs, doctorants

Durant la période 2017-2022, 16 doctorants inscrits au Cnam ont soutenu leur thèse de doctorat. Ces thèses sont décrites dans le fichier des données de production du CEDRIC. Les membres de l'équipe LAETITIA ont également participé au co-encadrement de 7 doctorants inscrits à l'extérieur du CNAM :

- These de Titouan PETITPIED (thèse CIFRE THALES avec l'université de Bordeaux. Directeur de thèse : Guillaume Ferré. Co-encadrant : Pascal Chevalier) soutenue le 18/06/2021 : Faster-Than-Nyquist communication systems from single-carrier to multi-carrier signaling.
- Thèse de Khaled TAHKOUBIT (thèse du gouvernement Algérien avec l'université d'Oran. Directeur de thèse : Adda Belkacem Ali-Pacha. Co-encadrant : Daniel Roviras) soutenue le 31/03/2022 : Techniques for reducing imperfections in the RF chain for post 5G multi-carrier waveforms.
- Thèse de Wentao TANG (thèse du gouvernement chinois. Directeur de thèse : Zhenhua Wang. Co-encadrant : Tarek Raissi) soutenue le 29/04/2021. Titre : Set-membership estimation for discrete-time and its application to fault diagnosis.
- Thèse de Jitao (thèse du gouvernement chinois. Directeur de thèse : Zhenhua Wang. Co-encadrant : Tarek Raissi) soutenue le 24/09/2021. Titre : Interval estimation and fault detection for discrete-time linear parameter-varying systems.
- Thèse de Ghassen MAROUANI (thèse du gouvernement tunisien. Directeur de thèse : Hassani Messaoud. Co-directeur : Tarek Raissi. Co-encadrant : Thach Ngoc Dinh) soutenue le 13/05/2022. Titre : Observation et commande robuste des systèmes à commutation.
- Thèse de Naima SEHLI (thèse du gouvernement tunisien (convention de codirection entre l'ENIT et le Cnam). Directeur de thèse : Moufida Ksouri. Co-directeur : Tarek Raissi) soutenue le 14/06/2022. Titre : Contributions à l'estimation d'état et au diagnostic des systèmes à retard par approches ensemblistes.
- Thèse de Rogerio PEREIRA (thèse du gouvernement brésilien. Directeur de thèse : Aurélio Carlos da Rocha, UFSC, Florianopolis. Co-encadrant : Didier Le Ruyet) soutenue le 22/12/202 : Filter bank based waveforms for modern wireless communication systems

A cela s'ajoutent deux post-doctorants, Rostom Zakaria (2017-2018), Xiaotian Fu (2021-2022) et un ingénieur de recherche Benjamin Rablat (2022). L'équipe comprend actuellement 5 doctorants et 2 en Formation Continue et Validation des Acquis de l'Expérience (VAE).

— Chercheurs et enseignants-chercheurs sur poste permanent

Durant la période 2017-2022, 3 EC ont quitté l'équipe LAETITIA : Mylène Pischella (en détachement depuis janvier 2021), Ryad Zemouri (en disponibilité depuis 2022), Daniel Roviras (départ en retraite depuis septembre 2022). 3 EC ont été recrutés : Thach Ngoc Dinh (MCF arrivé en septembre 2017), Mathieu Moze (PR arrivé en septembre 2021), Lounis Zeroul (MCF arrivé en septembre 2022) permettant de renforcer sensiblement les axes "sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques" et "implémentation temps réel".

— Chercheurs et enseignants-chercheurs invités de renom

Bruno Sens Chang, MCF de l'université technique Fédérale du Paraná (UTFPR) : professeur invité en janvier-février 2018

Bartolomeu Uchoa Filho, Professeur de l'université Fédérale de Santa Catarina (UFSC) : professeur invité sept 2019

Aurélio Carlos Da Rocha, Professeur de l'université Fédérale de Santa Catarina (UFSC) : professeur invité janvier-mars 2021

Marcello L. R. de Campos, Professeur de l'université Fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ) : professeur invité janvier-mars 2022

Dany Merhej, Professeur au CNAM Liban : professeur invité en oct-déc 2021 et oct-déc 2022.

Jorge Davila, professeur des universités à National Polytechnic Institute of Mexico, professeur invité en mai – juillet 2018.

Zhenhua Wang, maître de conférences à Harbin Institute of Technology, professeur invité en octobre – novembre 2019

- Accueil, environnement et encadrement de qualité pour les post-docs, doctorants, chercheurs et enseignants-chercheurs : la plupart des doctorants et post-doctorants ont été recrutés dans un contexte de projets nationaux ou internationaux. Ces projets leurs permettent d'interagir avec des chercheurs issus du monde académique ou industriel. Ils disposent de financement pour l'achat de matériel et pour leurs missions.

D2 R3 Succès aux appels :

- Projets européens et internationaux :
 - Projet H2020 Marie Sklodowska-Curie IF fellow ADAM5 : "ADvanced multicarrier wAve-forms based Massive MIMO with full duplex capability for green 5G and beyond" (2018-2020).
 - Projet CAPES-COFECUB "New mathematical tools for future MIMO multi-users wireless communication systems" avec le Brésil (2014-2018)
 - Projet ECOS Nord Évaluation-orientation de la COopération Scientifique avec le Mexique : "Artificial Intelligence-based Control Approaches for Multiple Mobile Robots" (2021 – Avril 2025).
- Projets PIA :
 - PERSEUS : programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) 5G portant sur les réseaux cell-free MIMO massifs à faible consommation énergétique pour les fréquences sub-7GHz (2023-2027).
- Projets ANR : l'équipe a été impliqué dans quatre projets ANR sur la période.
 - ACCENT5 : projet sur les communications device to device pour les réseaux sans fil 5G (2015-2018). Les autres partenaires étaient THALES, TEAMCAST et Centrale-Supelec.
 - WONG5 : projet portant sur les formes d'onde pour les communications machine to machine en 5G (2016-2019). Ce projet était piloté par le CNAM. Les autres partenaires étaient THALES, CEA-LETI, Centrale-Supelec.
 - MESANGES : projet sur les surfaces intelligentes reconfigurables (2021-2024). Projet piloté par ORANGE. Les autres partenaires sont le CEA-LETI, IEMN Lille et IETR Rennes.
 - POSEIDON : projet sur l'étude et la mise en œuvre des réseaux sans fil Cell-Free massive MIMO (2022-2026). Projet piloté par le CEA-LETI. Les autres partenaires sont SI-RADEL et Centrale-Supelec.
- Autres appels à projets lancés par ses tutelles, les collectivités territoriales, des associations caritatives, etc
 - DOREDO : projet RAPID (Régime d'Appui à l'innovation Duale) de la DGA avec la PME CISTEME et le laboratoire LAB-STIC de l'ENSTA Bretagne (2020-2023)

PHC STAR : projet franco-coréen sur les techniques de voies de retour et formes d'onde avancées pour le MIMO massif (2016-2017)

PHC TASSILI ATOME5+ : Optimisation de l'efficacité énergétique des formes d'ondes multi-porteuses 5G+ (2019-2022) avec l'université de TLEMEN

DIM RFSI : Pronostic à base de modèles et commande tolérante aux dégradations pour les véhicules aérospatiaux (2020-2021) avec l'ONERA Palaiseau

Domaine 4 inscription des activités de recherche dans la société

D4 R1

- Relations partenariales pérennes avec les grands groupes, PME, jeunes pousses :
Dans le cadre des projets collaboratifs ANR nous avons des relations privilégiés avec des entreprises Thales, CEA-LETI, SIRADEL, TEAMCAST, ...). Dans le périmètre du contrat cadre entre le CNAM et Oranges Labs, l'équipe a fortement collaboré avec les chercheurs d'Orange (contrat de recherche externe, projets ANR, ...). Un doctorant CIFRE doit aussi être recruté à la rentrée 2023. Nous avons également eu un contrat de recherche avec Nokia Bell Labs.

Par ailleurs, nous avons encadré deux thèses CIFRE avec SCHNEIDER et PSA.

Pascal Chevalier exerce des activités de consulting pour Thales SIX GTS France (Expertises, Montage de projets, Encadrement, Brevets...). Permet également le développement du réseau et le co-encadrement de thèses externes au CNAM (CIFRE, CIFRE AID Defense...).

D4 R2

- Brevets licenciés, acceptés, déposés Sur la période, les membres de l'équipe ont participé au dépôt de 6 brevets :

Brevet (avec Thales) J-B Fraisse, P. Chevalier, S. Traverso, C. Delaveau, R. Gautier, "Procédés d'émission et de réception d'une communication sans fil étalée spectralement 'a forte efficacité spectrale potentielle et dispositifs associés", (FR073271) 2022

T. Petitpied, S. Traverso, P. Chevalier, R. Tajan, G. Ferré, "Procédé et Système pour Décoder des Communications au-dela de la cadence de Nyquist", (FR072373) 2019

F. Pipon, P. Chevalier, "Procédé et dispositif de multiplexage spatial de liaisons dans un réseau de communication", (FR1701265) 2017

Brevet (avec Orange Labs) Patrick Tortelier, Muhammad Moazam Azeem, Didier Le Ruyet, " System for transmitting data packets according to a multiple access protocol" (US20180270864), 2022

Brevet (CNAM uniquement) R. Zayani, H. Shaiek, D. Roviras, and K. Bulusu. "Method for conditioning a signal for amplification thereof, method for amplification, associated conditioning device and amplification device". PCT/FR2017/052845, Octobre 2017.

Une demande de brevet français a été déposée le 01/12/2021 par Maurice Bellanger sous le no 2112801, intitulée : "Procédé et système de transmission OFDM mettant en œuvre des signaux à enveloppe non constante et en quadrature". Une réponse au rapport de recherche préliminaire a été transmise à l'INPI le 14/12/2022.

D4 R3

- Actions de partage de la connaissance avec le grand public et le jeune public (collège, lycée, etc)

La 10ème édition de l'ouvrage "Traitement Numérique du Signal" de Maurice Bellanger a été publiée par Dunod en 2022. L'ouvrage a été réorganisé, avec des compléments et un nouveau chapitre sur les réseaux de neurones.

3.5.6. Trajectoire de l'équipe

Matrice SWOT

Forces	Faiblesses
<p>Expertise technique solide et reconnue dans les domaines scientifiques de l'équipe. Très bon niveau global des publications de l'équipe. Bonne interaction avec le monde académique national et international et industriel via des projets collaboratifs</p>	<p>Le départ à la retraite de plusieurs des membres de l'équipe dans les années à venir risque de fragiliser certains thèmes de recherche. Même si l'équipe est très active dans les projets collaboratifs français (ANR en particulier), sa participation à des projets européens reste à ce jour limitée. Manque de personnels ingénieurs pour pouvoir porter des projets collaboratifs ambitieux.</p>
Opportunités	Menaces
<p>Les domaines de recherche de l'équipe (télécommunications 5G, 6G, automatique/robotique, électronique numérique) sont des domaines dynamiques et stratégiques. Le recrutement de nouveaux enseignants-chercheurs pour remplacer les départs pourrait permettre de faire évoluer certaines thématiques de recherche.</p>	<p>Les charges d'enseignement et responsabilités administratives spécifiques au CNAM. Le nombre bien trop limité de contrat doctoraux nous oblige à chercher des financements par projet collaboratif et incite certains collègues à privilégier des collaborations informelles. La difficulté à recruter des doctorants malgré la mise en place d'un master international</p>

Prospectives

Axe "Traitement du signal pour les télécommunications"

Durant la période 2017-2022, l'équipe a contribué à la nouvelle génération des systèmes de communication cellulaire (5G, 6G) et en particulier aux communications radio non supervisées par le réseau comme les Machine Type Communications pour les applications civiles mais aussi militaires. Ces nouvelles normes concernent les communications personnelles mais impacte également l'industrie, les services, les transports, les villes intelligentes,... . L'équipe continuera à développer son expertise sur ces nouveaux types de communications à la fois par la détermination de nouvelles formes d'onde, de techniques d'estimation, de localisation et de traitement d'antennes, de gestion des interférences et des imperfections matérielles, d'algorithmes de traitement du signal pour augmenter l'efficacité spectrale et énergétique.

L'utilisation de nouvelles bandes de fréquences (de 100 GHz à 3 THz) implique de nouveaux défis comme la gestion des faisceaux des systèmes MIMO (stratégies de focalisation adaptatives pour le suivi individuel des mobiles), les corrections des imperfections matérielles et la mise en œuvre des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) pour améliorer l'accès radio et diminuer la consommation énergétique. Dans ce thème, nous participons au projet collaboratif MESANGES sur la mise en œuvre des RIS dans les bandes millimétriques.

L'utilisation de méthodes d'IA continuera à être investiguée en particulier pour la localisation, l'allocation de ressource, l'estimation de canal, l'optimisation des voies de retour et des chaînes de communications de bout en bout, ...

L'axe Massive MIMO et cell free MIMO est aussi un important sujet d'investigations de l'équipe. Dans le cadre du projet POSEIDON et d'un projet PEPR 6G nous étudierons les techniques de précodage, d'estimation de canal, d'échange partiel d'information et d'accès aléatoires pour les réseaux cell free MIMO.

Enfin nous poursuivrons nos travaux sur l'amélioration de la résilience des réseaux au niveau couche physique pour résister à des attaques variées et destructrices.

L'intégration de technologies de communications cellulaires et de technologies radar/lidar, tant sur les stations de base que sur les terminaux est un axe de recherche majeur. Dans ce thème, nous contribuerons aux formes d'ondes delay Doppler (OTFS, 2D-FFT-FBMC, ...) couplés à des algorithmes de traitement d'antennes et de localisation efficaces.

La production industrielle sera significativement transformée par les nouvelles générations de réseaux et le développement de l'Internet des objets Industriel (en anglais IIoT, Industrial Internet of Things). Nous prévoyons, en lien avec l'axe sûreté de fonctionnement de systèmes dynamiques de contribuer à l'intégration de la robotique industrielle fixe ou mobile et des communications, qui sera un des axes centraux de la 6G.

Ces perspectives vont aussi bénéficier du recrutement du nouveau Professeur du CNAM titulaire de la chaire Systèmes de Télécommunications en 2023.

Axe "Sûreté de fonctionnement de systèmes dynamiques"

Avec le recrutement récent de Mathieu Moze (professeur du Cnam) qui dispose d'une expérience de plus de 10 ans dans le secteur industriel (PSA), les activités de recherche en Automatique ont vocation à se rapprocher des entreprises du domaine (des collaborations existent déjà avec Schneider Electric). Des collaborations initiées ces dernières années seront amplifiées, notamment pour l'estimation de l'état de santé des batteries et le contrôle robuste de l'état de charge dans le cadre de l'alliance Upcell et en collaboration avec l'université d'Oldenburg (un projet ANR-DFG commun a été soumis en 2023).

Axe "Implémentation temps réel"

Durant la période écoulée, les activités de cet axe concernaient principalement l'implémentation d'algorithmes de traitement du signal pour les télécommunications et la métrologie. Ces implémentations permettent à la fois de démontrer la faisabilité de ces algorithmes et de mesurer la consommation d'énergie et les coûts en termes de ressources sur une plateforme de type FPGA. Sur la période à venir, l'équipe continuera sur cette même thématique, mais avec des applications dans trois domaines différents, à savoir l'internet des objets, les calculs parallèles pour l'IA et le traitement de signal pour les télécommunications. Les implémentations sur des plateformes à base de FPGA seront étendues aux plateformes à base de GPUs.

Pour accompagner les activités de recherche sur les algorithmes utilisés dans la localisation indoor de l'axe "traitement du signal pour les télécommunications", nous implémenterons les algorithmes afin de fournir la localisation des balises en temps réel et nous explorerons différentes formes d'ondes autres que le LoRa utilisée actuellement. Dans ce cadre, un projet ANR "HERBS" a été déposé et dont le but est de proposer une solution de localisation indoor pour les personnes aveugles ou malvoyantes.

L'explosion de l'utilisation de l'IA a fait naître un besoin grandissant pour les calculs parallèles. A ce titre, l'équipe mènera des travaux sur des architectures optimisées pour l'implémentation des réseaux de neurones sur FPGA. Ces travaux porteront notamment sur l'accélération de l'apprentissage et l'étude des types de synapses. Une thèse est en préparation sur ces sujets.

En complémentarité avec l'axe "traitement du signal pour les télécommunications", nous travaillerons sur l'implémentation des nouvelles formes d'ondes proposées. Ces activités concerneront aussi l'implémentation des algorithmes de traitements numériques pour la compensation des imperfections des modules de radiocommunication (PA), tel que la réduction du PAPR.

Dans le cadre d'un projet de diffusion et de vulgarisation de la culture scientifique, nous collaborons avec UNIVERSCIENCE (Palais de la Découverte et la Cité des Sciences et de l'Industrie) et avec l'équipe CEDRIC ILJ pour l'élaboration d'un démonstrateur d'un ordinateur à bille mécanique. Notre contribution portera sur la définition de l'architecture et la commande des organes mécaniques de cet ordinateur.

3.6. Autoévaluation de l'équipe OC

Composition de l'équipe au 31/12/2022

Permanents	
Responsable	Safia Kedad-Sidhoum (depuis Mai 2021) Christophe Picoulean (05/2018-04/2021), Marie-Christine Costa (jusqu'au 04/2018)
Emérites	Alain Billionnet, Marie-Christine Costa.
Profs Université	Cédric Bentz, Sourour Elloumi, Safia Kedad-Sidhoum et Christophe Picoulean
MCF	Zacharie Alès, Alain Faye (HDR), Amélie Lambert (HDR), Agnès Plateau, Daniel Porumbel et Eric Soutil
Non permanents	
Post-doctorant	Luca Mencarelli
Doctorants	Grégoire Beaudoire, Cristian Durán, Valentine Huré, Natalia Jorquera-Bravo, Anton Medvedev et Zoé Verchère
ATER	Valentin Bouquet

3.6.1. Thématiques scientifiques, enjeux et résultats

Les travaux de l'équipe OC s'inscrivent dans le domaine de l'optimisation mathématique et de la théorie des graphes, à la frontière de l'informatique et des mathématiques. Ils se déclinent d'une part en avancées théoriques et méthodologiques et d'autre part en résolutions efficaces de problèmes classiques et réels de Recherche Opérationnelle (RO). Nous détaillons dans ce qui suit les grands thèmes développés dans l'équipe en citant les principales contributions, publications et collaborations scientifiques associées.

Aspects théoriques et méthodologiques

A - CONCEPTION DE MÉTHODES POUR L'OPTIMISATION MATHÉMATIQUE

Cette thématique couvre les travaux relevant de l'optimisation linéaire et non-linéaire en variables bivalentes, entières et continues. Nos travaux de recherche dans ce thème visent à proposer des méthodes efficaces de résolution exacte de problèmes difficiles. Pour ce faire, nous proposons des méthodes mathématiques de reformulation en des problèmes plus simples, de décomposition en plus petits problèmes, de projections et d'approximations par des relaxations. Ces méthodes nous permettent de construire des algorithmes de résolution avec des temps de calcul réduits permettant ainsi de déterminer des solutions optimales ou garanties proches d'une solution optimale de problèmes pour lesquels ce type de solutions était inaccessible. Ces résultats sont validés par des expérimentations sur des jeux de données de benchmark développés par notre communauté scientifique.

Dans la période 2017-2022, nous avons approfondi nos travaux sur les problèmes quadratiques (mettant en jeu des polynômes de degré 2) en variables binaires et nous les avons étendus au cas où les variables peuvent être entières ou continues d'une part et aux problèmes polynomiaux de degré quelconque d'autre part, enrichissant encore l'ensemble des problèmes non linéaires pouvant être abordés. Nous disposons ainsi de méthodes très générales puisque nombre de problèmes d'optimisation, théoriques et pratiques, peuvent se formuler dans ce cadre. En particulier, nous avons poursuivi la recherche de « bonnes » reformulations quadratiques dont les relaxations sont convexes, une approche particulièrement efficace introduite

dans notre équipe. Ces relaxations, le plus souvent semi-définies positives [hal-01811322], sont généralement « faciles » à résoudre contrairement aux relaxations du problème initial. Nous avons également travaillé sur la résolution efficace des relaxations. Nous avons ainsi développé un algorithme fondé sur la dualité lagrangienne qui permet de résoudre des relaxations semi-définies positives de grande taille [hal-01811329]. Un des résultats saillants du travail sur les polynômes est qu'il a permis la résolution, à l'optimalité et en un temps de calcul raisonnable, de plusieurs instances non encore résolues de la littérature (thèse A.Lazare [hal-01872996v4], [hal-02455410]). De nouvelles inégalités pour les problèmes quadratiques en variables mixtes ont été proposées permettant d'améliorer encore leur résolution [hal-03016403]. Par ailleurs, nous avons développé une méthode originale pour obtenir une convexification fidèle d'une fonction non-convexe f . Au lieu d'une seule fonction quadratique convexe g , nous avons proposé une famille g_1, g_2, g_3, \dots et écrit un algorithme itératif qui les ajoute une par une de façon à obtenir une fonction convexe quadratique par morceau [hal-04101939v1]. Enfin, pour la résolution de programmes linéaires comportant un très grand nombre de contraintes, nous avons proposé une méthode originale améliorant les méthodes usuelles de plans coupants. Notre méthode utilise une approche par projection [hal-02542667] et son efficacité a été prouvée pour la génération de colonnes et la décomposition de Benders [hal-02454262].

