

Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et
de l'Enseignement Supérieur



DOCUMENT D'AUTOÉVALUATION
Équipe Phare



Campagne d'évaluation 2023-2024 — Vague D

Table des matières

1	INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉQUIPE PHARE	3
1.1	Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	3
	Thématique et positionnement scientifiques	3
	Bilan scientifique et avancées scientifiques majeures	4
	Animation scientifique	4
2	INTRODUCTION DU PORTFOLIO	6
3	AUTOÉVALUATION DU BILAN	7
3.1	Autoévaluation de l'équipe	7
	Domaine 2. Attractivité	7
	Domaine 3. Production scientifique	9
	Domaine 4. Inscription des activités de recherche dans la société	10
4	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES EXTERNES	11
5	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SIGNIFICATIVES DE PHARE	12
A	ANNEXE — MEMBRES PERMANENTS AU 31/12/2022	14

1 INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉQUIPE Phare

Nom de l'équipe : Phare (Phare)

Guy Pujolle (01/01/2017 - 31/08/2019)

Responsable de l'équipe : Thi-Mai-Trang Nguyen (01/09/2019 - 31/08/2022)

Brigitte Kervella (01/09/2022 - 31/12/2022)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
PR	1	1	1	0	0	0
MCF HDR	2	2	1	1	1	1
MCF	1	1	1	1	1	1
DR	0	0	0	0	0	0
CR HDR	0	0	0	0	0	0
CR	0	0	0	0	0	0
Total permanents	4	4	3	2	2	2
Émérites	0	0	0	1	1	1
Doctorants	15	12	10	6	5	4
Ingénieurs CDD ou hors tutelles	2	4	1	1	1	0
Post-doc, ATER, etc.	1	5	0	1	1	0
Stagiaires	7	4	1	2	5	5
Total non permanents	25	25	12	10	12	9
Total avec émérites	29	29	15	13	15	12
Equivalent temps plein recherche	2.0	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0

TABLE 1 – Personnels Phare sur la période 2017-2022 (au 1er juillet de chaque année)

1.1 Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

Suite au départ progressif de plusieurs maîtres de conférences ayant été promus sur des postes de professeur et leur non remplacement, ainsi que le passage du membre fondateur de l'équipe au statut de professeur émérite, l'équipe est passée de 4 permanents en 2017 à un seul permanent en septembre 2022.

A partir de 2020, la direction de l'unité a suggéré aux équipes Phare et NPA de discuter d'une possible fusion de leurs activités. Cependant, la promotion au grade de professeur (Sorbonne Paris Nord) de la responsable de l'équipe en 2022 a précipité cette fusion au 1er janvier 2023. Elle est restée membre associé dans l'équipe NPA.

Thématique et positionnement scientifiques

L'équipe Phare a une thématique scientifique précise : être un des initiateurs européens de la 6G. Cette thématique est large puisque qu'elle recouvre de nombreux thèmes. L'équipe Phare se préoccupe plus spécifiquement de l'architecture globale pour une nouvelle génération de réseaux et de points particuliers comme la mobilité, l'urbanisation des services, la blockchain qui doit y être intégrée, le contrôle et une version proactive de la cybersécurité.

L'enjeu est évidemment colossal puisque la 6G ne sera plus un réseau de télécommunications mais un ensemble de services intégrant le réseau qui deviendra le moyen unique de déplacer des données et de les traiter. Évidemment, les premières recherches donnent naissance à des technologies très différentes allant d'une très forte centralisation à une complète distribution. La position de l'équipe Phare est une forte distribution avec des centres de données embarqués dans les machines terminales. La technologie proposée est à la fois verticale et horizontale, c'est-à-dire accepter la montée des données vers les gros centres de données dans le cas vertical lorsque cela est nécessaire mais surtout, si possible, rester au niveau horizontal de l'embarqué pour résoudre les problèmes de latence, de qualité de service et de sécurité. La technologie horizontale [Agha et al., 2022] utilise le mode direct c'est-à-dire la transmission D2D (Device to Device) que ce soit en Wi-Fi ou en 5G. Les réseaux horizontaux sont en mode mesh avec des machines terminales qui peuvent être mobiles.