B - ROBUSTESSE ET OPTIMISATION DANS L'INCERTAIN

L'équipe a élargi ses activités autour de l'optimisation robuste qui consiste à déterminer des solutions « satisfaisantes » lorsque les paramètres incertains prennent les valeurs les plus défavorables. Dans ce cadre, une nouvelle approche avec l'objectif de minimiser la distance entre les solutions implémentées avant et après fixation des paramètres incertains a été proposée. Nous avons également mis en évidence des classes de problèmes pour lesquelles un pire scénario est nécessairement obtenu sur un des points extrêmes de l'enveloppe convexe de l'ensemble des scénarios [hal-03753311v1].

Nous avons par ailleurs exploré différentes notions de robustesse, d'une part en la considérant comme une contrainte avec un objectif de minimisation de coût ou comme un objectif avec ou sans contraintes de coût, d'autre part en considérant le « pire des cas » ou la recherche d'un « cas moyen » qui s'apparente à une approche multi-critères. L'idée est alors de chercher une solution de compromis entre ces approches [hal-04094153].

La méthode originale à base de projection et de plans coupants citée plus haut a été adaptée avec succès à la programmation linéaire robuste [hal-03941093v1], avec une application spécifique pour des problèmes de découpe [hal-03715458v1].

D'autres travaux ont été menés sur les méthodes de programmation stochastique multi-étapes utilisables lorsque les lois de distribution des paramètres incertains sont connues. Les approches de décomposition exactes développées s'appuient sur un nouvel ensemble d'inégalités d'arbres obtenues en combinant des inégalités valides connues pour chaque scénario individuel de l'arbre de scénarios représentant la structure des paramètres incertains (thèse F. Quezada) [hal-02470310].

Concernant la programmation distributionnellement robuste (DRO), en considérant la métrique de Wasserstein (WDRO), nous avons montré que pour un problème d'optimisation combinatoire où seule la fonction de coût est affectée par les incertitudes, la contrepartie WDRO d'un problème polynomial reste polynomiale [hal-03595342].

Plus récemment, dans le cadre d'une collaboration avec le CERMICS (thèse A. Medvedev), des travaux visant à recourir aux méthodes robustes multi-étapes, dans le cadre de l'adaptabilité finie sont menés.

C - RECHERCHE OPÉRATIONNELLE, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET APPRENTISSAGE

Nous nous sommes intéressés dans le cadre de différents travaux, à l'utilisation de techniques

d'intelligence artificielle pour renforcer la résolution de problèmes d'optimisation discrète mais également à l'apport des techniques d'optimisation mathématique pour améliorer la qualité de prédiction et d'interprétabilité des arbres de classification.

Pour renforcer les stratégies de résolution de problèmes répétés d'optimisation en nombres entiers dans le cadre de la production d'énergie dans des micro-grids et des vallées hydrauliques, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de techniques d'apprentissage (thèse M. Ethève). La résolution des problèmes étudiés est effectuée par des algorithmes de branch-and-bound dans lesquels des décisions heuristiques doivent être prises, notamment le choix du prochain sommet sur lequel brancher et le choix de la prochaine feuille à considérer. La répétition journalière de ces problèmes a été mise à profit par le biais de méthodes d'apprentissage automatique afin de permettre un choix efficace de ces décisions par la réduction de la taille de l'arbre de résolution [[hal-02987320v1](#)]. Des travaux portant sur des modèles d'optimisation non-linéaire pour la construction d'arbres de décision sont actuellement menés. Ils portent en particulier sur de nouvelles formulations ayant de meilleures valeurs de relaxations continues que les modèles existants, la construction d'algorithmes de regroupement pour accélérer la résolution des modèles ainsi que l'introduction de règles de séparation non linéaires dans les arbres de décision (thèse V. Huré).

D - GRAPHE ET OPTIMISATION

Les graphes constituent un objet mathématique fondamental de la RO et l'équipe s'intéresse à des problèmes connus suffisamment généraux pour modéliser de nombreuses situations concrètes, comme la recherche de couplages ou d'arbres de Steiner optimaux. La liste exhaustive est donnée dans la section suivante. Nous avons étudié la « robustesse » d'un graphe, c'est-à-dire la variation de la valeur d'une solution ou de propriétés structurelles (comme la connexité), selon trois types de modifications élémentaires, ajout ou suppression d'arêtes ou de sommets, et contraction d'arêtes. Les résultats obtenus dépendent du type de graphes concernés (orientation, planarité, en arbre, avec ou sans graphes induits spécifiques) et des valeurs de paramètres qui peuvent être fixés ou non (thèse V. Bouquet). Nous avons ainsi obtenu des résultats de complexité comme la NP-complétude du couplage parfait déconnectant obtenu en adaptant une preuve de la littérature [[hal-03596180](#)]. D'autres travaux ont fourni une analyse structurelle des solutions, avec par exemple la détermination de sommets (ou arêtes) présents ou absents de toute solution optimale [[hal-02434684](#)], ou la mise en évidence d'un nombre limité de « squelettes » de solutions, ce qui permet d'accélérer la recherche d'une solution optimale en rejetant des solutions dont le squelette n'est pas admissible [[hal-02967013](#)]. Nous avons également donné des conditions suffisantes pour qu'une séquence de nombres entiers corresponde aux degrés de certaines classes d'hypergraphes uniformes [[hal-02958798](#)] (collaboration avec les universités de Florence et Sienne).

Domaines d'application

E - OPTIMISATION DE RÉSEAUX

Nous avons travaillé sur deux problèmes génériques liés aux réseaux. Nous avons amélioré significativement les résultats de l'état de l'art pour la résolution de problèmes de localisation p -médian à l'aide d'une décomposition de Benders particulièrement efficace (thèse C. Duran) [[hal-03450829v3](#)]. D'autre part, de nouvelles formulations, une étude polyédrale ainsi qu'une comparaison théorique des valeurs de relaxations linéaires ont permis de développer un algorithme de branch-and-cut permettant de résoudre efficacement le problème de k -partitionnement [[hal-03428695v1](#)].

Concernant les applications réelles, en collaboration avec RTE, un algorithme de résolution exacte a été développé pour déterminer un flux de puissance optimal (OPF) en différents

points d'un réseau électrique qui minimise le coût de production tout en respectant les lois de la physique [[hal-02065034v2](#)] (thèse H. Godard). Nous avons également recherché où déployer un nombre minimal de capteurs pour la collecte de données en milieu hostile, dans des réseaux sans fil, sous la double contrainte de couverture du terrain par les capteurs (aspect domination), et de transmission des données recueillies (aspect connexité) [[hal-03189488](#)] (thèse S. Marie). Enfin, nous avons des résultats portant sur la détermination des lignes de transmission de coût minimal à installer sur un réseau pour permettre à une source d'émettre des données vers un ensemble de clients, en utilisant une approche de décomposition de Benders [[hal-02454262](#)].

F - DÉVELOPPEMENT DURABLE ET BIODIVERSITÉ

Dans le domaine de l'énergie, différents problèmes ont été abordés. Des méthodes ont été développées pour la gestion optimale des ressources de stockage dans les réseaux télécoms pour minimiser la facture énergétique en participant aux marchés de l'effacement (thèse I. Faria) [[halshs-03472030](#)]. Des travaux récents s'intéressent à l'optimisation et à l'allocation équitable de sources d'énergies vertes (thèse N. Jorquera).

En collaboration avec EDF et le RIKEN (Tokyo), nous avons recherché un câblage robuste de coût minimal pour un parc éolien. Cela revient à chercher un réseau de Steiner robuste de coût minimal dans un graphe donné, qui doit relier une source à un ensemble de points terminaux fixés, tout en respectant des contraintes de capacités sur les arêtes. Nous avons comparé de façon théorique différents modèles (bi-niveau, coupe, et flot) et proposé un algorithme résolvant des problèmes de taille réelle [[hal-04094153](#)]. Nous avons également montré comment prendre en compte des contraintes électriques de load-flow qui sont par essence non linéaires [[hal-02967066](#)] (thèse T. Ridremont).

Dans le domaine de la biodiversité, les travaux concernent essentiellement la conception optimale de réseaux d'aires protégées, une des stratégies efficaces de lutte contre l'effondrement de la biodiversité. Nous avons développé des modélisations innovantes de ces problèmes, apparus récemment, permettant de les résoudre efficacement dans le cadre de la programmation mathématique [[hal-03190493](#)]. Nous avons en particulier développé des approches originales, fondées sur les notions de probabilité et de robustesse, permettant de prendre en compte l'inévitable incertitude concernant les bénéfices écologiques procurés par l'établissement d'ères protégées, en particulier due au changement climatique [[hal-02465077](#)], [[hal-02465032](#)], [[hal-04093592](#)].

Nous avons également proposé une mesure de l'évaporation des lacs en considérant seulement trois variables météorologiques : la température, l'humidité relative, et le point de rosée en utilisant un modèle de régression non linéaire. Une formule de Penman simplifiée fournit une estimation du taux d'évaporation du lac. Notre méthode a été appliquée sur le lac Qaraoun – Liban et le modèle de régression a montré une grande précision [[hal-02466614](#)].

G - ORDONNANCEMENT ET PLANIFICATION

Les travaux réalisés pour la résolution du problème d'ordonnancement minimisant la déviation autour d'une date d'échéance commune s'inscrit dans ce cadre. Nous avons proposé des contributions originales qui introduisent des formulations compactes et non-compactes avec des caractérisations polyédrales pour certaines d'entre elles ainsi que des inégalités basées sur des notions de dominance qui ouvrent des perspectives intéressantes pour la résolution d'autres classes de problèmes d'ordonnancement (thèse A.E. Falq) [[hal-03141158](#)].

Un autre résultat remarquable obtenu dans le domaine du lot-sizing concerne la résolution du problème central sans contraintes de capacité avec incertitudes qui apparaît dans de nombreux problèmes de planification. Un algorithme de type SDDiP (extension SDDP pour le cas discret) a été proposé, celui-ci s'est avéré nettement plus performant que les méthodes

connues pour la résolution d'instances de grande taille de la littérature pour ce problème (thèse F. Quezada) [[hal-03606367v1](#)].

Des modèles nouveaux et non-standards de problèmes complexes de lot-sizing s'appuyant sur des analyses théoriques et expérimentales ont également été proposés dans le cadre des travaux de thèse de M. Charles [[hal-03962327](#)].

En collaboration avec la SNCF, nous avons étudié deux problèmes de planification ferroviaire. D'une part, un ordonnancement robuste du matériel roulant visant à minimiser les coûts d'adaptation par rapport à un ensemble donné de changements potentiels, pour un nombre discret de scénarios (thèse R. Lucas) [[hal-02428735v1](#)]. D'autre part, des solutions robustes ont été proposées pour l'affectation de quais aux trains par l'apprentissage de paramètres de lois statistiques mesurant les petits retards d'arrivées de trains en gare (thèse M. Millet en collaboration avec l'équipe MSDMA) [[hal-02473719](#)], [[hal-02473718](#)].

Nous avons également étudié la planification des arrivées d'avions garantissant des conditions sécurisées d'atterrissage [[hal-03040102](#)].

Enfin, nous avons traité la planification de courses de chevaux, avec l'objectif de maximiser le nombre total de chevaux partants sur l'année, tout en respectant des contraintes plus ou moins « dures » (thèse A. Houdayer). Les paramètres mesurant l'attractivité des courses sont déterminés par machine-learning et nous avons allié la programmation mathématique à des métaheuristiques [[hal-03958241](#)]. Un logiciel développé pour les courses hippiques de plat premium est utilisé par France-Galop [[hal-02475132](#)].

H - PROBLÈMES GÉNÉRIQUES DE GRAPHS

Ces travaux ont été menés en collaboration avec des laboratoires de recherche de Montréal, Lausanne, Fribourg, Durham, Istanbul, Koper ainsi que le Lamsade et le Lip6 (Paris).

Nous avons étudié de façon approfondie la recherche d'un arbre de Steiner de longueur totale minimale, sous contraintes de capacités, et proposé de nouveaux résultats (complexité, approximation ou algorithmes) pour toutes les combinaisons de valeur des paramètres considérés (type de graphes, capacité, etc). Nous avons également mis en évidence une relation forte avec la recherche de chemins disjoints [[hal-02967013](#)].

Concernant les problèmes de « robustesse » cités précédemment, nous avons montré que lorsque le paramètre est l'augmentation d du diamètre du graphe, le problème est polynomial pour $d = 3$ et NP-complet $d \geq 4$ [[hal-03107522](#)]. Des résultats similaires ont été obtenus pour le couplage parfait et la couverture par cycle [[hal-01829546](#)], [[hal-02436792](#)], l'hamiltonicité [[hal-02434695](#)], pour le nombre chromatique [[hal-02436807](#)], [[hal-02436808](#)], le nombre de domination [[hal-03299625](#)] et de coupes [[hal-02995237](#)] (thèse de V. Bouquet). Nous avons montré que le problème du dominant était polynomial dans certaines classes de graphes [[hal-02448239](#)] et NP-complet dans d'autres [[hal-02493931](#)]. Nous avons montré que certaines classes de graphes peuvent être partitionnées en respectant un seuil (nombre de voisins intégrés dans la partie de chaque sommet) [[hal-02907108](#)]. Enfin nous étudions des problèmes d'étiquetage de graphes [[hal-02436800](#)].

Animation scientifique de l'équipe

L'équipe au complet se réunit 3 fois par an environ pendant une demi-journée pour des présentations et discussions scientifiques auxquelles participent les doctorants. Par ailleurs, un créneau récurrent mensuel est réservé pour une réunion de permanents pour traiter des questions d'organisation et des décisions à prendre concernant les aspects budgétaires, profil de postes, participations à des congrès, dépôts de projets, proposition de sujets de stages et de sujets de thèses, etc. Les collaborations sont nombreuses entre les membres de l'équipe et les thèses préparées y sont co-encadrées et associent pour la plus grande partie d'entre elles

des maîtres de conférences.

3.6.2. Profil d'activités liées à la recherche

Activités (100 points répartis sur 6 items)	
Administration et animation de la recherche	10
Aide aux politiques publiques et expertise technique	5
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	15
Dissémination de la recherche	10
Recherche et encadrement de la recherche	50
Valorisation, transfert, innovation	10

L'équipe est fortement impliquée dans les activités de recherche et d'encadrement (12 thèses soutenues sur la période), mais également dans les activités pédagogiques adossées à la recherche à travers le master MPRO dont elle porte la responsabilité. Une activité également notable de l'équipe est l'administration et l'animation de la recherche à travers les activités scientifiques d'une part du GDR-RO et d'autre part de la Roadef. La direction adjointe du laboratoire Cédric est assurée par un membre de l'équipe depuis 2021. L'équipe OC participe activement à la valorisation et à la dissémination de la recherche à travers différentes actions (cf. Domaine 4).

3.6.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Malgré l'évolution de la configuration de l'équipe depuis la dernière évaluation HCERES, la cohésion scientifique s'est pérennisée et l'équipe a su maintenir un très bon niveau d'activité scientifique, une visibilité nationale et internationale et de nombreuses collaborations.

La dispersion des axes thématiques suite au grand nombre de contrats ne s'est pas produite malgré le risque signalé par le comité. En effet, les thèmes issus des collaborations industrielles s'inscrivent naturellement dans les axes de recherche développés par l'équipe ou ont été l'occasion de faire naître des problématiques novatrices et porteuses par rapport à nos activités scientifiques.

Sur la période d'évaluation, deux HDR ont été soutenues (Cédric Bentz en 2017 et Amélie Lambert en 2021) et deux sont en préparation dont une prévue à l'automne 2023. Sur la période d'évaluation, il est à noter une arrivée PU (Safia Kedad-Sidhoum) en 2018, un départ à la retraite (Marie-Christine Costa) la même année, une arrivée MCF (Zacharie Alès) en 2017 et une promotion interne PU (Cédric Bentz) en 2022.

L'équipe a su maintenir son organisation interne et sa cohésion malgré sa recombinaison suite aux départs et arrivées de ses membres permanents depuis 2017. Un travail de restructuration du périmètre scientifique a été mené en 2021 pour actualiser et mieux préciser les thèmes scientifiques et collaboratifs de l'équipe.

3.6.4. Introduction du portfolio

L'équipe a constitué un portfolio comportant les 5 éléments suivants :

2 publications scientifiques :

- Sourour Elloumi, Amélie Lambert, Arnaud Lazare : « Solving unconstrained 0-1 polynomial programs through quadratic convex reformulation », J. Glob. Optim. 80, 231–248 (2021).

Travaux sur les problèmes d'optimisation polynomiaux en variables binaires : nouvelle méthode de résolution exacte des plus efficaces par rapport à l'état de l'art dans un contexte très compétitif. (Thème A).

- Cédric Bentz : « An FPT Algorithm for Planar Multicuts with Sources and Sinks on the Outer Face ». *Algorithmica* 81, 224–237 (2019).
Travaux qui ont permis l'identification d'un premier cas non trivial du problème de multicoûpe qui soit FPT vis-à-vis de nombre de paires sources-puits, en montrant qu'ajouter la condition que tous les puits et toutes les sources sont sur la face extérieure du graphe planaire est suffisant. Le principal ingrédient de l'algorithme FPT présenté est l'obtention d'une nouvelle caractérisation des solutions optimales du problème dans ce cas.
(Thème D).

1 co-production de recherche avec des acteurs non-académiques :

- Marc Etheve, Zacharie Alès, Côme Bissuel, Olivier Juan, Safia Kedad-Sidhoum : « Reinforcement Learning for Variable Selection in a Branch and Bound Algorithm », *Lecture Notes in Computer Science book series CPAIOR*, 176–185 (2020).
Travaux sur l'utilisation de techniques d'apprentissage par renforcement pour la sélection de variables dans les arbres de branch-and-bound pour résoudre des problèmes répétés d'optimisation notamment en planification des ressources énergétiques rencontrés chez EDF. Ces travaux sont bien identifiés au niveau international dans un contexte très concurrentiel à l'interface entre l'IA et la RO.
(Thème C).

1 élément d'implication à la formation à la recherche : MPRO Master Parisien de Recherche Opérationnelle (Responsabilité). Le master MPRO s'est imposé comme une formation de premier plan en recherche opérationnelle au niveau national. Cette formation repose sur un partenariat entre l'Institut Polytechnique de Paris (ENSTA, Polytechnique, TélécomParis, TélécomSud Paris), l'ENPC et l'ENSIIE. Le master aborde tout autant les aspects fondamentaux de la discipline avec les chercheurs impliqués dans la formation que ceux professionnels en lien avec les entreprises. Le master attire d'excellents étudiants qui trouvent facilement un emploi dans le domaine (carrières professionnelles et académiques).

1 contribution aux actions de valorisation et au développement socio-économique : Les ressources nécessaires à la protection de la biodiversité étant limités, il est nécessaire de les utiliser le plus efficacement possible. Ces travaux proposent des stratégies optimales concernant la protection de certaines espèces (avec comme critère la diversité phylogénétique) ainsi que la mise en place d'aires protégées et de corridors biologiques [[hal-03190493](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03190493)]. Expertise auprès de l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) au sein de la Commission Mondiale des Aires Protégées (WCPA, renouvellement 2021-2025).

3.6.5. Auto-évaluation de l'équipe

[Domaine 3] Production scientifique

	Pub. clas. ⁴				Pub. non clas.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Revue inter. à comité de lecture	40	11	3	1	2		
Conf. inter. avec actes	1 ⁵		7 ⁶				
Conf. inter. (avec sélect. sur résumé)					45		
Conf. natio. (avec sélect. sur résumé)					28		
Thèses et HDR					11		
Ouvrages						2	
Logiciels							5

[1] Selon le référentiel établi par le Cédric. [2] Classée A* dans CORE. [3] Deux « Best papers » (Codit'17 et Codit'19).