Comme la 6G sera en grande partie un environnement de services, les applications doivent être disponibles pour une très grande majorité dans les centres de données embarqués. Dans l'environnement tel qu'il est conçu par l'équipe Phare, la mobilité et la gestion distribuée impliquent une forte recherche sur les techniques de mobilité et sur le choix d'une blockchain capable de prendre en charge un consensus adapté au contexte pour déterminer l'emplacement des serveurs. C'est la raison pour laquelle l'équipe Phare a développé une nouvelle technologie, le Blockgraph pour répondre aux problèmes posés par la blockchain dans le cadre des réseaux horizontaux mobiles pour la 6G.

Bilan scientifique et avancées scientifiques majeures

L'équipe Phare a redirigé ses recherches pour la période 2018-2020 vers la 5G-Advanced dont les spécifications sont sorties en juin 2022 sur les aspects sécurité au sens traçabilité, du D2D et du mesh en mobilité, en particulier dans un contexte de réseau véhiculaire, et enfin de la distribution des machines virtuelles d'infrastructure. Le bilan est très positif sur le premier aspect avec l'invention d'une nouvelle génération de blockchain, que nous avons appelé le Blockgraph. L'idée était de développer une blockchain pour les environnements mesh mobile qui est une forte orientation de recherche du domaine des réseaux. On retrouve cette orientation dans la release 17 du 3GPP pour la 5G-Advanced. La difficulté est de maintenir une blockchain avec des déconnexions d'une machine ou de plusieurs machines simultanément, du réseau mesh, et des reconnexions d'équipements ou d'un ensemble de machines. Cette recherche a pu se dérouler dans de très bonnes conditions grâce à deux contrats de recherche, l'un de la DGA via un projet RAPID et un deuxième sur l'interconnexion de blockchain via un projet FUI. Les résultats obtenus ont été publiés dans des conférences internationales et un article dans le journal de Springer Annals of Telecommunications. Tous les résultats vont être rassemblés dans un article, qui regroupe les recherches et les expérimentations, dans un journal IEEE.

Le deuxième axe sur le D2D et le mesh en mobilité a permis de monter un premier démonstrateur avec 4 nœuds mobiles permettant entre autres de réaliser la démonstration du blockgraph faite à la conférence SigCom. A noter un prix de la meilleure démonstration au congrès SigCom, démonstration en vraie grandeur du Blockgraph. Ce démonstrateur a permis de réfléchir à un nouvel axe de recherche concernant la 6G où les réseaux horizontaux en mode mesh deviennent primordiaux. Des travaux importants sur les modes d'allocation de ressources et la numérotique utilisée dans la 5G ont été effectués dans le cadre des réseaux V2X, en particulier dans les réseaux véhiculaires hors couverture. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications dont un IEEE Internet of Things Journal.

Le troisième axe de recherche concerne la distribution des machines virtuelles et des conteneurs de service dans le Cloud Continuum en s'intéressant aux différents étages, allant du centre de données embarqué jusqu'au centre de données MEC (Multi-access Edge Computing) en passant par le Fog, en utilisant des technologies hybrides Wi-Fi/5G. En particulier, les aspects consommation énergétique, qualité de service, sécurité et latence ont été étudiés en détail. Cet axe a donné lieu à plusieurs publications en revue, souvent en coopération avec des laboratoires étrangers.