Les résultats publiés sont de nature fondamentale et appliquée, ce qui est reflété par le type de supports de publication et ce qui est en conformité avec la déclinaison des thématiques de recherche de l'équipe (Cf. DCP (onglet Publications)). Par ailleurs, la production scientifique de l'équipe est de très bon niveau et relativement bien répartie entre ses membres. Tous les membres (excepté un permanent), contribuent à la production scientifique de l'équipe, les jeunes chercheurs y sont également bien impliqués. Par ailleurs, l'équipe est engagée dans une démarche de diffusion en accès ouvert notamment à travers la publication de deux livres en accès ouvert [[hal-01568651](#)], [[hal-03190493](#)], la mise à disposition de programmes open-source [[hal-03179987](#)] et de benchmarks académiques [[hal-03268779](#)], [[hal-03184136](#)], [[hal-03184140](#)]. Quelques publications impliquent des chercheurs internationaux sur des travaux effectués lors de séjours invités dans l'équipe ou dans des universités à l'étranger.

[Domaine 2] Attractivité

[D2-R1] Rayonnement scientifique

1. Invitations à des sessions plénières et tutorielles : l'équipe OC bénéficie d'une bonne visibilité sur ses thématiques scientifiques tant au niveau international que national. Des membres de l'équipe sont régulièrement invités à présenter leurs travaux en sessions plénières dans des conférences internationales (EWG-LA 2022, CSMIO 2021, OPTIMA 2019, TORS 2018) et nationales (ROADEF 2020 et ROADEF 2018).
2. Organisation de congrès internationaux majeurs et participation aux comités scientifiques de manifestations scientifiques : les membres de l'équipe ont participé à l'organisation de congrès internationaux (IEEE-CODIT 2019, IWLS 2019 et CTW 2018), à des comités scientifiques et de programmes internationaux (EURO 2022, IEEE-CODIT 2019, SPARK 2020-2022, ICPP 2018, EUROPT 2021-2022 et IWLS 2018-2022, GECCO-ECOM 2017-2022, EVOCOP 2019-2022) ainsi qu'à des comités scientifiques nationaux (ROADEF 2017-2022, JGA 2017-2022). L'équipe a activement participé à l'organisation de la soirée dédiée à un événement important de la ROADEF « Indus'RO » à destination des industriels et entreprises du domaine en 2018 et en 2022 au Cnam.
3. Responsabilités éditoriales : l'équipe participe au comité éditorial d'une collection d'ouvrages en mathématiques et applications chez Springer depuis 2021.
4. Participation à des instances de pilotage de la recherche et d'expertise scientifique : un des membres de l'équipe est co-coordonateur d'un groupe de recherche international (EWG-Lot-Sizing) d'EURO (société européenne de recherche opérationnelle) depuis 2021. L'équipe participe également à l'organisation d'une compétition internationale ROADEF-EURO portée par un industriel sur une application de la recherche opérationnelle (Saint-Gobain en 2018, RTE en 2020 et Renault en 2022). L'équipe participe activement au pilotage de la recherche au niveau national notamment dans le cadre de la

coordination adjointe du programme PGMO depuis 2021, de la participation au conseil scientifique du CIRM depuis 2021, de la participation au bureau de la Roadef depuis 2022 et de la co-animation de plusieurs axes du GDR RO du CNRS depuis sa restructuration en 2020 (OPA, PMNL et CAGDO). Un des membres de l'équipe a participé au jury d'un prix de thèse au niveau international (EDDA) en 2022. Plusieurs membres ont été responsables de groupes de travail du GDR RO (GO jusqu'en 2020 et P2LS jusqu'en 2022) ou de la ROADEF (JFRO depuis 2017). Par ailleurs, un des membres de l'équipe a été membre du CNU en section 27 jusqu'en 2019.

5. Prix, distinctions : les travaux de l'équipe ont été récompensés de plusieurs prix. Amélie Lambert a été lauréate du prix Robert Faure (2e) de la ROADEF en 2022 et deux doctorants de l'équipe ont obtenu le prix du meilleur article pour la conférence IEEE-CODIT, Sylvain Marie en 2017 pour ses travaux en optimisation de réseaux de capteurs et Franco Quezada en 2019 pour ses travaux en programmation stochastique multi-étapes en lot-sizing.

[D2-R2] Attractivité

1. Post-doc et doctorants : durant la période 2017-2022, 12 doctorants ont soutenu leur thèse de doctorat, dont 10 à l'EDITE ou à SMI et 2 à l'EDMH. On peut compter également 2 thèses en co-encadrements extérieurs (à 50%), 1 à SU (Anne-Elisabeth Falq) et 1 à EMSE (Mehdi Charles). Le nombre de thèses soutenues est en forte augmentation par rapport à la période d'évaluation précédente (7 thèses soutenues). Par ailleurs, 6 thèses, démarrées avant fin 2022, sont actuellement en cours (3 SMI et 3 EDMH). L'équipe a accueilli 3 post-doctorants (Khadija Hadj Salem, Luca Mencarelli, Mohamed-Yassine Naghmouchi) (Cf. DCP (onglet Doctorants)).
2. Chercheurs et enseignants-chercheurs permanents : durant la période d'évaluation, 1 professeure (Safia Kedad-Sidhoum) est arrivée en 2018 ainsi qu'1 MCF (Zacharie Alès) en 2017. Ces deux arrivées renforcent l'expertise de l'équipe en programmation mathématique et optimisation combinatoire, notamment autour de la planification de production et de l'ordonnancement et des interactions avec le domaine de l'intelligence artificielle. Il est également à noter 1 promotion interne PU (Cédric Bentz) en 2022.
3. Chercheurs invités : au cours de la période d'évaluation, nous avons accueilli pendant deux mois en 2019, le professeur Jon Lee de l'université du Michigan ainsi qu'Andrea Frosini, chercheur de l'université de Florence en (2 semaines) et Anna Martinez de l'université de Valencia (1 semaine) en 2022. Par ailleurs, la qualité des recherches menées au sein de l'équipe est également attestée par des invitations de ses membres à faire des séjours dans des universités à l'étranger (Allemagne, Belgique, Italie).
4. Accueil, environnement et encadrement de qualité pour les post-docs, doctorants, chercheurs et enseignants-chercheurs : la grande majorité des post-doctorants et doctorants de l'équipe sont accueillis au sein de l'équipe dans le cadre d'un travail collaboratif permettant des interactions scientifiques élargies. Une gestion mutualisée des budgets permet le financement de l'ensemble des missions en conférences et/ou écoles ainsi que l'achat de matériel et logiciels nécessaires au bon déroulement des activités de recherche. L'équipe met également à disposition des ressources de calcul (dont 1 serveur avec des solveurs d'optimisation).

[D2-R3] Succès aux appels, projets

L'équipe participe régulièrement à des projets PGMO qui permettent d'établir et de renforcer des collaborations scientifiques au niveau national et international. Sur la période d'évaluation, on peut citer un projet terminé en 2018 avec le GERAD (Canada), deux

projets en 2020-2021, le premier avec l'ENPC et l'université de Montpellier et le second avec HEC Liège (Belgique) et RWTH Aachen (Allemagne), un projet en 2021-2022 avec EDF et enfin un projet démarré en 2022 sur une thématique émergente en optimisation combinatoire pour l'informatique quantique. L'équipe porte également un projet avec la DGA démarré en 2020 pour 3 ans, ainsi qu'un projet exploratoire du laboratoire CÉDRIC, démarré en 2022, en collaboration avec l'équipe VERTIGO. L'équipe a également participé à un projet DIM-RFSI en 2019 avec EDF et l'université Paris Saclay.

[Domaine 4] Inscription des activités de recherche dans la société

[D4-R1] Interactions avec le monde non-académique

1. Partenariats industriels pérennes : l'équipe poursuit ses partenariats industriels avec Orange, EDF et la SNCF. De nouvelles collaborations ont été établies avec RTE, France-Galop, Spirops, Kardinal et Saint-Gobain. Ces collaborations se sont concrétisées par des conventions CIFRE. Un financement pluriannuel avec la DGA est également en cours (Cf. DCP (onglet Conventions)).
2. Enjeux sociétaux : Alain Billionnet, à travers ses travaux, publications et expertise apporte une contribution importante aux problématiques de préservation de la biodiversité par l'utilisation d'outils de la recherche opérationnelle.
3. Accueil de doctorants dont la recherche est financée par des partenaires non-académiques : sur la période d'évaluation, 9 thèses ont été financées par des conventions CIFRE et 1 par un financement du centre interdisciplinaire Energy4Climate (E4C).

[D4-R2] Valorisation, produits à destination du monde culturel, économique et social

L'équipe valorise une partie de ses travaux scientifiques par la distribution d'un logiciel [SMIQP \(SOLVER OF MIXED-INTEGER QUADRATIC PROGRAMS\)](#) sous la licence open source EPL (Eclipse Public License) ainsi que d'un package Julia [AUTOEXPE.JL](#) sous licence MIT.

Au niveau sociétal, l'équipe est également impliquée dans la formation d'informaticiens et de chercheurs opérationnels. Deux membres de l'équipe portent la responsabilité d'une formation de master en RO (MPRO)⁷. Plusieurs membres de l'équipe ont participé à la formation (montage et enseignement) des enseignants de lycée en informatique, pour l'ouverture de l'option NSI dans les deux dernières années de lycée (intervention sur l'algorithmique, dans 2 blocs de formation). L'équipe a également participé à la mise en place, en partenariat avec Sorbonne Université, d'un master pour la préparation à l'agrégation d'informatique. Un membre est co-responsable de la formation à distance et plusieurs autres sont impliqués dans les enseignements dans les formations en présentiel et distanciel.

[D4-R3] Médiation

Plusieurs membres de l'équipe ont participé à la rédaction d'articles pour le hors série numéro 75 de la revue de vulgarisation en mathématiques Tangente en 2020 dédié à la recherche opérationnelle, ainsi que le numéro bibliothèque associé. L'équipe a également participé à la rédaction d'un ouvrage pédagogique en Informatique dans la collection Fluorescences de l'éditeur DUNOD paru en 2017.

7. Site web [master MPRO](#)

3.6.6. Trajectoire de l'équipe

Matrice SWOT

Les principales forces ont été exposées dans l'autoévaluation de l'équipe. Elles sont reprises de façon synthétique tout en relevant des points de vigilance quant au contexte et à l'environnement dans lesquels sont développées les activités de l'équipe.

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> 1 Très bon niveau de production scientifique 2 Thématiques de recherche bien identifiées couvrant différents domaines de l'optimisation combinatoire avec une ouverture vers des techniques innovantes 3 Travaux collaboratifs au niveau de l'équipe et du laboratoire 4 Activité contractuelle notable dans le cadre de conventions CIFRE sur la période 5 Forte implication dans l'animation de la recherche au niveau national et international 6 Adossement/Formation par la recherche à travers le MPRO (Responsabilité) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 A renforcer : pas de projets ANR et européens (malgré quelques tentatives). Toutefois de nombreux contrats industriels et des projets PGM0, DIM RFSI... ont permis de développer les activités de recherche de l'équipe 2 Lourdes charges en enseignement, secrétariat et administration affaiblissant notre potentiel recherche 3 Pas de recrutement de MCF OC au CNAM depuis 2014
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> 1 Interactions avec l'ENSTA dans le cadre d'une convention de collaboration permettant d'établir des liens forts avec le programme PGM0 2 Implication dans un ou des parcours de formation en IA permettant de développer nos travaux dans cette direction 	<ul style="list-style-type: none"> 1 Possibilité d'érosion du potentiel recherche en termes de permanents : nouveau départ en retraite d'un MCF (HDR-ENSIIE), départs des émérites, et potentielles promotions externe de MCF HDR 2 Départ du MCF rattaché à l'ENSIIE nécessitant de revoir la convention entre le CEDRIC et l'ENSIIE pour l'accueil des chercheurs au sein de l'équipe OC

Projet

Tout en restant dans les domaines de l'optimisation, pour lesquels l'expertise de l'équipe est reconnue, nous nous intéresserons davantage à au moins deux domaines connexes novateurs comme l'informatique quantique et l'intelligence artificielle. Les travaux concerneront aussi bien l'apport de l'optimisation à ces domaines que la réciproque. Parallèlement, l'équipe approfondira les travaux menés dans ses domaines de compétence. Nous en citons ci-dessous quelques uns.

A - CONCEPTION DE MÉTHODES POUR L'OPTIMISATION MATHÉMATIQUE

L'équipe poursuit ses travaux en optimisation non linéaire : optimisation polynomiale en variables binaires, algorithmes de coupes quadratiques convexes, algorithmes de points intérieurs pour la programmation quadratique, ou semi-définie positive. Un projet PGM0 exploratoire démarre autour de la prise en compte de la rigueur, visant à garantir les résultats de calcul. Au lieu d'utiliser l'arithmétique classique, on peut faire appel à l'arithmétique d'intervalles qui consiste à attribuer un intervalle à chaque valeur ou expression calculées. Cela se fait grâce à des méthodes qui s'apparentent à la programmation par contraintes. Cette approche est par exemple utilisée pour résoudre des programmes quadratiques, convexes ou non. Notre contribution consiste à améliorer ces méthodes par l'utilisation de relaxations plus sophistiquées et tout en propageant les calculs sur les intervalles.

B - ROBUSTESSE ET OPTIMISATION DANS L'INCERTAIN

L'équipe va prolonger ses travaux sur la résolution de problèmes de lot-sizing stochastiques lorsque la demande est incertaine en intégrant la prise en compte de la notion de risque, peu étudiée dans le domaine du lot-sizing. On s'intéressera à l'identification de modèles pertinents d'un point de vue pratique en analysant différentes mesures de risque (CVaR, entropique) et au développement d'approches d'optimisation stochastique multi-étapes, basées sur des arbres de scénarios, efficaces et capables de résoudre des instances de grande taille avec un effort de calcul raisonnable. En particulier, nous aimerions examiner s'il serait possible d'étendre l'algorithme SDDIP développé dans le cadre de la thèse de Franco Quezada.

C - RECHERCHE OPÉRATIONNELLE, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET APPRENTISSAGE

L'équipe va poursuivre ses travaux initiés récemment autour des liens entre RO et science des données, en particulier ceux portant sur la formulation et la résolution de modèles d'optimisation en nombres entiers pour déterminer des arbres de décision optimaux. Nous étudierons également l'apprentissage automatique de bonnes stratégies guidant le développement d'arbres de branch-and-bound dans le cadre d'une nouvelle collaboration avec EDF et ISAE-SUPAERO (thèse P. Strang débutée en 2023). Enfin, un nouveau projet exploratoire, ORION, porte sur l'utilisation de la programmation linéaire en nombres entiers pour améliorer la résolution du problème de robustesse de réseaux de neurones.

D - GRAPHE ET OPTIMISATION

Nous nous intéressons à de nouveaux problèmes comme celui consistant à déterminer si un graphe donné représente les 2-intersections d'hyperarêtes d'un hypergraphe. Par ailleurs, une thèse venant de commencer porte sur l'étiquetage antimagique de graphes (thèse G. Beaudoire) : il s'agit d'établir une bijection entre les m arêtes d'un graphe et les m premiers nombres entiers. Ce problème a de nombreuses applications en particulier une solution permet d'identifier chacun des éléments d'un réseau de communication. Savoir si une telle solution existe est une conjecture posée il y a 30 ans. Une dernière problématique que nous venons d'initier concerne les couplages k -déconnectants : pour un graphe connexe, la suppression des arêtes du couplage doit induire au moins k composantes connexes.

F - DÉVELOPPEMENT DURABLE ET BIODIVERSITÉ

Nos travaux récents dans le domaine de la gestion énergétique seront prolongés, en particulier ceux qui concernent le déploiement de réseaux de capteurs avec prise en compte de divers critères dont, en particulier, la consommation énergétique.

Nous poursuivrons nos travaux collaboratifs avec Orange autour de la gestion optimale des systèmes de stockage d'énergie dans les réseaux de télécommunications pour la prise en compte de mesures incitatives des marchés de l'énergie, via l'utilisation de méthodes de programmation mathématique et d'optimisation dans les graphes. Un dépôt de projet ANR avec Orange est en cours de discussion.

De nombreux nouveaux problèmes d'optimisation se posent dans l'utilisation des énergies renouvelables. Nous travaillerons sur l'identification, la modélisation et la résolution de ces problèmes. A titre d'exemple, les immeubles d'habitation munis aujourd'hui de panneaux solaires doivent mettre en œuvre une clé de répartition de l'énergie solaire (gratuite ou presque) sur la facture des différents appartements. Nous souhaitons élaborer de nouvelles stratégies de répartition à la fois plus équitables entre les utilisateurs et plus incitatives à la réduction de la consommation et des émissions de CO₂.

La plupart des études concernant l'établissement de corridors biologiques nécessaires au déplacement des espèces dans un habitat fragmenté prennent en compte une seule espèce, souvent emblématique. Nous avons entrepris l'étude de réseaux de corridors multi-espèces ce qui complique beaucoup le problème dans la mesure où suivant l'espèce considérée un habitat donné peut lui être très favorable, favorable ou hostile.

(NOUVEAU THÈME) OPTIMISATION COMBINATOIRE ET ALGORITHMIQUE QUANTIQUE

Sur ce thème émergent, l'équipe s'intéresse à deux aspects. Le premier concerne la modélisation et la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire qui apparaissent lors de la conception d'un circuit quantique. Les résultats prometteurs de nos premiers travaux sur l'élaboration de circuits via un algorithme de très faible complexité nous encourage à poursuivre cette voie de recherche. Le deuxième aspect concerne l'exploitation de la structure de certains problèmes combinatoires, généraux comme le problème du voyageur de commerce et max-k-cut, ou appliqués comme l'affectation de véhicules électriques aux stations de recharge, pour améliorer leur encodage et donc leur résolution par un ordinateur quantique.

3.7. Autoévaluation de l'équipe ROC

Composition de l'équipe

Permanents	
Responsable	Stefano Secci
Profs Cnam	Pierre Paradinas.
Profs Université	Stefano Secci, Samia Bouzefrane, Eric Gressier Soudan.
MCF	Selma Boumerdassi (HDR), Stephane Rovedakis, Sami Taktak, Tatiana Aubonnet (HDR), Pedro Braconnot Velloso.
Non permanents	
Associés	Prosper Chemouil, Soumya Banerjee.
Post-doctorants	Chi-Dung Phung, Naresh Modina, Patient Ntumba, Guilherme Iecker Ricardo.
Ingénieurs CDD	Salah Ali Bin Ruba, Davide Raimondi, Joaquin Bayona Parga.
Doctorants	Erwan Goareguer, Nour El Houda Yellas, Kiranpreet Kaur, Alessandro Aimi, Yulliwass Ameur, Yacine Anser, Christophe Maudoux, Mario Patetta, Lydia Ouaili, Mustapha Kamal Benramdane, Kaoutar Sadouki, Rezak Aziz, Tayssir Ismail, Victorien Romain, José Lopes Esteves.

3.7.1. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

L'équipe Réseaux et Objets Connectés (ROC) effectue ses recherches sur les nouvelles architectures réseaux et systèmes liées à la virtualisation, à la mobilité et au développement des objets connectés. Les contributions de l'équipe portent sur la conception de protocoles et plateformes réseaux-systèmes, d'algorithmes pilotant ces protocoles et plateformes, et l'optimisation et la sécurisation de l'infrastructure de calcul et de communication.

Les domaines de référence de l'équipe ROC sont les systèmes embarqués, les systèmes distribués et les réseaux. L'équipe adopte une méthodologie de recherche faisant appel à la modélisation, l'optimisation, l'apprentissage machine et l'intelligence artificielle, et l'expérimentation. L'équipe se concentre sur l'impact des nouvelles technologies émergentes sur la conception de matériels programmables par du logiciel pour les objets connectés, les interfaces de réseau et les plateformes d'exécution, l'automatisation et la virtualisation de la pile réseau-système de bout-en-bout, et la conception de protocoles Internet et des protocoles de sécurité.

Le spectre d'application des solutions étudiées par l'équipe ROC va des objets connectés et des équipements utilisateurs aux centres de données en passant par l'infrastructure de communication sans-fil et filaire faisant de plus en plus appel à la virtualisation de ses fonctions de réseau et de service. Actuellement l'équipe concentre ses efforts sur les défis liés à l'orchestration réseaux-systèmes, aux protocoles de virtualisation et automatisation des réseaux pour la 5G et au delà, à l'interconnexion de systèmes fortement décentralisés comme les chaînes de confiance, à l'analyse de données de réseaux, à la sécurité et à la cybersécurité, et à la conception de nouveaux dispositifs IoT programmables et autonomes.

Positionnement scientifique par rapport au contexte international

Le domaine des réseaux et des systèmes de communication fait face à une révolution liée à l'intégration de plus en plus forte entre le matériel et le logiciel : le matériel d'autrefois se transforme en applications logicielles, en machines virtuelles ou en matériels complètement programmables en temps réel par de nouveaux langages de programmation et compilateurs. Les défis architecturaux, algorithmiques et protocolaires liés à cette révolution sont au coeur de la démarche scientifique de l'équipe, et de sa triple expertise en réseaux, systèmes embarqués et systèmes distribués.

L'équipe a pu asseoir cette expertise au niveau international pas simplement avec des publications internationales du meilleur niveau, mais aussi avec la participation à des projets collaboratifs européens. Notamment, l'équipe via le Cnam est membre de la 6G Smart Networks and Services Industry Association (6G-IA) et du projet H2020 AI@EDGE. De plus, l'équipe est fortement impliquée dans l'organisation d'événements scientifiques internationaux de premier plan, aussi bien au Cnam qu'à l'étranger, avec aussi la prise de responsabilités au sein de comités techniques internationaux tel que l'IEEE Communication Society (S. Secci au sein de la Internet Technical Committee, S. Boumerdassi au sein de l'Information Infrastructure and Networking Technical Committee) et la Open Networking Foundation (S. Secci responsable de la brigade on security and performance analysis).

Avancées scientifiques majeures

Depuis 2019, l'équipe a notamment travaillé sur un nombre d'activités importantes. Nous décrivons succinctement dans la suite une sélection des plus marquantes, qui ont mobilisé le plus l'équipe, et qui ont donné lieu à des actions d'intégration dans des systèmes réels.

Dans le cadre de la thèse de Amar Abane, nous avons fait des propositions pour l'intégration du paradigme de communication NDN (Named Data Networking) dans l'Internet des objets (en particulier dans l'architecture IEEE 802.15.4). Nous avons développé des stratégies d'acheminement de trafic à faibles ressources qui améliorent sensiblement l'état de l'art. De plus, nous avons contribué à l'extension de l'environnement OMNET++ pour supporter NDN [[hal-02411296](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02411296), [hal-02334088](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02334088), [hal-01864541](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01864541)].

Dans le cadre de la thèse et du postdoc de Francesca Fossati, nous avons travaillé à la définition de nouveaux algorithmes d'allocation de ressources pour des architectures réseaux 5G

avec virtualisation de bout-en-bout (network slicing) [hal-03533348,hal-02008115,hal-02501918,hal-03946630]. En commençant avec des algorithmes pour un contexte d'orchestration centralisée, nous avons développé des nouveaux pour des contextes distribués et décentralisés en prouvant leur meilleur passage à l'échelle et résilience aux pannes. Dans le cadre d'un projet ANR HEIDIS, nous sommes en train d'intégrer ces algorithmes au sein d'une extension de l'architecture logicielle Open RAN (Radio Access Networks) en collaboration avec Orange et le L2S.

En cybersécurité, nous pouvons mentionner des activités de recherche aussi bien dans la sécurité IoT qu'en sécurité des infrastructures réseaux. L'équipe a développé des solutions à empreinte mémoire faible basées sur des matrices pour la gestion et la distribution de clés de sécurité dans un système IoT [hal-02920469v2,hal-03907876v1]. L'équipe a aussi travaillé à la conception de nouvelles approches algorithmiques pour la détection d'attaques non connues (*zero-day*) pour les réseaux IP [hal-02568587, hal-02889708, hal-02501912], en collaboration avec Thales. Actuellement, nous continuons à travailler sur ces algorithmes, et notamment leur intégration dans les cartes réseaux programmables dans le cadre du projet H2020 AI@EDGE et d'une CIFRE avec Thales.

Animation scientifique

L'équipe a mis en place une animation scientifique interne basée sur des réunions d'équipe - avec des présentations de stagiaires, doctorants, postdoctorants sur leur sujet de recherche et l'évolution des travaux, et la gestion interne - et des séminaires avec des présentations invitées, suivies parfois par des présentations de travaux de recherche mûrs des chercheurs de l'équipe. Ces derniers ont été parfois étendus à l'axe 2 du laboratoire, lorsque d'intérêt pour d'autres équipes. Pour valoriser les présentations des invités internationaux, l'équipe organise avec d'autres laboratoires parisiens depuis fin 2022 les séminaires parisiens en réseaux. Un atelier hors-les-murs est organisé chaque été.

Pour sa gestion interne, différentes commissions sont mises en place : locaux, matériels, accueil des nouveaux arrivants, services web, services cloud. 2-3 responsables par commission dont 1 permanent et 1-2 non permanents sont prévus, et sont invités trimestriellement à présenter les activités dans le domaine de la commission, en marge des séminaires d'équipe. Après chaque réunion d'équipe et séminaire, les permanents ont l'habitude de se réunir davantage pour avancer collectivement sur l'administration de l'équipe.

3.7.2. Profil d'activités liées à la recherche

Le lancement de l'équipe a impliqué un travail d'administration et d'animation conséquent. Cela s'est fait conjointement au lancement du master recherche international, et de l'encadrement d'un volume important de doctorants. De plus, l'équipe a contribué à des projets logiciels, des dépôts de brevet et à l'organisation de plusieurs congrès scientifiques. L'implication dans des sociétés savantes et pour les agences d'évaluation a aussi été importante.

Activités (100 points répartis sur 7 items)

Administration et animation de la recherche	15
Aide aux politiques publiques et expertise technique	15
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	20
Dissémination de la recherche	15
Recherche et encadrement de la recherche	20
Valorisation, transfert, innovation	10
Autre activités	5

3.7.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

L'équipe ROC a été créée par décision du conseil de laboratoire du 20 février 2019. Il n'y avait pas de recommandation spécifique à l'équipe dans le précédent rapport.

L'équipe a regroupé des chercheurs venant de l'équipe Multimédia Interactif et Mobilité (MIM), et de son axe Systèmes Embarqués et Mobiles pour l'Intelligence Ambiante, et d'une chercheuse de l'équipe SYS (Selma Boumerdassi). La création de ROC a aussi conduit à un changement d'équipe d'un ancien membre de MIM vers l'équipe SYS (Jean-Ferdinand Susini) pour des raisons d'affinité thématique.

La proposition de création d'une nouvelle équipe a été portée par l'actuel responsable (Stefano Secci) recruté en septembre 2018, sous l'impulsion de la direction du laboratoire. Le précédent rapport HCERES avait constaté aussi bien pour l'équipe MIM que pour l'équipe SYS une trop faible interaction entre leurs axes, et recommandait des actions pour pallier cela. En outre, le rapport HCERES recommandait des actions pour améliorer la visibilité scientifique des membres des équipes. La création de l'équipe ROC a été effectuée aussi avec l'objectif de répondre à ces recommandations.

3.7.4. Introduction du portfolio

Le portfolio de l'équipe est composé de :

1. Une note descriptive du projet européen H2020 AI@EDGE de l'équipe démarré en janvier 2021. Elle regroupe 2 pages du leaflet du projet ainsi que le premier livrable du projet qui était sous responsabilité éditoriale de l'équipe. Toutes les actions de valorisation et de transfert sont décrites à la page du projet <https://aiatedge.eu/blog>, et incluent un workshop international organisé au Cnam (pendant IEEE CloudNet 2022) et la participation au salon international Mobile World Congress (MWC).
2. Une note descriptive du master recherche international que l'équipe a lancé en 2020/2021 pour créer une filière de recrutement de qualité pour ses doctorants, stagiaires et ingénieurs. Dans ce document, nous décrivons l'organisation du master avec sa fiche, une vue sur la structure de l'unité "Advanced Projects on Networks and IoT" et un exemple de rapport de projet élaboré par un étudiant étant admis avec une bourse du gouvernement (Eiffel), actuellement en stage M2 chez Ericsson France et qui est candidat à une thèse CIFRE avec la même entreprise.
3. Une note descriptive de l'activité de standardisation de l'équipe à l'ETSI. La note regroupe 2 pages de présentation globale et de positionnement de l'activité ainsi qu'un exemple de spécification ETSI auquel des membres de l'équipe ROC (T. Aubonnet, F. Lemoine) ont significativement contribué.
4. Un article scientifique dans une revue prestigieuse dont seuls des membres de l'équipe sont signataires. Le travail représente une étape importante d'une activité de recherche sur la définition d'algorithmes d'allocation multi-ressources pour les dernières générations de réseaux basées sur le 'network slicing'. Ce travail est actuellement au cœur du projet ANR HEIDIS de l'équipe.
Fossati, F.; Rovedakis, S. and Secci, S. Distributed algorithms for multi-resource allocation. In IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 33 (10) : 2524-2539, 2022.
5. Un article scientifique d'un doctorant de l'équipe dans une revue Q1 en sécurité portant sur une nouvelle architecture de gestion de clefs pour les réseaux IoT.
M. Nafi, M.-L. Messai, S. Bouzefrane and M. Omar, "IFKMS : Inverse Function-based Key Management Scheme for IoT networks", Journal of Information Security and Applications, Vol. 71, Dec. 2022, 103370.

3.7.5. Auto-évaluation de l'équipe

Domaine 3, production scientifique

D3 R1 – Production scientifique : La production scientifique de l'équipe repose sur une stratégie privilégiant un retour rapide de la communauté avec des publications et présentations dans des workshops nationaux et internationaux voire conférences internationales prestigieuses de taille petite ou moyenne, suivi par des articles dans des revues de meilleure qualité.

Autant que le permettent les contraintes juridiques et stratégiques, l'équipe poursuit la publication en code libre de l'implémentation des algorithmes et des briques logicielles utilisées, des jeux de données et codes associés pour les créer ou les traiter, afin de permettre leur reproductibilité et d'augmenter l'impact des travaux publiés.

Qualité des supports ciblés : pour les articles proposés à des conférences et workshops internationaux l'équipe privilégie des événements fortement spécialisés dans la thématique des travaux comme critère principal. Ceci se fait en privilégiant les événements mieux classés, mais sans que cela soit une contrainte forte : l'objectif primaire des publications en conférence ou workshop étant d'avoir le maximum de retours de la communauté afin d'avancer dans les travaux de recherche. L'équipe ne vise pas de publications dans des revues ou conférences *nationales* afin de se concentrer sur des publications à grand impact.

La stratégie de l'équipe est ainsi de porter à maturation des travaux qui seront documentés de façon complète dans des articles de revue qui ont vocation à représenter l'état final d'une activité de recherche. Ainsi l'équipe a obtenu sur les premiers 4 ans de son existence (2019-2022) 84 publications de rang A/Q1 ou B/Q2 (80% du total), dont 43 publications de rang A/Q1 (41%), et 17 (16%) dans des revues et conférences qu'on considère habituellement de rang A* (IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, ICDCS, IEEE/ACM Tran. on Networking, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, IEEE PERCOM, IEEE Comm. Surveys & Tutorials, DISC, IEEE Comm. Magazine, IEEE Trans. on Network and Service Management).

Co-publications avec des partenaires du meilleur niveau national et international :

L'équipe a compté depuis 2019 un grand nombre de collaborations avec des acteurs académiques et industriels de tout premier plan, aussi bien au niveau national – avec des chercheur.e.s du LIP6, Inria Paris, LTCI/Télécom Paris, LAMSADE/Université de Dauphine, Thales, Orange Labs – et international – avec des chercheur.e.s de l'Université de Rome 1 (Italie), Columbia University (USA), Université de Milan (Italie), Universidade Federal de Minas Gerais (Brésil), Politecnico di Milano (Italie), Fudan University (Chine), Université de Goettingen (Allemagne), Université de Tizi-Ouzou (Algérie), USTHB (Algérie), Ecole polytechnique de Montréal (Canada), National Institute of Standards and Technology (NIST, USA), CERIST (Centre de recherche sur l'information scientifique et technique, Algérie), Nanjing University of Science and Technology (Chine), HCMC University of Technology and Education (Vietnam), Birla Institute of Technology (Mesra, Inde).

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Reuves	35	15	11	3	1		
Conférences	8	26	6	3	2		
Chapitre						5	
Ouvrages						2	
Brevets							1
Logiciel							2

D3 R2

La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe. Les membres de l'équipe ont amélioré la qualité de leur production par rapport à la période précédente, et une dynamique interne a été lancée (création d'un comité interne pour la relecture d'articles,

organisation de séminaires réguliers des doctorants en vue de présenter leur état d'avancement) afin d'améliorer davantage la qualité des publications.

La production scientifique n'est pas encore bien répartie de manière homogène entre les membres de l'équipe, avec de fortes disparités entre les membres en raison essentiellement de la jeunesse de l'équipe et des synergies en voie de maturation, et des missions hors activités de recherche (société savantes, gestion du réseau Cnam, standardisation, participation aux instances d'établissement, CNU) d'une partie de ses membres.

Les doctorants et post-doctorants participent activement à la production scientifique, et sont au cœur de celle-ci. Leurs activités sont appuyées par des projets de master orientés recherche, ainsi que par des stagiaires M2.

Tous les jeunes chercheurs sont accompagnés par l'équipe via l'encadrement de thèses et de stagiaires. Les chercheurs devant reprendre une activité de recherche ont été d'un côté associés à des nouveaux encadrements de doctorants, stagiaires et postdoc ; d'un autre côté l'équipe a pris en charge la participation à des journées nationales de GDR (Journées nationales du GDR Sécurité Informatique 12-14 Juin 2019), à des congrès internationaux organisés au Cnam ou Paris (TMA, CLOUDNET, GIIS, ICIN, MSPN, WISTP, PEMWN) et à l'étranger (CNSM, GLOBECOM, NetSoft, NoF, Euro-P4, EMSICC/FiCloud) afin de garantir un suivi des nouvelles technologies des réseaux et des systèmes embarqués.

Domaine 2, attractivité

D2 R1 - Rayonnement scientifique :

- Invitations dans des institutions académiques ou congrès nationaux et internationaux :
 - S. Bouzefrane, "A trust based recommendation system using Self Organized Map for service selection", 2021 AL5G+ Workshop, June 2021, online.
 - S. Secci, "Boucle d'automatisation des réseaux logiciels", CORES 2022, conférence du GdR Réseaux et Systèmes Distribués, keynote, 30 mai 2022, Univ. Paris Saclay.
 - S. Secci, "Evolution of pool-hopping over time in Bitcoin", Towards a Better Bitcoin workshop, Surfin'Bitcoin 2022, keynote, Aug. 27, 2022, Biarritz.
 - S. Secci, "Revisiting resource allocation in verticalized networks", GIIS 2019, keynote, Dec. 18, 2019, Paris, France.
 - S. Secci, "Visions on Future Network Technologies", NoF 2019, distinguished expert panel, Oct. 3, 2019, Rome, Italie.
- Organisation des congrès internationaux majeurs et participation aux comités scientifiques de ces manifestations.
L'équipe a organisé au Cnam les congrès IFIP TMA'19, IEEE CLOUDNET'22, MSPN'20, IFIP WISTP'19, et organisera au Cnam en 2023 le prestigieux congrès ACM CoNext.
De plus, l'équipe a organisé à l'extérieur du Cnam les congrès suivants :
 - les conférences Machine Learning for Networking (MLN) et Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN) à Inria Paris en 2019 ;
 - Le congrès IEEE Network Softwarization (NetSoft), en 2022 ;
 - le congrès IFIP Conference on Network & Service Management (CNSM) en 2021 ;
 - le congrès Networks of the Future (NoF) en 2021 ;
 - la conférence MSPN (International Conference on Mobile, Secure and Programmable Networking) en 2019 (S. Boumerdassi General co-chair) au Maroc ;

- le workshop IEEE EMSICC (Energy Management for Sustainable Internet-of-Things and Cloud Computing) Workshop/FiCloud en 2019 (Turquie), 2021 (en ligne), 2022 à Rome (S. Bouzefrane chair) ;
 - le workshop ACM MobiArch 2022 à Sydney, Australie, colocalisé avec ACM MOBI-COM 2022 (S. Secci Program Co-Chair).
- Enfin, l'équipe a participé en 2017-2022 aux comités de pilotage des congrès suivants :
- IEEE NetSoft et CNSM - P. Chemouil ;
 - NoF, Int. Teletraffic Congress - P. Chemouil, S. Secci ;
 - IFIP TMA, ACM Mobiarch et IEEE INFOCOM Global Internet Symposium - S. Secci.
- Responsabilités éditoriales dans des revues et des collections de haut niveau :
 - S. Bouzefrane, Guest Editor du numéro spécial "Edge Computing and Networking for Ubiquitous AI". IEEE Access 2021. IF 3.476.
 - S. Secci, Associate Editor, IEEE Communications Surveys and Tutorial (2019-2022) - IF. 37.551
 - S. Secci, Associate Editor, IEEE Transactions on Network and Service Management (2019-2022) - IF. 4.758
 - Participation à des instances de pilotage de la recherche et d'expertise scientifique :
 - J-M. Douin a été représentant MCF élu au CNU 27 dans la période 2017-2022.
 - P. Paradinas a été président de la Société Informatique de France (SIF) de 2017 à 2021, et est actuellement vice-président Relations écosystème et internationales.
 - S. Bouzefrane est experte référente en informatique au sein de la DGRI-SITTAR C1 pour le crédit impôt recherche (MESR) pour 20% de son temps.
 - P. Chemouil est membre du Conseil Scientifique d'INESC Coimbra, Portugal.
 - S. Bouzefrane est membre du conseil de l'école doctorale EDITE (ED130), membre du conseil de l'école doctorale SMI (ED432) et membre du collège doctoral de HE-SAM Université.
 - S. Secci a été évaluateur de projets de recherche sur la période 2019-2022 pour les programmes DEFRA et de la région Wallonie (Belgique), les AAP AAPGE, ASTRID, MRSEI de l'ANR (France), les AAP CNS et OIA de la NSF (USA), l'ARCEP (France), et évaluateur de la création d'un nouveau laboratoire de recherche en informatique de l'UTT (France).
 - S. Bouzefrane a été évaluatrice sur la période 2019-2022 pour l'ANR, l'ANRT, et le NSERC (Canada).
 - Prix, distinctions :
 - Lynda Boukela et al. Best paper Award pour la conférence IEEE SPAC'2021 (IEEE International Conference on Security, Pattern Analysis, and Cybernetics) en 2021.
 - Amar Abane et al. Best paper Award pour la revue "Journal of Cyber Security and Mobility" pour l'année 2020.
 - Amar Abane et al. Best Student Paper pour la conférence "8th IEEE Int. Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless, Paris, 2019".
 - Nour El-Houda-Yellas et al. Best Paper Award de la conférence DRGN (Design of Reliable Communication Networks) 2019.

D2 R2 Attractivité :

- Post-docs, doctorants :
l'équipe a porté jusqu'à la soutenance 9 doctorants inscrits au Cnam depuis sa création (dont 4 doctorants CIFRE ou financés par une entreprise), ainsi que 5 doctorants inscrits à l'extérieur dans le cadre de co-encadrements et mobilité.
L'équipe embauche actuellement 15 doctorants, dont 6 en convention CIFRE ou financés par une entreprise, et 2 en Formation Continue et Validation des Acquis de l'Expérience (VAE). En outre, l'équipe a embauché sur la période entre 1 et 3 post-doctorants en même temps, pour appuyer les projets et les thèses de l'équipe.
- Chercheurs et enseignants-chercheurs sur poste permanent :
Le laboratoire a soutenu la création de l'équipe avec un poste de Maître de Conférences sur lequel Pedro Braconnot Velloso, chercheur de renom avec un profil international, a été recruté en renforçant ainsi l'expertise de l'équipe en réseaux sans-fils, et notamment les réseaux véhiculaires et les réseaux mesh.
En outre, l'une de ses membres, Françoise Sailhan, a été promue Professeure à l'IMT Atlantique en 2022.
- Chercheurs et enseignants-chercheurs invités de renom :
 - Deepankar Medhi, National Science Foundation et Univ. of Missouri-Kansas City (USA), en visite payée par la NSF, en juin 2019 et novembre 2022.
 - Soumya Banerjee, Maître de Conférences à Birla Institute of Technology (Inde), séjour de 6 mois payé par le Cnam, en 2019.
- Accueil, environnement et encadrement de qualité pour les post-docs, doctorants, chercheurs et enseignants-chercheurs :
La quasi totalité des doctorants et postdoctorants sont aussi bien encadrés dans des projets long-terme de l'équipe financés à travers ses subventions, que dans le cadre de projets nationaux et européens pour profiter de retours extérieurs à l'équipe et développer des collaborations. En outre, l'équipe a mis en place d'importantes ressources de calcul et de test réseau afin d'accompagner l'évaluation expérimentale et numérique des travaux.