La deuxième période de recherche allant de 2021 à fin 2022 a permis de prendre un tournant vers la 6G en reprenant les recherches de la période précédente pour les actualiser dans une recherche à plus long terme. L'objectif pour l'équipe Phare est de devenir une des premières équipes au niveau mondial à présenter une architecture 6G. Lorsqu'on regarde le panorama des premières recherches menées en Asie et en Amérique, on s'aperçoit tout de suite de différences philosophiques avec une forte distribution de l'autre côté de l'Atlantique versus une forte centralisation vers l'orient (hors Japon qui s'est plutôt rattaché à la version américaine). L'équipe Phare s'est intéressée à définir une nouvelle génération d'architecture utilisant simultanément la puissance des réseaux verticaux à base d'antennes fixes et l'efficacité des réseaux horizontaux utilisant le mode mesh avec des services embarqués dans les nœuds pouvant être des machines terminales ou des machines très près des utilisateurs. Des études avec la société Green Communications ont permis de faire un début de prototype qui a tout de suite intéressé de nombreuses sociétés et permis de monter un projet d'architecture 6G qui est soutenu par la Direction Générale des Entreprises.

Ce nouvel axe a permis, tout en continuant sur les recherches définies pour la période 2018-2020, de recentrer les activités vers des technologies d'Edge en particulier d'Edge embarqué où le réseau est un service particulier dans un environnement plus global. En effet, la 6G est avant tout un ensemble de services dont un service particulier sera le réseau. Cette vision est aujourd'hui de plus en plus approuvée par des articles présentés dans les premiers congrès internationaux sur la 6G. Cette direction de recherche a permis d'organiser les deux premiers grands congrès internationaux sur 6G Networking à Paris en 2022 et 2023.

Animation scientifique

Une des grandes animations scientifiques provient des nombreux congrès internationaux qui sont pris en charge scientifiquement par des membres de l'équipe comme les séries IEEE Cloud Networking, IEEE Cyber Security in Networking (CSNet), IEEE et IFIP Network of the Future (NoF), IEEE 6G-Networking (6GNet), IEEE Cloud and Internet of Things (CIoT), ainsi que certains congrès des séries ICIN, BRAINS, WMNC et CoNEXT. Les membres de l'équipe sont éditeurs dans plusieurs revues et Editeur-en-Chef du journal de Springer Annals of Telecommunications, et participent à l'édition scientifique chez les éditeurs ISTE et Wiley. L'équipe participe aussi activement à des comités de recrutement de chercheurs et d'enseignants chercheurs en France et à l'étranger. En

particulier, on peut noter la nomination d'un membre de l'équipe au CNU pour la mandature 2015-2019.

2 INTRODUCTION DU PORTFOLIO

L'équipe Phare effectue sa recherche sur une architecture horizontale adaptée à la 6G qui viendra en complément de l'architecture verticale. Le portfolio contient des résultats de recherche sur la future architecture horizontale. La découverte la plus importante concerne le Blockgraph qui est une nouvelle technologie de blockchain associée à la mobilité. La plate-forme en développement associe les technologies verticale (achat d'un environnement 5G) et horizontale du Wi-Fi en mode direct. Il est à noter que le faible nombre de permanents dans l'équipe du LIP6 est compensé par une forte coopération avec les start-ups et sociétés issues de l'équipe (Green Communications, EtherTrust, Anemod).

- ▶ **Élément 1 (projet ou collaboration)** : projets de recherche ENE5AI et B4mesh dirigés vers une nouvelle génération d'architecture. Ces projets permettent de développer les éléments technologiques pour la génération de réseaux horizontaux à la base de la 6G.
- ▶ **Élément 2 (distinction)** : il s'agit de prix de recherche obtenus par nos thésards. (1) Thèse de Agathe Blaise sur la détection des anomalies dans les réseaux en utilisant les techniques du machine learning. L'ensemble de ses travaux ont reçu l'accessit au prix de thèse du GdR Réseaux et Systèmes Distribués en 2021. (2) Démonstration de David Cordova à la conférence ACM Sigcomm 2021 du Blockgraph qui a reçu le 2ème prix des meilleures démonstrations. Cette démonstration dans une conférence de rang A+ montre la technologie Blockgraph qui est une proposition pour gérer et sécuriser les services distribués de la 6G dans un réseau horizontal.
- ▶ **Élément 3 (publication)** : L'article, intitulé "Data-Driven C-RAN Optimization Exploiting Traffic and Mobility Dynamics of Mobile Users", a été publié dans le journal IEEE Transactions on Mobile Computing en 2021. Cette publication de rang A+ est un des éléments de gestion de la mobilité pour une nouvelle génération.

3 AUTOÉVALUATION DU BILAN

3.1 Autoévaluation de l'équipe

Domaine 2. Attractivité

Collaborations internationales. L'équipe entretient de nombreuses collaborations internationales, notamment depuis de nombreuses années avec le Prof. Fouad Tobagi de Stanford University aux Etats-Unis, le Prof. Raouf Boutaba de Waterloo University au Canada et des collègues de plusieurs universités brésiliennes tel que le Prof. Luis Costa de l'UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) et le Prof. Diogo Mattos de l'UFF (Universidade Federal Fluminense). Des liens ont été tissés également avec des collègues d'universités européennes tels que le Prof. Guido Maier du Politecnico di Milano en Italie (2017), mais aussi en Tunisie avec l'associate professor Meriem KASSAR-BEN JEMAA de l'ENSIT (Ecole Nationale Supérieure d'ingénieurs de Tunis), voire en Chine avec le Prof. Kailong Zhang de Northwestern Polytechnical University.

Invitations dans des institutions académiques. La collaboration depuis de longues années avec plusieurs universités brésiliennes est rendue possible grâce aux séjours réguliers d'un membre de l'équipe notamment à l'Université Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Un autre membre de l'équipe a été invité 3 mois à George Mason University (GMU) aux Etats-Unis en 2017. Toutes deux sont des universités prestigieuses.

Conférences où des membres de l'équipe sont membre du PC. Un membre de l'équipe a été track chair pour l'IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) et conference chair pour l'IEEE Network of the Future (NoF) en 2018.

Organisation de conférences et participation aux comités scientifiques de ces manifestations. L'équipe organise et est membre des comités scientifiques de conférences majeures : série IEEE Cybersecurity in Networking (CSNet) depuis 2017, IEEE 6G networking depuis 2022, IEEE Network of the Futur (NoF) et IEEE Cloud Networking (CloudNet) depuis 2017.

Organisation d'une école d'été. L'équipe a organisé, en 2017, l'École d'été sur les "réseaux de communication - Virtualisation et Dématérialisation" du pôle RESCOM (Réseaux de Communication) du GdR RSD (Groupe de Recherche en Réseaux et Systèmes Distribués).

Responsabilités éditoriales dans des revues et des collections de haut niveau. Un membre de l'équipe est l'éditeur en chef de Annals of Telecommunications (Springer) et directeur de "Network and Telecommunications" series (ISTE-Wiley) depuis 2008. Depuis 2017, il est également directeur de "Sciences in the field of network and telecommunications" series (ISTE France). Un autre membre est responsable du thème Réseaux mobiles et sans fil, collection Sciences, série Réseaux et Télécommunications (ISTE France) depuis 2018. Un troisième a été éditeur associé pour le journal IEEE Transactions on Network and Service Management (TNSM) en 2018.

Participation à des instances de pilotage de la recherche et d'expertise scientifique. Un membre de l'équipe est membre et co-fondateur du Groupe de Travail Edge computing embarqué depuis 2022. Il est membre du Royal Physiographic Society in Lund (Suède) depuis 2012. Il est également responsable de la Recherche et de l'Innovation du Hub Infrastructure numérique et de l'IoT du pôle de compétitivité Systematic depuis 2014. Un autre membre a été président de l'Internet Technical Committee de la ComSoc jusqu'en 2017. Il a été le représentant pour la France du Management Committee de l'action COST CA15127 ("Resilient communication services protecting end-user applications from disaster-based failures") de 2016 à 2021. Il a évalué plusieurs projets pour des institutions nationales et à l'étranger : pour l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) en 2017 et en 2018, pour l'European Cooperation in Science and Technology (COST) de l'Union Européenne en 2017, pour les Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) au Canada en 2018, pour le Ministère de l'Éducation, de l'Université et de la Recherche (MIUR) en Italie en 2017 et en 2018. Un troisième membre a été membre de la commission scientifique du GDR Réseaux et Systèmes Distribués (RSD) en 2021 et en 2022. Un quatrième a été nommé membre titulaire de la section 27 du Conseil National des Universités (CNU) pour la mandature 2015-2019.