D2 R3 - Succès aux appels :

- Projets européens et internationaux :
H2020 AI@EDGE (2021-2023) : projet portant sur la conception de fonctions d'intelligence artificielle pour l'autoconfiguration des réseaux 5G (décrit dans le portfolio)
COST RECODIS (fini en 2020) : réseau européen finançant la mobilité des chercheurs portant sur la fiabilité des réseaux.
- Projets PIA :
ENE5AI (2021-2023) : projet du plan de relance (France 2030) portant sur l'intégration de l'IA dans les réseaux 5G et au delà, avec des cas d'usage smart-grid.
INFLUENCE (2022-2025) : projet du plan de relance (France 2030) portant sur la gestion de la virtualisation des réseaux par tranches. Le projet s'appuie sur l'abstraction "intention" pour gérer la reconfiguration dynamique du réseau.
- Projets ANR :
CANCAN (2019-2022) : analyse des données 4G pour l'étude de nouvelles architectures et protocoles de réseaux. Avec Inria, Orange, Thales.
MAESTRO-5G (2019-2022) : définition de nouveaux algorithmes d'allocation de ressources pour les réseaux 5G. Avec Inria, Orange, Nokia, U. Avignon, U. Saclay.
INTELLIGENTSIA (2020-2024) : conception d'une architecture de virtualisation de l'architecture IoT LoRaWAN. Avec Acklio, Inria, Orange.

PARFAIT (2022-2025) : définition et résolution de problèmes de contrôle d'admission, ordonnancement et déport de calcul via des algorithmes d'apprentissage. Avec ENS Lyon, IMT-A, Inria, U. Mont-Blanc et U. Avignon.

HEIDIS (2022-2025) : conception de nouvelles architectures d'ordonnancement multi-ressources dans le contexte OpenRAN. Avec Inria, Orange, U. Saclay.

— Autres appels à projets :

Projet PHC-Tassili (2017-2019) (S. Bouzefrane coordinatrice). Financement Campus-France. Partenaires : Cnam, Inria, Univ. Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. « Gestion des caches et orchestration intelligentes dans un environnement réseau virtualisé ».

D2 R4 - Équipements spécifiques à l'équipe :

L'équipe opère un cluster de calcul totalisant 106 CPU physiques, 512 cœurs, 3 TB de RAM et 95 TB de stockage, hébergé dans le centre de calcul du Cnam sous gestion de la DSI. Le cluster est utilisé pour pérenniser la plateforme du projet ANR LISP-LAB, et pour les simulations, émulations et testbeds réels de ses projets et activités de recherche. Le cluster appuie aussi les unités d'enseignement par la recherche (master, ingénieur).

Domaine 4 inscription des activités de recherche dans la société

D4 R1

— Relations avec le monde économique, le monde social :

avec la Société informatique de France, P. Paradinas et S. Secci ont organisé une journée scientifique et technique sur la Souveraineté numérique. Cette journée a réuni plus de 150 personnes de la communauté française autour de ces questions avec des juristes, informaticiens, politiques, économistes en novembre 2022. Les intervenants venaient de l'ARCEP, Thales, CIGREF, Univ. Saclay, CNLL, Framasoft, Scaleway, AFNIC, Univ. Lille, FranceIX, Institut Rousseau, IMT, SIPEARL, Telecom Paris, Software Heritage, Univ. Poitiers, GAIA-X, INRIA, QWANT, ENISA. (<https://souverainete.roc.cnam.fr>).

— Relations partenariales pérennes avec des industriels :

l'équipe à sa création a piloté la mise en place d'un contrat cadre avec Orange Labs en raison du lancement concurrent de plusieurs CIFRE. Ceci a permis l'intégration de 6 doctorants CIFRE avec Orange au sein de l'équipe, ainsi que 2 autres contrats au sein du laboratoire (dans les équipes LAETITIA et OC). Ce contrat a aussi favorisé l'émergence de thématiques communes développées dans 4 projets ANR avec Orange comme participant, dont 2 encore en cours. De plus, un nouveau projet européen de type IPCEI MECT a été accepté, impliquant Orange et le CNAM, avec un démarrage en 2023. Enfin, cette collaboration fructueuse a notamment donné lieu à un brevet autour d'une activité que l'équipe continue à mener dans la définition d'algorithmes d'IA pour l'automatisation des réseaux. De plus, l'équipe a eu des projets collaboratifs et bilatéraux avec plus de vingt autres industriels, dont pour plusieurs avec plus d'un projet ou de propositions de projets, en France (e.g., MUST, Nokia, SAFRAN, SMILE, Transa, etc) et en Europe (Ericsson, TIM, Eightbells, etc).

— Plateformes développées ou partagées ou utilisées par les acteurs externes :

L'équipe à sa création a transféré des nœuds de cœur de la plate-forme LISP-LAB au Cnam du LIP6, afin de la développer et la pérenniser comme demandé par l'ANR (projet porté au LIP6 par S. Secci). Cette plate-forme est actuellement encore utilisée par la communauté gravitant autour du groupe de travail LISP à l'IETF, afin de tester des améliorations protocolaires.

De plus, l'équipe opère un cluster de calcul haute performance, notamment en support de deux testbeds actuellement opérationnels :

- testbed sur l'architecture LoRaWAN (protocole IoT), opérant sur spectre libre de licence.
- testbed 5G et au-delà de la 5G, opérant sur **un spectre 5G autorisé par l'ARCEP**.

Chacun de ces testbeds est composé par trois points d'accès dans le campus Montgolfier, faisant usage d'une virtualisation de ses fonctions de réseaux dans le cluster de l'équipe, ainsi que d'un VLAN couvrant le campus pour la collecte de trafic vers le cœur de réseau. Ils sont utilisés en partenariat avec les membres des projets de l'équipe (ANR INTELLIGENTSIA, HEIDIS, H2020 AI@EDGE, etc), ainsi qu'avec des collaborateurs externes. Ces plate-formes ne sont pas ouvertes hors cadre contractuel, aussi en raison d'un manque de ressources permettant de garantir un bon niveau de maintenabilité et de disponibilité.

- Accueil de doctorants dont la recherche est financée par des partenaires non-académiques : 10 doctorants, dont 8 CIFRE et 2 financés par une entreprise hors-CIFRE ont été diplômés ou sont en cours au sein de l'équipe, en partenariat avec la Caisse des Dépôts, Trasna, Orange, Outscale et Thales.

D4 R2

- Actions de valorisation et de transfert ; politique de l'équipe en la matière : l'équipe essaie d'identifier lesquelles de ses activités peuvent être valorisées via un dépôt de brevet, la création de start-up et l'obtention de nouveaux contrats. Ceci afin de se positionner rapidement dans des thématiques d'intérêt et d'augmenter l'impact de ses travaux. Deux idées de start-up sont en cours de réflexion sur la conception de matériels programmables pour les réseaux d'accès, et l'automatisation des réseaux, dont au moins une pourrait être portée à maturation pendant la prochaine période.
- Brevets licenciés, acceptés, déposés :
Brevet avec Orange (co-propriété) -
JM. Sanchez, A. Diamanti, S. Secci, Procédé de contrôle d'une entité d'orchestration dans un réseau logiciel - Management of at least one orchestration entity in a computer network. Brevet FR2107239, WO2023281200, 2021.
- Création de start-up :
De par sa jeunesse, l'équipe a concentré ses efforts dans la construction d'un environnement scientifique propice au développement d'idées novatrices. Il est en projet de lancer l'incubation d'une start-up dans les années à venir au sein de l'incubateur du Cnam et ceci pour porter à maturation des technologies développées au sein des projets du plan de relance France 2030 sur l'intégration de l'IA dans l'auto-configuration des réseaux 5G voire 6G.
- Contribution à la rédaction de normes, procédures, référentiels reconnus par des instances internationales :
T. Aubonnet est experte de l'ETSI (European Telecommunication Standards Institute) dans le domaine de la qualité de service dans les réseaux. En particulier, deux documents de standardisation STF (Specialist Task Forces) ont été produits sur la période : STF543, STF626.
En outre, S. Secci suit et contribue occasionnellement à l'IETF (organisme de standardisation de protocoles Internet), et notamment ses groupes de travail sur LISP (Locator/Identifier Separation Protocol) et MPTCP (Multipath Transmission Protocol).

D4 R3

- Actions de partage de la connaissance avec le grand public et le jeune public :

- Pierre Paradinas a participé à l'initiative : « 1 scientifique 1 classe Chiche ! » qui a pour objectif de favoriser la rencontre entre une classe de seconde avec un/une scientifique du domaine informatique. Il a par ailleurs durant la semaine de lancement fait une intervention dans une classe au Lycée Jean-Paul Sartre, de Bron. <https://chiche-snt.fr/communiquede-presse-31-01-2020>.
- en réseaux et sécurité, nous valorisons des travaux effectués par les élèves ingénieurs dans des unités de fin de cycle d'initiation à la recherche, avec des articles dans des magazines kiosque ou livret blanc, pour vulgariser des nouveaux protocoles, vulnérabilités et stratégies de protection. En 2019-2022, 6 articles dans Multi-Systems & Internet Security Cookbook (MISC) et 1 rapport de l'Open Networking Foundation (ONF) ont ainsi été publiés.
- Actions de médiation scientifique :
 - P. Paradinas a participé à la coordination d'un numéro spécial de la revue du CILAC sur l'informatique (Comité d'information et de liaison pour l'archéologie, l'étude et la mise en valeur du patrimoine industriel) avec S. Abitboul, R. Di Cosmo et F. Hachez ;
 - suite à la réapparition de la collection Mathon comportant de nombreux grands ordinateurs, P. Paradinas pour le CNAM, avec l'Inria et la Société informatique de France se sont regroupés pour sauver cette collection d'une destruction ou d'un départ à l'étranger.
 - P. Paradinas a relancé le collectif d'associations et établissements en charge de proposer la mise en place d'un 'Musée de l'informatique et du Numérique en France', en co-organisant dans ce sens le séminaire mensuel de l'Histoire de l'informatique et du numérique organisé par le Musée des arts et métiers du Cnam (<https://culture.cnam.fr/histoire-de-l-informatique-et-du-numerique-561350.kjsp>; <http://musee-informatique-numerique.fr>).

3.7.6. Trajectoire de l'équipe

Forces	Faiblesses
Le très bon niveau des publications de l'équipe et la forte activité contractuelle a permis de positionner rapidement l'équipe dans l'écosystème national ainsi que celui international, avec plusieurs projets prestigieux (ANR, H2020) obtenus.	Le départ à la retraite de l'un de ses membres porteur de l'axe logiciels pour l'IoT industriel (JM. Douin) en 2022, et d'une autre membre experte de la gestion de données de l'IoT (F. Sailhan promue professeure à l'IMT-A), ainsi que dans les 4 années à venir de 3 autres de ses membres (T. Aubonnet, P. Paradinas, E. Gressier-Soudan) porteur.e.s de compétences dans la gestion des infrastructures, la sécurité des systèmes embarqués et la gestion de données dans les systèmes distribués (respectivement) affaiblira fortement l'expertise de l'équipe et du laboratoire dans ces domaines s'ils ne sont pas remplacés dans les prochaines années.
Opportunités	Menaces
Le recrutement de 4-5 nouveaux enseignants-chercheurs pour remplacer les départs sur la prochaine période pourrait permettre le lancement de nouveaux axes de recherche, notamment dans le domaine des systèmes distribués, de la robotique de prototypage, en sécurité IoT et des réseaux 6G.	Le volume croissant des contrats et des embauches de l'équipe pourrait engendrer une surcharge administrative au niveau du laboratoire difficile à anticiper, qui pourrait ralentir l'activité de recherche notamment avec les départs à la retraite de plusieurs membres de l'équipe administrative.

L'équipe est extrêmement satisfaite de l'état actuel des activités, des thématiques scientifiques actuellement couvertes, et de la visibilité améliorée de ses membres par rapport à la situation antécédente à son lancement. Des synergies sont établies entre ses sensibilités réseaux, systèmes distribués et systèmes embarqués, avec des co-encadrements multiples et différents projets connexes. La démarche scientifique sous-jacente à ces synergies correspond à l'actualité des évolutions technologiques des réseaux de communication et des architectures de calcul distribuées. Les thématiques de l'équipe de recherche sont en forte évolution. L'équipe est en train de se positionner sur les nouveaux axes de recherche suivants.

Désagrégation de l'infrastructure numérique. L'équipe vise à développer ses activités touchant à la désagrégation des logiciels et des matériels composant les nouvelles architectures IoT et réseaux. Nous avons déjà commencé à explorer cet axe de recherche avec une thèse sur l'impact que le déport d'algorithmes d'intelligence artificielle dans des cartes réseaux programmables (NetFPGA) peut avoir sur la capacité de réponse à la parution d'anomalies (pannes logiciels, attaques, défaillances), ainsi que sur la précision des algorithmes déportés (et leur approximation liée aux contraintes temporelles des systèmes de commutation temps réel), dans le cadre du projet ANR HEIDIS et d'une CIFRE avec Thales. Nous comptons continuer à explorer cette direction pour le déport de fonctions de réseau et de service, toujours dans des systèmes FPGA, qui sont de plus en plus désagrégées en micro-fonctions dans l'évolution des systèmes de virtualisation nativement utilisés désormais dans ce qu'on appelle actuellement la 5.5G ('cloud-native functions').

L'évolution vers la 6G, avec une intégration forte de l'intelligence artificielle dans l'optimisation des opérations de gestion des réseaux (routage, commutation, classification de trafic, détection d'attaques, etc). En effet, des résultats scientifiques sont en train de pousser vers la définition de nouveaux standards, comme par exemple liés à la formalisation des fonctions d'intelligence artificielle, à laquelle l'équipe est en train de participer dans le cadre de groupes de travail de la European Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) et les projets européens. Le nouveau projet ANR COCO5G qui démarre en 2023 nous permet d'avoir la possibilité d'appliquer des algorithmes aux nouvelles données relatives au trafic 5G.

Sous l'impulsion de l'équipe et de ses travaux, le Cnam est désormais membre de la SNS JU 6G-IA, et l'équipe vient de soumettre deux propositions de projets européens, ainsi que deux projets nationaux, dans le cadre de la 6G ; deux de ces propositions portent sur les communications non terrestres (entre avions, drones et satellites orbites basses), et deux autres portent sur l'intégration de l'IA et sa soutenabilité énergétique dans l'architecture 6G. En effet, les communications non terrestres impliquent un environnement de communication 3D, avec de longues distances dans chaque dimension, avec en plus de grandes vitesses relatives entre objets non terrestres impliquant la prise en compte de phénomènes physiques ignorés dans des contextes terrestres conventionnels (e.g. l'effet doppler, dilatation du temps) causées par de fortes différences de vitesses pouvant atteindre plusieurs milliers de Km/s, ainsi que des comportements très intermittents de certaines interfaces de réseau (sans-fil optique) ; dans ce contexte, l'équipe travaillera à la banalisation des communications multi-chemins redondantes, au niveaux 3, 4 et 5 des couches réseaux.

La cybersécurité et sa prise en considération croissante dans la conception de protocoles et algorithmes pour les réseaux et les objets connectés. La sécurité était historiquement négligée dans la conception de protocoles et algorithmes pour les réseaux, l'approche qui désormais s'impose est de prendre en considération les problématiques de sécurité dès la conception. L'équipe vient de lancer une thèse et des stages M2, ainsi que des projets pédagogiques (M2, ING3) exploratoires sur les nouveaux défis du quantique, la nouvelle cryptographie pour la mise en sécurité des réseaux et des objets connectés, et des études comparatives sur les nouveaux protocoles d'échange de clefs. L'équipe est aussi en train de former un groupe de travail sur l'étude de nouvelles politiques de souveraineté des infrastructures dans les archi-

tections de communication et calcul, notamment en terme de décentralisation du contrôle et ouverture d'interfaces nord pour la gestion des infrastructures de bout-en-bout.

L'intégration de la robotique dans les nouvelles piles réseau-système des nouveaux réseaux ('cloud edge continuum') et son automatisation. En particulier, l'équipe est en train d'explorer dans le projet H2020 AI@EDGE la reconfiguration automatique de robots dans l'industrie intelligente suite à la détection d'attaque par analyse du trafic réseaux avec des cartes réseaux programmables. De plus, l'équipe a coordonné le déploiement d'un nouveau master 'réseaux, objets connectés et robotique de prototypage' à Perpignan avec le Cnam Occitanie. A travers cet axe scientifique, l'équipe a coordonné la soumission d'un projet de master recherche européen nommé "AI for connected industries" où la liaison entre robotique, IA et technologies pour les réseaux et les objets connectés en milieu industriel est au cœur du programme pédagogique du master.

3.8. Autoévaluation de l'équipe SYS

Composition de l'équipe

Permanents	
Responsable	Pierre Courtieu
Emérites	Veronique Viguie Donzeau-Gouge.
Profs Cnam	Yann Pollet.
Profs Université	Tristan Crolard, Nicole Levy, Kamel Barkaoui.
MCF	Olivier Pons, Pierre Courtieu, Francois Barthelemy, Maria-Virginia Aponte, Joelle Delacroix, Rachid Rebiha, Jean-Ferdinand Susini.
Non permanents	
Associés	Layth Sliman.
Doctorants	Elise Lincker, Bachar Kachouh.

3.8.1. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

Introduction

Nos sociétés reposent sur une complexité et une quantité toujours croissante de systèmes technologiques, majoritairement automatisés. Les besoins de sûreté (en terme de coût, de fiabilité et de sécurité) de ces systèmes sont un enjeu clé et en constante croissance. Les techniques permettant d'assurer cette sûreté doivent évoluer pour répondre à ces nouveaux défis, alors que les enjeux de fiabilité n'ont jamais été plus critiques.

Il existe deux approches complémentaires pour concevoir un système sûr, qui sont étudiées dans l'équipe. La première consiste à utiliser des techniques de vérification sur des systèmes existants. Citons le test, la vérification de modèle (model checking) et les méthodes déductives (preuve). La seconde consiste à concevoir des systèmes sûrs *par construction*. Pour cela il s'agit d'utiliser des méthodes et outils garantissant la correction des systèmes. Citons l'extraction de programme à partir de preuves, les compilateurs certifiants et les langages spécifique (DSL) et/ou à base de composants certifiés. Notons que dans ces deux approches les outils utilisés forment un socle dont la correction est la pierre angulaire de la fiabilité de tous les systèmes. Ces outils *eux-mêmes* doivent donc faire l'objet de vérifications extrêmement rigoureuses. En quelques sorte ils doivent être fiables *au carré*. Certaines techniques coûteuses en temps (notamment déductives) se justifient particulièrement dans ce domaine.

L'équipe SYS consacre ses recherches à la spécification, la conception, la vérification et l'évaluation des systèmes, en particulier des applications critiques. L'objectif est de développer des méthodes, techniques, modèles de programmation et outils permettant d'énoncer les

propriétés recherchées pour des applications et de démontrer que ces applications satisfont rigoureusement les propriétés attendues.

Les recherches menées dans notre équipe entrent en général dans le cadre des méthodes formelles. Nos activités sont de deux natures : premièrement appliquer ces méthodes à des domaines innovants : données de santé, robots autonomes, lignes de produits, compilateurs, kernel linux ; deuxièmement concevoir de nouvelles techniques de conception, de programmation et de vérification.

Par ailleurs les compétences de l'équipe s'articulent autour de trois axes qui structurent nos contributions : (1) l'axe « Langage, Typage, Sémantique et Preuves », (2) l'axe « Vérification et Évaluation de Systèmes Parallèles et Asynchrones » et (3) l'axe « Architecture Logicielle et Système ». Nous détaillons quelques résultats marquants dans la suite pour chacune des ses trois composantes.

Langages, typage, sémantique, preuve

L'expertise autour des thèmes de vérification, sémantique des langages, typage et preuve mécanisée reste un élément fédérateur de l'équipe. Les principaux thèmes développés ces dernières années dans cette composante sont la preuve mécanisée de systèmes distribués (essaims de robots), d'algorithmes d'ordonnancement, et l'étude de modèles de programmation spécifiques (réactifs et distribués).