Prix et distinctions. G. Pujolle a reçu la médaille Ampère de la Société de l'Electricité, de l'Electronique et des TIC (SEE) en 2020 et deux étudiants de l'équipe ont reçu un prix pour leurs travaux de thèse en 2021 (c.f. élément 2 du Portfolio).

Référence 2. L'unité est attractive par la qualité de sa politique d'accompagnement des personnels.

Post-docs et doctorants. Sur la période d'évaluation, notre équipe a accueilli 6 post-doctorants qui ont travaillé sur un ou plusieurs projet(s) tels que les projets B4MESH, Podium et SecPB. L'équipe a accueilli vingt et un doctorants dans la période 2017-2022. Dix-neuf thèses ont été soutenues dans l'équipe et deux thèses restent en cours fin 2022.

Chercheurs et enseignants-chercheurs invités de renom. L'équipe Phare a accueilli 8 chercheurs pour une durée d'un à 8 mois. Ainsi, pour exemple, nous avons eu la chance d'accueillir Pedro Velloso, maître de conférences à l'Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) au Brésil, de mars à octobre 2020 ; la professeure Regina Silveira de l'Université de Sao Paulo (Brésil) est venue d'octobre à décembre 2018 ; le professeur Bijan Jabbari de George Mason University aux Etats-Unis a été accueilli de février à mai 2018 ; le professeur Aldri Luiz DOS SANTOS de la Federal University of Minas Gerais (UFMG) au Brésil a été accueilli de janvier à mars 2018 et William Quiviger qui travaillait à l'Open Networking Foundation (ONF) est venu de janvier à mars 2017.

Accueil, environnement et encadrement de qualité pour les post-docs, doctorants, chercheurs et enseignants-chercheurs. L'équipe Phare a accueilli 21 doctorants et 6 post-doctorants. 19 thèses ont été soutenues avec de nombreuses publications dans des revues et des conférences de rang A ou rang A+, un accessit au prix de thèse et un prix de recherche étudiant dans une conférence de rang A+. La plupart des thésards ont des réunions d'encadrement hebdomadaires avec leurs encadrants. L'équipe a des plateformes expérimentales via des projets de recherche pour aider les thésards à obtenir des résultats en vraie grandeur et avoir des publications dans les bonnes revues et conférences.

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

Notre équipe est financée principalement par des contrats de recherche nationaux, européen et internationaux.

Projets européens et internationaux. Le projet européen COST nommé RECODIS a été mené de 2017 à 2018. 3 autres projets internationaux ont eu lieu : PHC-Utique CROMBEC avec l'ENSI (École Nationale des Sciences de l'Informatique) de Tunisie de Janvier 2016 à décembre 2018, PHC-Gundishapur MCC5 avec l'Iran University of Science and Technology) de janvier 2016 à décembre 2017 et PHC-Carlos Finlay avec l'University of Las Villas de Cuba de 2019 à 2021.

Projets nationaux. Nous avons également travaillé sur 11 projets nationaux : 3 FUI, 2 ANR, 2 IA, 1 DGA, 2 BPI et 1 DIM RFSI.

Pour les projets FUI, il s'agit du projet PODIUM (appel 2020) de février 2016 à janvier 2019, du projet ELASTIC Networks (appel 2020) de décembre 2015 à novembre 2018 et du projet CARP de 2015 à 2018.

Concernant les projets ANR, il s'agit du projet ABCD (Appel INFRA 2013) d'octobre 2013 à mars 2017 et le projet LISP-LAB de septembre 2013 à septembre 2017.

Concernant les projets IA, le projet CONCEP de 2016 à 2019 et le Projet FED4PMR (PSPC/IA) de 2017 à 2019 sont concernés. Le projet B4MESH (DGA RAPID) a eu lieu entre 2019 et 2021.