– **Preuve formelle d'algorithmes d'ordonnancement pour le noyau linux** Dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe Whisper d'INRIA-Paris Maria-Virginia Aponte a participé à la conception d'un outil de preuve d'ordonnancement, intégré à l'outil Ipanema, un langage spécifique développé dans l'équipe Whisper, avec des mécanismes de preuve des ordonnanceurs décrits via ce langage [[hal-02554342](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02554342)].

L'outil introduit la notion de *conservation du travail concurrente* (concurrent work conservation (CWC)), une version plus relâchée de la conservation du travail classique, qui peut être obtenue dans un système où les threads peuvent être créées, bloquées ou débloquées par des événements. La méthodologie a été appliquée sur des exemples de politiques d'ordonnancement et il a été prouvé que ces implantations garantissaient la CWC.

– **Modèles de programmation** Dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'équipe APR du LIP6 et l'équipe SYS du Cédric, et dont le sujet est « Modèles de programmation de haut niveau pour micro-contrôleurs à faibles ressources », Tristan Crolard a dirigé la thèse de Steven Varoumas (commencée en septembre 2015 et soutenue en novembre 2019). Les contributions principales qui ont résultées de cette collaboration sont à la fois théoriques et appliquées [[hal-02340245](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02340245)] : (1) Une nouvelle implantation portable, optimisée pour des micro-contrôleurs à faibles ressources, d'une machine virtuelle permettant d'exécuter du bytecode OCaml a été réalisée. (2) Une extension synchrone du langage OCaml, inspirée de Lustre, et un compilateur, ont été conçus. Les sémantiques statiques et dynamiques de cette extension, ainsi que certaines des étapes de compilation, ont été formalisées en Coq et divers résultats meta-théoriques importants ont été prouvés. (3) Une approche originale pour borner le temps d'exécution dans le pire des cas d'un programme synchrone sur machine virtuelle a été développée et implantée sous forme d'un prototype. Cette approche a été validée formellement, en se basant sur un langage assembleur idéalisé, et les résultats principaux ont été prouvés en Coq.

D'autres modèles de programmation sont également étudiés dans l'équipe, avec le modèle réactif SugarCubes développé par Jean-Ferdinand Susini, dont l'intérêt principal est d'avoir

une sémantique simple et déterministe, sans sacrifier à l'expressivité, ce qui laisse la place à des techniques de vérifications de programmes.

Par ailleurs dans le cadre du projet ANR SAPPORO (voir plus bas), différents modèles de programmation d'essaims de robots à faibles capacités sont étudiés et comparés. En effet le modèle initial dû à Suzuki et Yamashita a été décliné en de nombreuses variantes suivant les capacités accordées aux agents (vision parfaite ou limitée, mémoire fiable ou non, accès à une boussole ou non, etc). Chaque variante correspond à un modèle de calcul différent dans lequel l'ensemble des tâches qu'un essaim de robots peut (preuve de protocole) ou ne peut pas accomplir (preuve d'impossibilité) est différent.

Vérification et Evaluation de Systèmes Parallèles et Asynchrones

Cette thématique centrale de l'équipe SYS comprends 2 parties : l'une orientée vers le model checking et la théorie des réseaux de Petri, l'autre vers la preuve formelle et ses applications dans la vérification de systèmes distribués.

– **Preuve de protocole d'essaims de robots** Pierre Courtieu et Maria-Virginia Aponte étudient les preuves de protocoles d'essaims de robots (projet ANR SAPPORO) et contribuent à la librairie Pactole dédiées à ce type de systèmes distribués dans l'assistant de preuve Coq. Plusieurs protocoles (prouvés formellement) ont été conçus et prouvés dans ce cadre, ainsi que des preuves d'équivalences de modèle [[hal-03901898](#)] [[hal-03425768](#)]. Un contrat post-doctoral est en cours dans l'équipe SYS sur ces sujets, ainsi que des stages de master.

– **Model checking et réseau de Petri** Kamel Barkaoui poursuit ses études sur la théorie structurelle des réseaux de Petri, les techniques d'ordre partiel et leurs extensions aux systèmes temps réel. Nous citons quelques-uns de ses nombreux travaux et collaborations ici.

Il a montré que l'ajout d'arcs inhibiteurs étiquetés avec un intervalle entier permettait la synthèse de contrôleurs avec un nombre de place de contrôle très limité [[hal-02476553](#)]. Il a proposé une politique adaptative de contrôle des blocages dans des systèmes automatisés de production qui, sous plusieurs types de ressources non fiables, permettent d'assurer la vivacité du système [[hal-03154125](#)]. Il a également étudié la décidabilité du problème de la prévention des blocages pour les réseaux de Petri avec contraintes de temps sur les transitions [[hal-03769998](#)].

Kamel Barkaoui a également travaillé sur l'évaluation de performances et la sûreté de fonctionnement des systèmes et réseaux en proposant des modèle stochastiques (et leurs équations d'équilibre), pour les réseaux sans fil intégrant différents types de fautes (collisions, erreurs de transmission et pannes de serveurs) menant à des retransmissions de paquets [[hal-02585949](#)], [[hal-02475784](#)].

Architecture Logicielle et Système

Nicole Levy et Yann Pollet étudient la possibilité de développer des systèmes sûrs par construction. Les raisonnements sous-jacents nécessaires peuvent être mémorisés dans un modèle de caractéristiques lié à une bibliothèque de composants réutilisables, éventuellement associés à leur preuve, et définissant une *ligne de produits*. Ils ont analysé des méthodes pour développer et faire évoluer des systèmes complexes et de qualité en se basant sur l'analyse des besoins et les architectures logicielles, mêlant propriétés fonctionnelles et non fonctionnelles [[hal-03191093](#)].

Ce travail de compréhension des mécanismes de construction de lignes de produits a été mené dans le cadre d'un partenariat avec la société Berger Levraut, société éditrice de

logiciels de gestion de mairies, et actuellement avec la société Syscience dans un cadre d'ingénierie système.

– **Systèmes de décision basés IoT** Les systèmes terrain basés sur des objets connectés, comme par exemple les systèmes de *Smart Farming*, nécessitent des approches robustes pour générer des décisions pertinentes en temps contraint. Yann Pollet a abordé le problème de prédiction d'événements, comme les transitions de stades phénologiques d'une (agri)culture via l'agrégation de sources multiples, et proposé pour ce faire l'utilisation de l'intégrale de Choquet. Un problème non trivial est ici celui d'identifier les valeurs des paramètres à partir de données expérimentales, qui délivrent non les valeurs d'une fonction à apprendre, mais des relations de préférences.

Il a élaboré dans ce cadre une approche d'apprentissage robuste basée sur la minimisation d'une fonction énergie, puis développé un certain nombre d'extensions comme la prise en compte du contexte via des prédicats flous ou encore la définition d'une intégrale floue permettant la prise en compte d'effets non linéaires attachés à certains critères ou groupes de critères [[hal-03789592](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03789592)].

Activité de recherche en pédagogie et accessibilité

– **Manuels scolaires inclusifs** Un axe de collaboration avec l'équipe ILJ s'est vu confirmé par l'obtention d'un projet ANR (MALIN) concernant la conception de manuels scolaires inclusifs via l'analyse de manuels existants par des techniques d'apprentissage. O.Pons encadre plusieurs jeunes chercheurs (doctorants, stagiaires) sur ce sujet.

– **Pédagogie** Une partie de l'équipe SYS est très investie dans la pédagogie. Leurs activités, sans entrer dans les canons de la recherche stricto sensu, mérite d'apparaître ici, notamment en regard des critiques de la précédente évaluation HCERES concernant l'absence de certains membres de l'équipe dans le rapport.

François Barthélémy a mené des travaux portant sur les aspects technologiques de la surveillance d'examens à distance. Dans ce cadre, il a évalué une solution commerciale existante reconnue par le ministère de l'enseignement supérieur et il a investigué les possibilités d'utilisation des technologies WebRTC définies par le W3C qui permettent de faire du partage d'écran et de vidéo sur le Web en utilisant exclusivement un navigateur côté client.

Joëlle Delacroix s'intéresse aux publics en difficulté. Une grande part de la jeunesse actuelle se trouve en difficulté dans sa poursuite d'étude dans l'enseignement supérieur, notamment par manque de qualification et de difficulté d'abstraction.

Pour ce public, la proximité de la programmation avec les mathématiques, discipline pour laquelle ils sont souvent en échec, peut rebuter. Outre vaincre cette appréhension il faut aussi mettre en œuvre des méthodes pédagogiques dites « actives » non descendantes, dans lesquelles l'apprenant participe activement à la construction de ses savoirs et compétences.

Dans le cadre des formations à la programmation/algorithmique dont J.Delacroix est responsable, elle s'attache à définir et mettre en œuvre des approches actives, très pratiques et si possible un peu ludiques, en mobilisant les ressources du web et celles des outils numériques. Ces réflexions portent également sur d'autres domaines de l'informatique comme le réseau, le système et l'architecture des ordinateurs. Cet axe de son travail l'amène également à rédiger des articles de vulgarisation pour le grand public : participation à l'écriture de l'article La mémoire virtuelle, une abstraction féconde, De Claude kaiser, revue Interstices.info de l'INRIA ; « Mémoire et unité centrale, un couple dédié à l'exécution des programmes », 21 juin 2019, revue Interstices.info ; « Alain Cazes, Architecture des machines et des systèmes

informatiques », 7 mars 2018, Dunod ; « Informatique - 2e éd. » (co-auteure)), 15 mars 2023, les Manuels Visuels pour la Licence, Dunod.

3.8.2. Profil d'activités liées à la recherche

Activités (100 points répartis sur 7 items)	
Administration et animation de la recherche	0
Aide aux politiques publiques et expertise technique	10
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	0
Dissémination de la recherche	0
Recherche et encadrement de la recherche	75
Valorisation, transfert, innovation	10
Autre activités	5

Autour de l'activité principale de recherche, certains membres de l'équipe ont participé aux politiques publiques : comme membre d'un comité de pilotage de pôles de compétitivité (M.V.Aponte), chargée de mission auprès du ministère de l'enseignement et de la recherche (N.Levy) et déléguée scientifique à l'Hcéres (V.Donzeau-Gouge). Les thèses CIFRE sont l'occasion d'un transfert industriel.

3.8.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Le rapport soulignait le faible nombre de chercheurs par thématique. C'est un problème qui demeure même si nous avons fait des efforts concernant les collaborations extérieures. Notamment K. Barkaoui dont les collaborations sont nombreuses, mais aussi M.V. Aponte avec l'équipe Whisper (Inria Pairs), et O. Pons avec l'équipe ILJ du Cédric. Des collaborations sont en cours avec le monde industriel également : N.Levy et Y.Pollet avec les entreprises Berger Levraut puis Syscience. Des projets financés ANR (SAPPORO, MALIN), un nouveau membre associé (M. Layth Sliman) et des recrutements temporaires (stagiaires, post-doc).

Concernant la mise dans des archives ouvertes de nos publications c'est chose faite, grâce à la systématisation du dépôt dans HaL organisée par le laboratoire.

Le rapport signalait que les contributions logicielles de l'équipe gagneraient à être rendues plus visibles. La question se pose encore de la méthode pour cela. Si nous saluons la possibilité de déposer dans les archives ouvertes des logiciels comme une catégorie de « publication », cela reste impossible lorsque le logiciel en question est une œuvre collective : comment déposer sur HaL le millier de lignes de code implémentant une fonctionnalité dans un logiciel par ailleurs libre et développé par des dizaines d'autres personnes ? La question reste posée et nous y réfléchissons.

Le rapport signalait que les axes internes de l'équipe n'avaient pas beaucoup de liens et que certains membres publiaient très peu. L'intégration dans des projets grâce aux ANR a fonctionné. Il reste plusieurs membres sans réelle activité de recherche.

Le rapport soulignait un projet trop « foisonnant » concernant l'axe 2, il semble néanmoins que beaucoup des thématiques invoquées alors ont bien fait l'objet de publications, mitigant la critique a posteriori.

Le dernier point mentionné était l'absence des thématiques de certains membres de l'équipe dans le rapport. Nous avons essayé de corriger cela ici.

3.8.4. Introduction du portfolio

Le portfolio contient une sélection de papiers et de présentations qui reflète quelques-unes des réalisations emblématiques de l'équipe au cours de la période. Le choix est arbitraire, nous avons essayé de proposer dans la mesure du possible des présentations plutôt que des articles par ailleurs disponibles, et nous avons mis en avant les travaux ayant un caractère collaboratif.

- La présentation faite à Eurosyst concernant le travail la preuve d'ordonnanceurs multi-cœur (travail de M-V. Aponte avec l'équipe Inria Whisper).
- L'article de Y.Pollet (ICSOFT 2022) sur l'utilisation de l'intégrale de Choquet pour la prédiction des stade évolutifs des végétaux pour le smart farming.
- Une présentation de l'approche de la bibliothèque Pactole (pour l'assistant de preuve Coq) sur les protocoles d'essaims de robots (ANR SAPPORO).
- L'article de P.Courtieu sur un nouveau problème de maintien de connexion par un essaim de robots (ANR SAPPORO).
- Le poster des 2 doctorants du projet sur les manuels scolaires inclusifs (ANR MALIN).

3.8.5. Auto-évaluation de l'équipe

Domaine 3, production scientifique

Production La production de l'équipe est correcte mais très déséquilibrée entre les membres de l'équipe. Ce n'est pas un problème nouveau, et cela ne change que très lentement. La plupart des soumissions sont acceptées, ce n'est donc pas un problème qualitatif mais bien quantitatif. Le laboratoire prend soin de favoriser les financements de stages pour les chercheurs reprenant une activité de recherche. Il en est de même lors des classements de demandes de bourses doctorales. Cette politique a porté ses fruits concernant un membre de l'équipe (O. Pons). Nous poursuivons cet effort dans les années à venir. Le recrutement d'un jeune chercheur (Mathias Puech) n'a pas contribué à re-dynamiser l'équipe, celui-ci ayant finalement pris une disponibilité pour des projets personnels après 2 années au Cédric.

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Reuves	11	6	9	0	0		
Conférences	1	5	4	0	3		
Chapitre						1	
Ouvrages						4	

Co-publications L'équipe collabore avec des équipes de renommées internationales, en France comme à l'étranger. Citons les partenaires suivants, avec qui l'équipe a des publications communes sur la période considérée :

Partenaires en France : LIP6 (Sorbonne université), LIRIS (Université Lyon), LRI (Université Paris-Sud), Équipe-Projet Whisper (INRIA-Paris), ETIS (Université Cergy Paris), INTERACT (institut polytechnique Unilasalle).

Partenaires à l'étranger : RIADI (Manouba, Tunisie), Faculté de Technologies d'Abbey et d'Engineering de Hadath (Liban), Lab SysCom /Ecole Nationale d'Ingenieur de Tunis (ENIT) /Universite Tunis el Manar (UTM), LAMOS /Université de Bejaia, Veriform / Polytechnique Montréal, Systems Control & Automation Group / Xidian University, Macau University of Science and Technology (MUST).

Domaine 2, attractivité

- P.Courtieu est membre du comité de pilotage de l'assistant de preuve Coq.
- M.V.Aponte a été en délégation dans l'équipe Whisper (Inria Paris) pendant 6 mois.
- K.Barkaoui est : Associate Editor for the International Journal IJCCBS, Associate Editor for IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Associate Editor for Frontiers in Theoretical Computer Science Journal, Membre du comité de rédaction du journal ARIMA, Membre

of the Tunisian Academy of Sciences, Letters and Arts (Beit al-Hikma), Vice-Président de l'African Society in Digital Sciences, Steering committee chair of the International Conference VECoS.

L'équipe SYS a accueilli sur la période : 7 doctorants, 4 stagiaires de M2, 1 post-doctorant, 1 maître de conférence, ainsi que des chercheurs confirmés : 2 membres associés.

Succès aux appels L'équipe a obtenu sur la période des financements sur projets : les ANR SAPPORO (2019-2024) et MALIN (2022-2025), la thèse CIFRE de M. Kordestani (soutenue fin 2021), le contrat collaboration recherche avec l'entreprise Berger Levraut (17-19) puis Sys-science.

3.8.6. Trajectoire de l'équipe

Perspectives

Outre l'approfondissement des thématiques ci-dessus, nous notons ici quelques idées émergentes qui nous semblent prometteuse pour les années qui viennent.

– **Manuel scolaires inclusifs : Un thème émergent** L'axe de collaboration citée plus haut avec l'équipe ILJ (ANR MALIN, génération de manuels scolaires inclusifs par des techniques d'apprentissage) nous semble à la fois encourageant et solide. Il s'appuie à la fois sur l'expertise en langages de l'équipe SYS et sur l'expertise en accessibilité et IHM de l'équipe ILJ. Pour l'instant cet axe de recherche reste un axe inter-équipe, et pourrait le rester, mais si cela se poursuit une restructuration reflétant cette nouvelle composante pourrait être envisagée.

– **Preuve d'abstraction de modèle** Un travail en cours que nous jugeons prometteur consiste à fournir aux utilisateurs de model checking des outils de preuve formelle leur permettant de certifier les étapes d'abstractions faites lors de la définition du modèle du système à vérifier. L'idée étant que le système *réel* et le modèle abstrait (envoyé au model checker) peuvent être formalisés dans l'assistant de preuve ainsi que la preuve formelle que le modèle abstrait est correct par rapport au modèle réel, étape généralement effectuée sur papier. Le fait que le model checking et la preuve formelle soient deux compétences de l'équipe SYS suggère que ce travail pourrait amener un axe de collaboration interne peu présent aujourd'hui.

Recrutements, départs Un certain nombre de membres de l'équipe vont partir en retraite d'ici 2-3 ans, dont probablement 2 ou 3 PU. La période qui s'annonce sera donc importante en matière de recrutement pour l'avenir de l'équipe. Vu le manque de publications communes en interne dans l'équipe, il conviendra de recruter des profils fédérateurs en lien avec les thématiques déjà présentes.

SWOT

Forces	Faiblesses
Le noyau de l'équipe avec une forte expertise en langages et méthodes formelles.	Taux de publication très inégal. Difficulté à pousser un travail jusqu'à sa publication.
Opportunités	Menaces
Les collaborations s'intensifient intra et extra-CÉDRIC, c'est encourageant. Le départ de plusieurs membre de l'équipe est autant un risque (perte d'éléments moteurs) qu'une opportunité (recrutement).	Un certain découragement à la publication. Le départ de plusieurs membre de l'équipe est autant un risque (perte d'éléments moteurs) qu'une opportunité (recrutement).

3.9. Autoévaluation de l'équipe VERTIGO

Composition de l'équipe

Permanents	
Responsable	Marin Ferecatu
Profs Université MCF	Philippe Rigaux, Michel Crucianu. Marin Ferecatu (HDR), Raphaël Fournier-S'niehotta, Nicolas Audebert, Clément Rambour, Serge Rosmorduc.
Chargés de recherche	Florent Jacquemard.
Non permanents	
Associés	Nicolas Travers, Nicolas Thome.
Post-doctorants	Denis Coquenot, Valerio Marsocci.
Ingénieurs CDD	Armand Verstraete.
Doctorants	Wafa Aissa, Laura Calem, Oussama Ayoub, Perla Doubinsky, Tiange Zhu, Lydia Rodriguez de la Nava, Yannis Karmim, Loic Themyr, Elias Ramzi, Foutse Yuehgoh, Jihane MALLI, Marc Lafon, Emanuele Dalsasso, Maxime Mérizette, Georges Le Bellier.

3.9.1. Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

Thématiques. Les thématiques de recherche de l'équipe se trouvent à l'intersection de plusieurs thèmes d'actualité : l'apprentissage statistique, la science des données, la structuration du contenu en vue de rendre les données plus transparentes pour les applications.

Plus spécifiquement, la recherche de l'équipe porte sur les méthodes d'extraction de connaissances, l'apprentissage statistique et les réseaux de neurones profonds pour la reconnaissance des éléments et structures sémantiques dans des données hétérogènes (données multimédia, images, vidéos, satellite, données temporelles, données structurées, etc). Les applications principales sont dans l'analyse sémantique, l'extraction de représentations et de connaissances avec une vue directe sur le contenu et son interprétation sémantique.

Enjeux. Avec l'avènement récent de l'internet des objets (*Internet of Things : IoT*) et le nombre croissant d'appareils connectés (selon *IoT Analytics*, il y avait 12 milliards de connectés appareils en 2021), l'intelligence artificielle fait désormais partie de notre quotidien. Ces machines connectées utilisent des modèles d'apprentissage par la machine (*machine learning : ML*) et intelligence artificielle (*IA*) qui interviennent systématiquement dans le processus de prise de décision. De plus, les applications de l'IA touchent à l'heure actuelle pratiquement tous les domaines de l'activité humaine et leur utilisation est devenue d'une importance majeure dans notre société.

L'équipe s'intéresse aux problèmes soulevés par la gestion de données complexes, avec une orientation forte vers des données dont la structure, explicite ou non, nécessite des techniques spécifiques d'approximation, d'extraction et d'interrogation. Il s'agit de collections d'images, de vidéos, de documents audio ou musicaux, mais aussi de documents de l'observation de la terre (imagerie satellite, aérienne et multi-spectrale) et d'imagerie médicale. Nos objectifs généraux sont d'extraire de l'information, de construire des techniques d'accès efficaces et de proposer de nouvelles méthodes de gestion de données basées sur le contenu et sur des méta-données décrivant ce contenu.

Pendant la période d'évaluation, l'équipe a été organisée en deux axes :

Axe 1. Grandes bases d'images et de vidéos.

Les travaux de cette axe s'inscrivent dans un contexte caractérisé par une croissance explosive de la production de contenus numériques, une révolution du stockage numérique (permettant de conserver – facilement accessibles – des masses de contenus au-delà de l'utilisa-

tion pour laquelle ils avaient été produits ou collectés au départ) et le développement rapide des capacités de transmission numérique, qui rend possible la diffusion distribuée et le partage à distance de grands volumes de contenus. Nous nous concentrons sur la structuration, à partir du contenu visuel, de grandes bases d'images et de vidéos, ainsi que sur la recherche par le contenu dans de telles bases. Nos travaux récents s'intéressent à l'apprentissage profond dans le domaine de l'image pour la détection des motifs visuels et pour la segmentation sémantique, avec une tendance d'évolution vers l'analyse sémantique des scènes en prenant en compte les relations structurelles à différents niveaux de localité. Ces approches s'appliquent d'ailleurs très bien aux données de nature différente, comme les données musicales, qui combinent des structures à différentes échelles et sont en général caractérisées par des nombres relativement faibles de données étiquetées par classe.

Dans la période d'évaluation, la disponibilité de très grandes bases annotées et de ressources de calcul adaptées aux réseaux de neurones de grande taille nous a amené à orienter les travaux de cette axe dans plusieurs directions complémentaires :

— ***Apprentissage statistique pour des données multimédia hétérogènes.*** Nous nous sommes d'abord intéressés à deux problèmes difficiles et liés, l'apprentissage à partir de flux de données et l'apprentissage de nouvelles classes avec peu d'exemples. Dans la première direction nous avons démarré la thèse d'Andrey Besedin (soutenue fin 2019), qui s'est intéressé principalement à la difficulté d'apprendre dans un flux non contraint où de nouvelles classes peuvent apparaître à tout moment et d'anciennes classes peuvent être absentes quelque temps pour revenir ensuite, alors qu'il est difficile, pour des raisons de ressources de stockage et de calcul, de conserver la totalité des données historiques et tout réapprendre périodiquement [[hal-02937546](#)]. Dans la seconde direction nous avons démarré la thèse de Yannick Le Cacheux (soutenue fin 2020) sur l'apprentissage dit « sans exemples » (*Zero-Shot Learning*, ZSL) qui vise à pouvoir déterminer la classe d'appartenance pour des exemples issus de nouvelles classes (non vues préalablement) après avoir appris un modèle sur d'autres classes (vues préalablement). Les deux problèmes se situent dans le domaine plus large du « transfert d'apprentissage » [[hal-02440364](#)].

Au-delà des résultats directs issus des travaux réalisés, ces deux thèses ont mis en évidence l'importance pour le transfert d'apprentissage de (i) l'extraction de représentations compositionnelles (qui reflètent à la fois les parties et les relations entre parties) pour les images, ainsi que de (ii) l'apprentissage de relations riches entre la modalité visuelle et la modalité textuelle (le texte pouvant souvent servir de supervision faible pour caractériser des images). Nous avons démarré en 2019 une thèse (Wafa Aissa) sur cette problématique, avec l'objectif de contribuer à la compréhension de scènes visuelles par un « raisonnement » sur la représentation compositionnelle de l'image [[hal-04045405](#)]. L'acceptation par l'ANR du programme de contrats doctoraux cofinancés AHEAD nous a permis de démarrer fin 2020 une nouvelle thèse (Perla Doubinsky) sur le contrôle de la génération d'images caractérisées par des attributs multiples en améliorant la capacité à contrôler chacun des attributs séparément des autres [[hal-03404279](#)].

Une autre direction que nous avons poursuivie dans cette thématique est la recherche de contenu dans les images. Cette direction regroupe des problématiques liées à la recherche de concepts sémantiques dans des images ainsi qu'à la recherche d'instances similaires dans de grands volumes de données. L'apprentissage profond présente des performances impressionnantes pour cette tâche appliquée aux images naturelles. L'extension à des modalités différentes issues par exemple de la télédétection ou de l'imagerie médicale n'est pas évidente et nécessite des adaptations. Sur ce point, plusieurs contributions ont été proposées en imagerie naturelle [[hal-03901666](#)] ainsi qu'en télédétection [[hal-03901666](#)] et imagerie médicale [[hal-04071148](#)], [[hal-03337089](#)]. La recherche de contenu est un autre point crucial lié aux quantités massives de données disponibles (documents, images, méta-données). Sur ce point,

plusieurs contributions ont pu être valorisées dans des conférences majeures [[hal-03359605](#)], [[hal-03712933](#)], [[hal-03359605](#)]. Deux thèses sont actuellement en cours sur ces questions, l'une en imagerie médicale (Loic Themyr) et l'autre en recherche d'images (Elias Ramzi). Des techniques d'apprentissage profond pour la télédétection ont été également poursuivies, notamment au sein des projets SESURE (super-résolution d'images satellites) et MAGE (apprentissage profond semi-supervisé pour la cartographie à partir d'images aériennes simulées).

— **Modélisation physique et restauration d'images.** Dans de nombreuses modalités (radar, ultrasons, laser), les observations ne sont pas directement visualisables sous forme d'image et doivent être traitées en prenant en compte les spécificités physiques des capteurs utilisés. Pour être synthétisées, les images nécessitent généralement la résolution d'un problème inverse dépendant des conditions d'acquisition. Par ailleurs, une fois cette étape effectuée, les images obtenues ne sont généralement pas utilisables de par la présence de bruit et de distorsions résiduelles. Une seconde étape de restauration est donc souvent nécessaire pour pouvoir réellement obtenir des données interprétables. Le projet ANR ASTRAL, portant sur le développement de techniques d'apprentissages profond pour l'imagerie SAR multidimensionnelle, démarré en janvier 2022, s'inscrit dans cette direction. Ce projet a permis le recrutement d'un post-doctorant (Emanuele Dalsasso) pour un an, travaillant sur le développement de modèles multitâches pour le débruitage et la segmentation d'images SAR. Plusieurs publications s'inscrivent dans ce thème en imagerie SAR et médicale ainsi que calcul de flot optique et recalage [[hal-03717740](#)].

— **Modélisation de graphes dynamiques,** appliquée à divers problèmes dont les systèmes de recommandation. Une première étude porte sur les *Heterogeneous Interaction Networks* et les flots de liens, deux extensions de la modélisation des graphes, et examine leur intérêt pour les systèmes de recommandation, en terme de précision comme de diversité [[hal-03608575](#)]. Avec le doctorat de Yannis Karmim, les travaux se poursuivent sur les modèles de graphes dynamiques et de la recommandation, cette fois avec des méthodes reposant sur l'apprentissage profond (*Graph Neural Networks*). Enfin, des travaux sur le raisonnement dans des graphes de connaissance, en vue d'appliquer ces résultats à la méthodologie historiographique, sont poursuivis dans le projet ANR Daphné.

Axe 2. Informatique musicale

L'équipe développe et maintient, depuis plus de 10 ans, une plate-forme de stockage et d'interrogation de partitions musicales numérisées, [[Neuma](#)]. La numérisation repose sur un encodage en langage XML des éléments constitutifs de la notation musicales (notes, accords, organisation rythmique, structuration en parties/voix). Au cours de la période écoulée, nous avons développé une nouvelle approche ambitionnant de dépasser le cadre restreint des partitions numérisées en XML pour traiter les collections de documents musicaux dans des formats multiples, et notamment les images (*scans*) de partitions (très fréquentes dans les bibliothèques musicales) et les documents audios. L'originalité de cette approche est de conserver l'idée de décrire le *contenu musical* de ces documents avec le langage de la notation. Ce langage est en effet éprouvé pour la représentation structurée de créations musicales issues de régions et de périodes très diverses.

Au cours de la période, nous avons tout d'abord formalisé le modèle de données implicitement défini par la notation dans un *music score model* publié en 2018 [[hal-02435620](#)]. Cette modélisation structurée en arbres ou dags reflète naturellement l'organisation hiérarchique des contenus mélodiques et harmoniques dans la notation musicale occidentale. De plus, elle permet l'application de techniques et modèles issus des langages formels (automates et grammaires d'arbres pondérés). Nous l'avons utilisée pour qualifier la *qualité* de la notation [[hal-01895171](#)] [[hal-03163156](#)] et pour l'extraction de motifs et de caractéristiques (*features*), notamment pour l'indexation de collections de partitions [[hal-02289196](#)] [[hal-03678103](#)].

Nous avons bénéficié de l'expertise de Florent Jacquemard (qui a rejoint l'équipe en 2017)

pour entamer des travaux sur la *transcription musicale* (passage de l'audio à la notation). Une première thèse (Francesco Foscarin), financée par le projet ANR MunIR (2016-2020), a étudié la transcription de monodies fondée sur des techniques de parsing quantitatif [hal-01988990] [hal-02024437]. Nous avons à cette occasion produit et publié un jeu de données annoté qui est maintenant largement utilisé [hal-02929324]. Une seconde thèse (Lydia Rodriguez de la Nava), en cours et financée par INRIA, étend ces travaux aux sources polyphoniques.

La reconnaissance optique de partitions (OMR) fait l'objet du projet ANR CollabScore (2021-2025). La numérisation obtenue doit permettre l'alignement de documents musicaux aux formats divers basé sur la notation. En alignant par exemple une image de partition en un document audio, il devient possible d'écouter l'audio tout en suivant un curseur défilant sur l'image [hal-03583179].

Une recherche en cours porte sur l'extension du moteur de recherche à partitions proposé dans [hal-02289196] en un outil plus générique, capable de s'interfacer avec des graphes de connaissances externes et de proposer une recherche à facettes, ce qui nécessite des travaux sur les similarités et le clustering de documents musicaux. Cette recherche est intégrée au projet européen Polifonia dans lequel nous étendons une ontologie de la notation musicale proposée dans [hal-02454536].

Animation scientifique de l'équipe

L'équipe a mis en place un séminaire interne régulier (toutes les deux semaines) où les doctorants et les membres permanents de l'équipe présentent et discutent leur travaux de recherche. Parfois des intervenants externes sont invités pour présenter des travaux en lien avec ceux de l'équipe. Alternant avec les séminaires nous organisons aussi un Journal Club, où les membres de l'équipe présentent et discutent des publications récentes dans le domaine.

Pour la gestion interne, l'équipe se réunit régulièrement pour avancer collectivement sur les questions d'organisation et les aspects budgétaires ainsi que l'administration de l'équipe (particulièrement avant les réunions du conseil du laboratoire, ainsi qu'au début et à la fin des semestres d'enseignement). Du point de vue logistique, un intranet a été mis en place pour faciliter la gestion interne des locaux, matériels et l'accueil des nouveaux arrivants.

3.9.2. Profil d'activités liées à la recherche

Activités (100 points répartis sur 7 items)	
Administration et animation de la recherche	10
Aide aux politiques publiques et expertise technique	5
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche	10
Dissémination de la recherche	5
Recherche et encadrement de la recherche	60
Valorisation, transfert, innovation	10
Autre activités	0

Même si le cœur de notre activité reste la recherche et l'encadrement de la recherche (11 thèses soutenues, 14 thèses en cours), une partie de nos efforts est dépensée dans le transfert technologique (via un grand nombre de thèses CIFRE et collaborations industrielles), mais aussi dans d'autres activités comme l'animation scientifique (par exemple, par le séminaire interne de l'équipe et l'organisation des journées nationales du GDR Isis) et des enseignements innovants (mise en place en 2021 au CNAM d'un Certificat de spécialisation en IA).

3.9.3. Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Le rapport précédent recommandait à l'équipe de se focaliser plus sur les publications en revues internationales, d'améliorer le taux d'encadrement de doctorants et de mettre en place une vie d'équipe qui favoriserait plus de réunions régulières, ainsi que le rapprochement

avec d'autres équipes du CÉDRIC, une production scientifique satisfaisante et la recherche de ressources.

L'équipe s'est agrandie en 2019 avec le recrutement de N. Audebert (MCF) et en 2020 avec l'accueil de N. Thome (PU), C. Rambour (MCF) et S. Rosmorduc (MCF). N. Thome est parti en mutation en 2022 mais un recrutement de PU est en cours. Ce renforcement de la capacité d'encadrement a eu un impact important sur la production scientifique, sur les financements obtenus par l'équipe, ainsi que sur le nombre de thèses : le nombre d'articles de revues internationales, de thèses et de financements obtenus ont augmenté sur la période de façon très significative.

Concernant l'organisation de son fonctionnement interne, comme expliqué dans la section précédente, l'équipe a mis en place un séminaire périodique, un Journal Club, et se réunit régulièrement pour des tâches administratives. Des efforts ont aussi été faits pour renforcer les collaborations avec les autres équipes du CÉDRIC, via des publications communes (équipe LAETITIA), co-encadrement de thèses (équipe ISID), projets exploratoires (équipe ILJ : projets « Apprentissage pour le jeu vidéo » et « RL-JEU 2022 », équipe OC : projet PEX ORION) et projets ANR (équipe ILJ - ANR Jeune Chercheur MAGE).

3.9.4. Introduction du portfolio

Le portfolio de l'équipe est composé de :

1. Publication conférence (NeurIPS2021) : Ramzi E., Thome N., Rambour C., Audebert N., Bitot X. Robust and Decomposable Average Precision for Image Retrieval, NeurIPS 2021 [[hal-03359605](#)]. *Résumé* : En recherche d'images, les métriques d'évaluation standard utilisent un classement basé sur le score, par exemple pour l'average precision (AP). Nous introduisons dans cet article une méthode d'optimisation de l'AP qui est robuste et décomposable (ROADMAP). Cette méthode solutionne deux problèmes majeurs pour l'optimisation de bout en bout des réseaux profonds avec l'AP : la non-différentiabilité et la non-décomposabilité. Premièrement, nous proposons une nouvelle approximation différentiable de la fonction de rang, ce qui nous permet d'obtenir une borne supérieure de la fonction de perte d'AP et permet un apprentissage robuste du modèle. Deuxièmement, nous concevons une méthode simple mais efficace de perte contrastive pour réduire l'écart de décomposabilité entre l'AP calculée par batch ou sur le jeu de données entier. Nous démontrons les gains en performance obtenus par ROADMAP sur trois jeux de données de recherches d'images, surclassant plusieurs méthodes récentes d'approximation de l'AP et prouvant l'intérêt de nos deux contributions.
2. Publication journal (Information Systems) : Fournier-S'Niehotta, R. ; Rigaux, P. and Travers, N. Modeling Music as Synchronized Time Series : Application to Music Score Collections. In Information Systems, 73 : 35-49, 2018 [[hal-02435620](#)]. *Résumé* : Ce travail propose d'utiliser le langage de notation musicale comme cadre pour modéliser et manipuler le contenu d'objets musicaux numériques, quel que soit leur encodage spécifique. Nous décrivons une algèbre qui s'appuie sur cette représentation musicale structurée pour extraire, restructurer et rechercher de tels objets. Nous décrivons un système, basé sur une extension de XQuery avec notre algèbre, qui fournit des fonctionnalités de recherche, de réorganisation et d'extraction en plus de grandes collections de partitions numériques encodées en XML. Au-delà de son application aux objets musicaux, notre travail montre comment on peut s'appuyer sur un contenu structuré intégré dans un encodage XML complexe pour développer des outils de gestion de collection robustes avec un effort de mise en œuvre minimal.
3. Note descriptive concernant une chaire Blaise Pascal : L'équipe a accueilli les activités de la Chaire Internationale de Recherche Blaise Pascal occupée pendant 2 ans (2018-

2019) par Mihai Datcu, *Senior Scientist* et leader du groupe de recherche Image Mining au sein du *Remote Sensing Technology Institute (IMF)* du *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)*. La chaire était financée par la Région Ile-de-France et gérée par la Fondation de l'École Normale Supérieure. Les activités sont décrites sur <http://spacedatascience.cnam.fr>

4. Site web du projet européen POLIFONIA : Polifonia met en œuvre un écosystème numérique consacré au patrimoine musical européen. Il rassemble des objets musicaux ainsi que des connaissances sur leur contexte historique, structurés selon les principes du Web sémantique. L'équipe Vertigo y participe, avec 9 autres partenaires, en proposant un système, appelé FACETS, permettant d'explorer des catalogues en lignes de sources musicales. FACETS combine des méthodes de recherche d'information, d'extraction et de structuration de l'information musicale. Le site du projet est <https://polifonia-project.eu/>.
5. Note descriptive sur le prix accordé à Nicolas Audebert, qui a été distingué par le *Research scholar program* de Google en 2022 dans la catégorie GEO. Cette distinction vise à promouvoir les jeunes enseignants-chercheurs en informatique dans l'un des domaines d'intérêt de Google, en évaluant aussi bien leur profil de recherche que la qualité de leur projet. Cette récompense est assortie d'un don sans restriction de 60 000 \$ de la part de Google pour le financement de recherches en apprentissage auto-supervisé à partir de données satellitaires mixtes (synthétiques et réelles), en extension au projet ANR MAGE (2022-2026).

3.9.5. Auto-évaluation de l'équipe

Domaine 3, production scientifique

	Pub. internat.				Pub. nat.	Diffusion	Valorisation
	Q1	Q2	Q3	Q4			
Reuves	9	5	2	0	1		
Conférences	12	14	7	0	8		
Chapitre						5	

D3 R1 – Production scientifique : La production scientifique de l'équipe est publiée principalement dans des conférences et revues internationales de rang A/Q1 et B/Q2 (plus de 80% des publications classées), avec un nombre plus grand de conférences — choix normal dans les domaines de l'apprentissage par la machine et de la vision par ordinateur dans lesquels il y a plusieurs conférences très prestigieuses. Les classements internationaux ont été pris en compte dans le choix des lieux de publication, en privilégiant la reproductibilité et l'augmentation de l'impact des travaux publiés.

L'équipe collabore (et co-publie) avec un grand nombre de partenaires académiques et industriels de premier rang — aussi bien au niveau national : CEA LIST, ONERA, Sorbonne Université, École nationale supérieure des mines de Paris, INRIA Paris, IRISA/Université Bretagne Sud, Université de Lille, Pôle Universitaire Léonard de Vinci La Defense, Institut Supérieur d'Electronique de Paris, Qwant Research, THALES Theresis, CRITEO AI Lab, VALEO AI, COEXIA, Total SA, EDF R&D, — et international : Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR Allemagne), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Université de Varsovie, Université de Nagoya, Agence Spatiale Européenne (ESA), RIKEN Center for Advanced Intelligence Projects (Tokyo).

D3 R2 – La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe et répartie entre ses personnels. Les doctorants et post-doctorants participent activement à la production scientifique, toute publication est co-signée par au moins un doctorant de l'équipe.

Les maîtres de conférences recrutés sont impliqués dans le co-encadrement de thèses. Des projets exploratoires du CÉDRIC, initiés en général par les plus jeunes, permettent de financer le démarrage de collaborations entre équipes.

Domaine 2, attractivité

D2 R1 Rayonnement scientifique : L'équipe a organisé 17 journées nationales du GDR ISIS entre 2018 et 2022, les membres de l'équipe ont été *Conference Chair* et *Area Chair* pour 9 conférences internationales de premier rang (ICCV 2021, CVPR 2020, NeurIPS 2020–2022, ICLR 2021-2022, ICDE 2018).

Prix : En 2022 Nicolas Audebert a obtenu le prix *Google Research Scholar Program award* pour sa proposition de recherche « Mapping Aerial imagery by learning on Game Engine-based simulations ». Vincent le Guen a obtenu le prix de thèse de l'AFIA en intelligence artificielle 2022 pour sa thèse « Deep learning for spatio-temporal forecasting – application to solar energy » dirigée par Nicolas Thome. Autres prix : Outstanding reviewer (ICCV 2021, BMVC 2022).