Les projets BPI sont SecPB de 2020 à 2022 et ENE5AI (Plan France 2030) qui a démarré début janvier 2022. Le projet DIM RFSI 5G-REISEP a lui commencé en 2021.

Référence 4. L'unité est attractive par la qualité de ses équipements et de ses compétences techniques.

Plateforme d'expérimentation et logiciels. L'équipe a développé sur la période deux logiciels et une plateforme.

ULOOF. Un logiciel pour offloading des tâches d'un mobile vers un cloud (<https://uloof.u-pem.fr>). Le logiciel est mis en open source dans Github (<https://github.com/ULOOF-Framework/>).

OMNeT++ WiFi Direct. Ce logiciel est une implémentation du mode Direct du réseau Wi-Fi comme un module dans le simulateur réseau OMNeT++ [Iskounen et al., 2016]. Ce logiciel est un résultat de la collaboration avec l'équipe Delys dans le cadre d'un projet LIP6. Il a été publié en septembre 2016 et est utilisé par la communauté de recherche depuis 2017 [1].

La plateforme LISPLAB. Une plateforme expérimentale du protocole LISP au LIP6 avec deux serveurs et un VPN Renater toujours actifs (<https://github.com/lip6-lisp>).

Domaine 3. Production scientifique

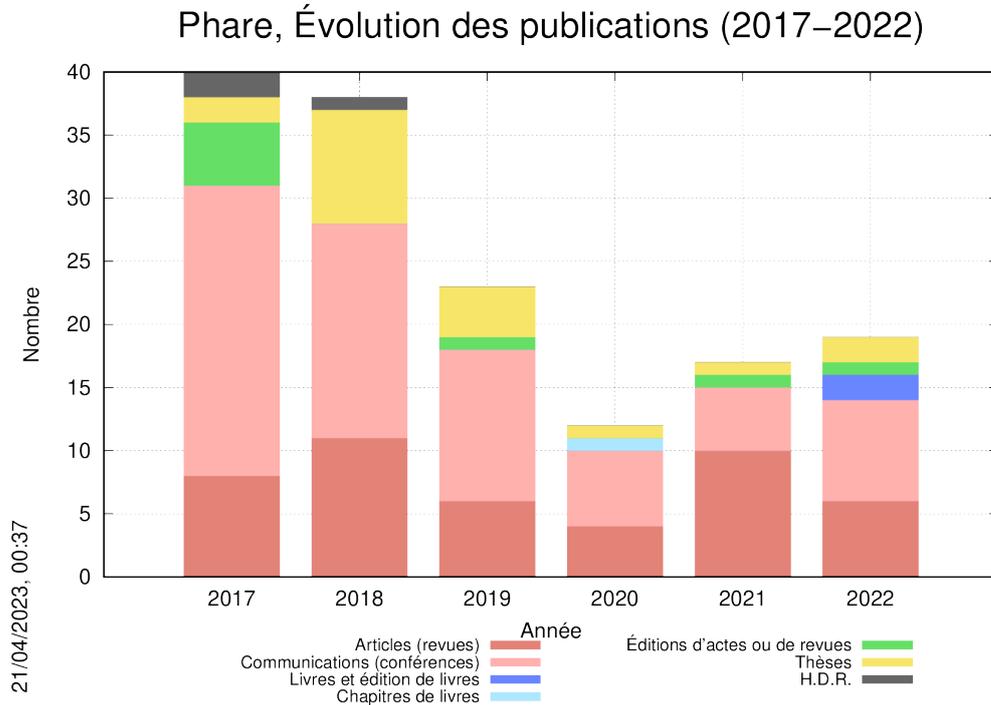


FIGURE 1 – Évolution des publications entre 2017 et 2022

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Articles (revues)	4.00	5.50	4.00	4.00	10.00	6.00
Communications (conférences)	11.50	8.50	8.00	6.00	5.00	8.00

TABLE 2 – Publications par ETPR par an entre 2017 et 2022

Durant la période 2017-2022, les membres de l'équipe Phare ont publié 45 articles de revues internationales, 71 articles dans des conférences internationales et 2 ouvrages [Al Agha et al., 2022a] et [Al Agha et al., 2022b]. Nous pouvons remarquer une baisse du nombre des publications due au départ d'un membre de l'équipe vers une autre université, puis en 2020 à cause de la crise sanitaire. La production scientifique de l'équipe s'effectue dans des revues internationales reconnues et des grandes conférences internationales avec comité de lecture. Nous avons choisi une sélection des meilleures publications (en terme de qualité) qui soit représentative de la production des membres de l'équipe.