D2 R2 – Attractivité :

- Post-docs, doctorants : sur la période, l'équipe a accueilli 2 post-doctorants et 25 doctorants (11 thèses soutenues, 14 thèses en cours).
- Chercheurs et enseignants-chercheurs sur poste permanent : un chercheur INRIA, entre 2 et 3 professeurs des universités et entre 2 et 5 maîtres de conférences.
- L'équipe Vertigo a accueilli, de mars 2018 à février 2020, Mihai Datcu sur la Chaire d'excellence internationale Blaise Pascal « *Space Data Science* ». Les activités de la chaire sont présentées sur <http://spacedatascience.cnam.fr>.

D2 R3 – Succès aux appels :

- Projets européens et internationaux : POLIFONIA (01/2021 - 04/2024).
- Projets ANR : DEEPLOMATICS (2018-2022), AHEAD (2020-2026), CollabScore (2020-2024), DIAMELEX (2020-2025), MAGE (2022-2026), POESY (2022-2024).

De plus, l'équipe a aussi mis en place 5 contrats de collaboration industriels, et 5 contrats de thèse CIFRE.

D2 R4 – Équipements : L'équipe dispose de 8 serveurs avec au total 23 cartes graphiques de calcul NVIDIA (de GTX 1080 Ti à RTX A6000), équipements acquis avec des fonds provenant de CIFREs et projets ANR.

Domaine 4 inscription des activités de recherche dans la société

D4 R1 – L'équipe a de nombreuses relations avec le monde économique notamment à travers des contrats CIFRE et de projets collaboratifs. Nous cherchons à pérenniser les collaborations qui ont donné de bons résultats. De nouvelles relations sont établies de façon sélective.

Le CEA est un partenaire de longue date de l'équipe, deux laboratoires différents du CEA ayant déjà financé trois thèses dans Vertigo. Un fait marquant est le financement par l'ANR à partir de 2020 du programme AHEAD dans lequel sont inclus (parmi d'autres financements) deux co-financements de thèses avec le CEA (celui de P. Doubinsky et un autre à démarrer en 2023).

La plupart des thèses encadrées dans l'équipe sont financées par des partenaires non-académiques issus du monde économique (CEA, EDF, Valeo, SWORD, XXii) et/ou du monde de la santé (GE Healthcare, Visible Patient, IRCAD).

D4 R2 – Politique de valorisation et de transfert : l'équipe a privilégié le transfert principalement par l'intermédiaire des thèses CIFRE et des collaborations industrielles. Pendant la période l'équipe a déposé 2 brevets dans plusieurs pays (Europe, Inde, Corée du Sud, Brésil).

D4 R3 – Actions de partage de la connaissance avec le grand public et le jeune public (collège, lycée, etc.) : l'équipe a participé à la Fête de la Science au CNAM en 2017, 2018 et 2019 avec des ateliers portant sur les bases d'images multimédia intelligentes (image, vidéo et capteurs).

3.9.6. Trajectoire de l'équipe

Auto-analyse du bilan. L'équipe a obtenu de bons résultats pendant la période, en terme d'encadrement (11 thèses soutenues, 14 thèses en cours, 2 post-docs), publications et collaborations. Le départ de Nicolas Thome du Cnam en septembre 2022 a affaibli l'équipe dans l'axe de recherche « Grandes bases d'images et de vidéos », mais un nouveau PU doit être recruté au printemps 2023 dans des thématiques proches. Par ailleurs, N. Thome reste membre associé de l'équipe. Le tableau SWOT résume nos forces et faiblesses.

SWOT	
Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> — Domaine très porteur : possibilités de croissance et de diversification. — Très bon niveau de publications. — L'équipe a bénéficié d'un recrutement PU en 2023. — Nombreux projets et collaborations internes (CNAM) et externes (CIFRE et contrats industriels). 	<ul style="list-style-type: none"> — Domaine très porteur : risque de dispersion. — Départ de N. Thome a affaibli l'équipe sur les thèmes données médicales et modèles physiques. — Nous avons besoin de plus de collaborations internationales.
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> — Recrutements pour répondre au demandes de collaboration croissantes internes (au CNAM) et externes. — Nous avons 3 jeunes MdC : possibilités de chercher des projets ANR JC. — Thématiques de recherche au coeur des nouvelles technologies en plein essor aujourd'hui. 	<ul style="list-style-type: none"> — La difficulté à recruter des doctorants. — Domaine qui avance très vite : nécessite une adaptation thématique permanente. — Risque à court terme de départ des membres (HDR, mutations).

Trajectoire prospective pour les prochaines années. L'analyse et l'interprétation du contenu des images numériques, à travers ses nombreuses applications pratiques (e.g. de la création des agents autonomes, systèmes de surveillance, et jusqu'au traitement et la structuration des données complexes), continuera à susciter un grand intérêt dans les années à venir, car les principaux défis sont loin d'être résolus. Par conséquent, les thématiques principales de recherche de l'équipe, décrites en détail dans la Sec. 3.9.1, continueront à rester des voies de recherche prometteuse dans les prochaines années.

En plus, il y a nombre de développement récents que l'équipe a déjà commencé, en partie, à s'approprier, et que nous comptons investir plus à l'avenir :

— **Incertitude et robustesse décisionnelle.** Si les réseaux de neurones profonds présentent des performances impressionnantes dans de nombreuses tâches, il n'est généralement pas possible d'obtenir des garanties sur leurs résultats. Cet aspect « boîte noire » est particulièrement problématique pour leur mise en pratique éventuelle dans des domaines sensibles tels que la santé ou la sécurité. Un enjeu majeur est donc de pouvoir déterminer des régimes de fonctionnement où ces systèmes présentent un risque d'erreur. Dans ce sens, l'équipe a proposé un projet exploratoire interne financé par le laboratoire CÉDRIC et qui a démarré en janvier 2023. Une thèse et un contrat post-doctoral sont par ailleurs en cours sur cette problématique.

— **Interprétabilité et l'explicabilité.** Les problématiques discutées précédemment sont étroitement liées à une autre tendance récente dans notre domaine : alors que de plus en plus de décisions sont prises pour nous par des algorithmes d'IA, la question de l'interprétabilité et l'explicabilité des modèles d'apprentissage et de prise de décision a acquis beaucoup d'importance. Ceci est primordial, par exemple, dans l'industrie où il est essentiel de comprendre les échecs techniques ou les décisions incorrectes, ce qui permet de trouver et de corriger les sources d'erreurs, mais c'est aussi devenu de plus en plus une question de société : des garanties de sécurité, d'absence de biais, acceptabilité sociale et équité, ou même responsabilité juridique sont devenues nécessaires car les techniques d'apprentissage profond sont de nos jours largement utilisées dans des systèmes essentiels, dans des missions critiques, dans la santé, dans les véhicules autonomes et militaires avec des conséquences directes sur la vie humaine. La nature « boîte noire » des réseaux de neurones profonds empêche leur utilisation dans ces applications critiques, soulevant des préoccupations éthiques et juridiques (ex : partage de responsabilités en cas d'accidents) à cause d'un manque de confiance. Dans ce contexte, il existe un intérêt croissant de promouvoir des outils, des techniques et des algorithmes pouvant générer des modèles de décision interprétables, intuitifs et compréhensibles. Dans cette direction une nouvelle thèse doit commencer en octobre 2023 (co-encadrée avec le CEA LIST) sur l'injection de connaissances pour apprendre des représentations multimédia explicables.

— **Frugal computing.** La croissance récente du nombre d'appareils connectés à suscité récemment un intérêt croissant vers des modèles d'apprentissage embarquées, qui doivent fonctionner sur du *hardware* dédié avec peu de ressources de calcul. Ceci est aussi lié à un intérêt général pour des modèles qui nécessitent moins de ressources pour être entraînés et fonctionner (*green computing*). Dans ce sens également, l'équipe a commencé en novembre 2022 une collaboration avec la société Cocoparks sur des modèles embarquées dans des caméras de surveillance pour la détection des voitures et places de parking en milieu urbain.

Pour l'axe **informatique musicale**, nous visons à étendre notre approche originale, basée sur la description formelle du contenu musical, à la gestion de documents audios et images (*scans* de partitions). Cette extension est importante car ce type de document est beaucoup plus fréquent que les partitions numérisées, et la description de leur contenu dans un langage structuré offre des pistes très prometteuses. Nous allons donc poursuivre nos travaux sur la reconnaissance optique (OMR) avec la poursuite du projet CollabScore, et sur la transcription d'enregistrements polyphoniques. Pour ce dernier thème, nous commençons à étudier l'application à la transcription musicale de modèles génératifs issus de l'apprentissage profond, guidés par des grammaires (modèles appliqués jusqu'alors à la synthèse moléculaire).

La production d'une notation à partir d'un document audio ou d'un *scan* permet des opérations de valorisation de leur contenu. On peut générer par exemple des interprétations de manière à pouvoir fournir une écoute « réaliste » de documents comme un *scan* de partition, dont le contenu est sinon difficilement accessible aux non-initiés. Cette même notation structurée est propre à fournir une base intéressante pour renouveler des thématiques anciennes comme la similarité de pièces musicales ou l'attribution d'œuvres à des compositeurs. Nous

envisageons par exemple l'apprentissage de représentations (*embeddings*) à partir de la forme hiérarchique de la notation musicale, pour améliorer les performances sur ces tâches.

De manière générale, comme le montrent les objectifs précédents (modèles génératifs, *embeddings* de graphes), les travaux de l'axe 2 vont s'orienter vers la mise en œuvre de méthodes d'intelligence artificielle, ce qui permettra d'une part de bénéficier de l'expertise de l'axe 1, et d'autre part de renforcer la cohérence des recherches menées dans l'équipe.

Chapitre 4. Trajectoire

4.1. SWOT du CÉDRIC

Nous commençons par présenter une matrice SWOT du CÉDRIC. Les principales forces ont été exposées dans l'autoévaluation et satisfont les fondamentaux de l'activité d'un laboratoire scientifique : une production de haut niveau, une capacité à se financer via des collaborations avec des acteurs externes, académiques ou industriels, et enfin la formation de nombreux doctorants bien financés. Le CÉDRIC bénéficie aussi de la diversité de ses thématiques de recherche qui lui permet de ne pas dépendre d'effets de mode ponctuels.

Forces <ul style="list-style-type: none">— Production scientifique de haut niveau— Forte activité contractuelle— Collaborations industrielles soutenues, notamment via les Cifres— Thématiques scientifiques larges	Faiblesses <ul style="list-style-type: none">— Activité inégalement répartie— Relative inertie thématique— Animation scientifique à améliorer— Support technique et administratif insuffisant au regard de l'activité
Opportunités <ul style="list-style-type: none">— Renouvellement des permanents à venir— Emergence de nouvelles thématiques transverses— Cadre stable, proche de centres de recherche de premier plan	Menaces <ul style="list-style-type: none">— Dynamisme individuel et d'équipe fragiles— Diminution du présentiel : risques sur l'intégration des jeunes chercheurs et doctorants

Quelques faiblesses ont également été soulignées précédemment. On constate une inégale distribution des dynamiques de recherche, au niveau scientifique et sur l'obtention de financements. Certains collègues, voire certaines équipes, souffrent d'un essoufflement de leurs thématiques, auquel s'ajoute les difficultés classiques de la multiplicité des tâches que nous devons assurer et une lourdeur de fonctionnement certaine. Le manque de personnels administratifs au regard de l'activité globale du laboratoire pèse significativement sur la motivation des collègues à s'investir dans des projets dont la gestion serait trop lourde (projets ANR et Européens). Ces difficultés se reflètent également au niveau de l'animation scientifique du laboratoire qui pourrait s'intensifier.

Les recrutements sur la période passée ont été réduits. Ils devraient être plus nombreux dans un proche avenir en raison de départs à la retraite et – espérons-le – d'une mobilité accrue. Ces recrutements sont une opportunité pour le CÉDRIC, puisqu'ils permettront de renouveler en partie les thématiques scientifiques du laboratoire. Ces changements pourraient à la fois remobiliser des collègues parfois en difficulté, mais aussi introduire au niveau de l'unité un dynamisme favorisant l'attractivité du CÉDRIC.

4.2. Les défis de la prochaine période

Nous identifions quatre défis à relever dans un proche futur pour, d'une part, continuer à maintenir au CÉDRIC une production et une attractivité fortes dans le contexte très concurrentiel des laboratoires parisiens, et d'autre part trouver une dynamique qui permette un renouvellement de ses thématiques scientifiques et la saisie des opportunités à venir. À ces défis s'ajoute enfin la nécessité d'une réflexion de fond sur nos pratiques et leur impact éthique et environnemental.

4.2.1. Faciliter les renouvellements thématiques

La structure du laboratoire est relativement statique, la plupart des équipes existant depuis plusieurs dizaines d'années, voire depuis la création CÉDRIC. Cette stabilité peut avoir des avantages en termes de cohérence et de visibilité. Elle a cependant l'inconvénient de fixer des frontières artificielles qui peuvent devenir cloisonnantes, et pénaliser l'émergence de nouvelles thématiques transverses. Certains thèmes de recherche s'appauvrissent ou ne sont plus portés de manière suffisamment forte pour maintenir une activité significative. En contrepartie, des sujets de convergence, rassemblant des chercheurs travaillant à l'origine dans des équipes différentes, pourraient apparaître et devraient être soutenus.

Il paraît difficile d'envisager une restructuration globale sans laisser de côté certains collègues. En revanche, des actions transverses doivent permettre de fluidifier les collaborations et d'encourager la prise de risque. Beaucoup des changements introduits durant la période vont dans ce sens : mise en place des projets exploratoires, définition des axes, et ouverture des profils de recrutement à plusieurs équipes notamment.

À l'avenir, le soutien du laboratoire au développement de groupes-projets orthogonaux aux équipes est une piste à renforcer. Les moyens alloués restent sans doute encore trop limités, mais pourraient augmenter par la mise en place d'un prélèvement systématique sur les conventions, alloué au budget du laboratoire, qui a été décidé mais qui n'a pas encore été appliqué. Cela permettrait au CÉDRIC de renforcer une politique scientifique au niveau de l'unité, qui est à l'heure actuelle principalement déléguée aux équipes.

Sur certains thèmes, peu ou mal représentés, qui font partie des priorités stratégiques de l'établissement, que ce soit en enseignement ou en recherche, un soutien complémentaire de l'établissement devra être affecté au CÉDRIC pour pouvoir les développer. Citons par exemple, pour le Cnam, la cyber-sécurité, l'informatique quantique ou les humanités numériques.

L'ensemble de ces actions doit permettre d'effectuer progressivement une évolution thématique du laboratoire, afin que chaque collègue voie son activité valorisée et reconnue.

4.2.2. Renforcer l'animation scientifique au niveau de l'entité

L'animation scientifique du CÉDRIC doit être renforcée. Des séminaires et réunions sont organisés au sein des équipes, mais de manière assez cloisonnée. Il existe de ce fait peu d'occasions de se rencontrer et d'échanger au niveau de l'unité. C'est traditionnellement le cas pour les assemblées générales (2 fois par an) où sont présentés les projets exploratoires. On peut y ajouter plusieurs commissions créées au cours de la période (locaux, web, contrats doctoraux, publications), avec à chaque fois un représentant de chaque équipe, et donc la possibilité d'un échange au niveau de l'unité.

La définition des axes s'est accompagnée de la mise en place d'un séminaire mensuel en alternance pour chaque axe. La forme consistait à combiner les présentations de deux personnes : l'une, invitée, souvent de niveau senior, et l'autre sollicitée parmi les doctorants. Malheureusement, ce lancement s'est effectué au moment de la crise Covid, et le séminaire n'est pas encore solidement installé à ce jour.

Cette même crise a eu, plus généralement, un impact fort sur le mode de travail, avec une généralisation du télétravail limitant les interactions quotidiennes. À terme, cette situation est pénalisante pour le travail collectif, et elle est susceptible de nuire aux membres temporaires du laboratoire, en particulier aux doctorants. Le CÉDRIC reste sans doute trop, surtout pour les personnels temporaires, une entité assez abstraite.

Les progrès dans l'animation ne peuvent reposer sur la seule direction qui est trop restreinte pour assurer en permanence un rôle moteur. Il faudra sans doute créer une commission *ad hoc*, pilotant les axes et chargée plus généralement de la communication du laboratoire. Il est difficile de mobiliser des collègues pour participer à des manifestations dont l'importance est souvent jugée secondaire par rapport aux tâches du quotidien. Le laboratoire n'étant plus vu alors que comme un guichet fournissant des services, le risque d'une dilution du sentiment d'appartenance au CÉDRIC existe et doit être combattu.

4.2.3. Soutenir et encourager l'activité scientifique

Le CÉDRIC maintient une production internationale dans les meilleures revues et conférences. Comme analysé dans la partie "autoévaluation", cette production est assez inégalement répartie. Il faut fortement nuancer cette constatation en tenant compte des très fortes différences de pratiques selon les domaines représentés au CÉDRIC, et du caractère multifacettes de l'activité d'un enseignant-chercheur. On peut ne pas publier ou peu, et présenter une production scientifique de grande qualité, par exemple en valorisation, médiation, et autres contributions diverses à l'environnement socio-économique. Il n'en reste pas moins que plusieurs collègues paraissent en difficulté, pour des raisons dont la variété a déjà été évoquée.

La situation est problématique quand un collègue est surchargé de cours et ne trouve pas, malgré sa motivation, un projet ou un cadre lui permettant de s'épanouir dans une activité de recherche, avec comme corollaire un blocage potentiel de son évolution de carrière. Le laboratoire doit pouvoir répondre à ce type de situation. C'était déjà une priorité de la direction pour la période, avec des actions comme la mise en place de la règle de co-encadrement, et le financement (modeste) de projets pluri-annuels. Cet effort doit être poursuivi dans la période à venir. Il faudra probablement orienter les recrutements vers de jeunes rangs A extérieurs, apportant dynamisme, sens du collectif, et renouvellement des approches et des collaborations. En interne, des projets pluri-annuels financés plus solidement (par un prélèvement sur les conventions) doivent être non seulement accessibles, mais proposés de manière pro-active quand un sujet semble susceptible d'intéresser un ou plusieurs collègues. Enfin, le laboratoire devra être plus attentif aux charges extérieures à la recherche qui, très rapidement, empêchent qu'une activité équilibrée et sereine puisse se développer.

4.2.4. Renforcer le support technique et administratif à l'échelle de l'activité

Le support technique est un point faible du CÉDRIC, puisque le laboratoire ne dispose que d'un ingénieur, ce qui est pénalisant pour une unité de cette taille. La période n'a malheureusement pas permis de commencer à corriger cette anomalie, en raison de tensions globales à l'établissement sur les postes BIATSS. L'effet se ressent dans notre capacité à mettre en place des infrastructures, à produire et valoriser des productions techniques (logiciels notamment) et à développer des outils internes. Sur ce dernier point un effort a été réalisé par le directeur du laboratoire pour mettre en place un nouveau site web et un système d'information interne, avec l'aide ponctuelle d'un prestataire. Cette solution n'est évidemment pas viable à long terme.

L'équipe administrative travaille avec beaucoup de dévouement dans un contexte difficile, et se trouve confrontée, à effectifs constants, à une augmentation forte de l'activité contractuelle (et à ses effets direct sur les actes de gestion : missions, commandes, recrutements). Elle a de plus effectué des efforts remarquables pour s'adapter au nouveau système d'information

qui vise entre autres à clarifier les procédures et la communication avec les membres du laboratoire. Certaines avancées nécessaires n'ont malgré tout pas été possibles, et notamment un suivi précis du budget, aussi bien pour celui du laboratoire que pour les multiples conventions. Il faudra *a minima* dans la prochaine période trouver les ressources pour qu'une organisation de la taille du CÉDRIC puisse effectuer un véritable pilotage budgétaire.

4.2.5. Responsabilité éthiques et environnementales

Pour conclure, ajoutons que le CÉDRIC ne devrait pas s'abstraire à l'avenir d'une réflexion collective sur les pratiques de recherche et leur impact. Deux sujets au moins paraissent essentiels. En premier lieu, les budgets liés à la publication scientifique apparaissent démesurément captés par des sociétés savantes et éditeurs, au détriment du financement de l'activité de recherche elle-même. Des choix sur une orientation vers la science ouverte devront être faits. En second lieu, nous devons sans doute interroger l'impact de nos pratiques sur le changement climatique, en commençant par le mesurer. Il faudra savoir dépasser la gestion des questions du quotidien et les problèmes purement structurels pour aborder ces sujets à l'avenir.