A noter un article état de l'art de référence, écrit en 2008, dont le nombre de citations est de 770 en date du 1 mars 2023 et qui augmente régulièrement depuis 15 ans [Kassar et al., 2008].

L'équipe a publié dans des journaux de qualité et reconnus du domaine parmi lesquelles nous pouvons citer : *Computer Networks* [Gao et al., 2018], [Lyazidi et al., 2018]; *Journal of Network and Computer Applications* [Chen et al., 2018], [Mattos et al., 2018], [Chen et al., 2021a]; *IEEE/ACM Transactions on Networking* [Ceselli et al., 2017], [Fossati et al., 2018]; *IEEE Communications Surveys and Tutorials* [Cerovic et al., 2018], [Belotti et al., 2019]; *IEEE Transactions on Network and Service Management* [Blaise et al., 2020]; *IEEE Transactions on Mobile Computing* [Neto et al., 2018], [Chen et al., 2021b]; *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* [Medeiros et al., 2017]; *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [Yu et al., 2018]; *IEEE Internet of Things Journal* [Khabaz et al., 2022]; *Computer Communications* [Ortiz Guerra et al., 2022].

L'équipe a également publié dans des conférences de qualité et reconnues du domaine dont les plus connues sont : IEEE Global Communications Conference (*GLOBECOM*) [Dab et al., 2017], [Fajari et al., 2017]; IEEE Conference on Computer Communications Workshops (*INFOCOM WKSHPs*) [Zanni et al., 2017]; *ACM SIGCOMM Conference* [Cordova Morales et al., 2021] et International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (*IWCMC*) [Ouali et al., 2017].

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

Tous les membres permanents de l'équipe sont publiants, avec au moins trois publications, dans la période 2017-2022. Les doctorants et post-doctorants sont prioritaires pour aller présenter leurs travaux en conférence. En effet, la participation aux conférences est la meilleure opportunité d'échanger et d'apprendre pour nos thésards. Les encadrants présentent les travaux de doctorant seulement en cas d'empêchement comme le problème d'obtention de visa. Concernant l'accompagnement des chercheurs qui reprennent une activité de recherche, un membre de l'équipe a bénéficié d'un financement de stage M2 et d'un financement de mission de la commission des publications du laboratoire pour présenter ses résultats de recherche à une conférence internationale.

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.

Les encadrants conseillent les doctorants dans le choix de conférence et de journal à publier pour éviter de tomber dans la piège des invitations de soumission "prédatrices". Les doctorants sont encouragés de déposer une version PDF de leurs travaux sur l'archive ouverte HAL. Plusieurs codes sources des travaux de thèse ou de stage de l'équipe sont mis à disposition à la communauté de recherche pour la reproduction scientifique.

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.

Contrats de R&D avec des industriels. L'équipe a signé plusieurs contrats de R&D avec des industriels, notamment un contrat de thèse chez Orange en cours depuis 2021. Un autre contrat industriel a été établi avec la société Anemod en 2022 sur les travaux de détection des attaques DNS en utilisant les techniques de machine learning.

Contrats CIFRE. L'équipe a encadré également plusieurs contrats CIFRE chez Thales, SQUAD et Gandi.

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

Brevets. Concernant le brevet décrivant le "Procédé de discrimination de tags RFID en mouvement de tags RFID statiques", une demande de brevet européen a été déposée le 2 octobre 2018 (N° 3201825) et validée en septembre 2019 auprès de 3 pays : France, Royaume-Uni et Allemagne (N° 15788138.4).

Un autre brevet français concernant "system and method for authenticating computer resource management instructions from a virtualization server" a été attribué en septembre 2017¹.

Développement de start-up.

Un membre de l'équipe est président de Green Communications (R&D réseaux horizontaux) pépité technologique de la DGE. Il est également président de Anemod (Recherche d'un cyber vaccin pour la 6G).

1. <https://patents.google.com/patent/FR3070778A1/en>

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES EXTERNES

- [1] Thales Teixeira de Almeida, José Geraldo Ribeiro Júnior, Miguel Elias M. Campista, and Luís Henrique M. K. Costa. Wi-fi direct performance evaluation for v2p communications. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 9(2), 2020.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SIGNIFICATIVES DE Phare

- [Agha et al., 2022] Agha, K. A., Loygue, P., and Pujolle, G. (2022). Horizontal 6g. In *2022 1st International Conference on 6G Networking (6GNet)*, pages 1–7.
- [Al Agha et al., 2022a] Al Agha, K., Loygue, P., and Pujolle, G. (2022a). *Edge Networking - Internet des Edges*. ISTE Editions.
- [Al Agha et al., 2022b] Al Agha, K., Loygue, P., and Pujolle, G. (2022b). *Edge Networking : Internet of Edges*. Wiley-ISTE.
- [Belotti et al., 2019] Belotti, M., Božić, N., Pujolle, G., and Secci, S. (2019). A Vademecum on Blockchain Technologies : When, Which and How. *Communications Surveys and Tutorials, IEEE Communications Society*, 21(4) :3796–3838.
- [Blaise et al., 2020] Blaise, A., Bouet, M., Conan, V., and Secci, S. (2020). Botnet Fingerprinting : a Frequency Distributions Scheme for Lightweight Bot Detection. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 17(3) :1701–1714.
- [Cerovic et al., 2018] Cerovic, D., del Piccolo, V., Amamou, A., Haddadou, K., and Pujolle, G. (2018). Fast Packet Processing : A Survey. *Communications Surveys and Tutorials, IEEE Communications Society*, 20(4) :3645 – 3676.
- [Ceselli et al., 2017] Ceselli, A., Premoli, M., and Secci, S. (2017). Mobile Edge Cloud Network Design Optimization. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25(3) :1818–1831.
- [Chen et al., 2021a] Chen, L., Jiang, Z., Yang, D., Wang, C., and Nguyen, T.-M.-T. (2021a). Fog radio access network optimization for 5G leveraging user mobility and traffic data. *Journal of Network and Computer Applications (JNCA)*, page 103083.
- [Chen et al., 2021b] Chen, L., Nguyen, T.-M.-T., Yang, D., Nogueira, M., Wang, C., and Zhang, D. (2021b). Data-driven C-RAN optimization exploiting traffic and mobility dynamics of mobile users. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(5) :1773–1788.
- [Chen et al., 2018] Chen, L., Yang, D., Zhang, D., Wang, C., Li, J., and Nguyen, T.-M.-T. (2018). Deep mobile traffic forecast and complementary base station clustering for C-RAN optimization. *Journal of Network and Computer Applications (JNCA)*, 121 :59 – 69.
- [Cordova Morales et al., 2021] Cordova Morales, D., Velloso, P., Guerre, A., Nguyen, T.-M.-T., Pujolle, G., Alagha, K., and Dua, G. (2021). Blockgraph proof-of-concept. In *SIGCOMM '21 : ACM SIGCOMM 2021 Conference*, pages 82–84, Virtual Event, United States. ACM.
- [Dab et al., 2017] Dab, B., Fajjari, I., and Aitsaadi, N. (2017). A Heuristic Approach for Joint Batch-Routing and Channel Assignment in Hybrid-DCNs. In *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017)*, Singapore, Singapore. IEEE.
- [Fajjari et al., 2017] Fajjari, I., Aitsaadi, N., and Kouicem, D. E. (2017). A Novel SDN Scheme for QoS Path Allocation in Wide Area Networks. In *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017)*, volume 62, pages 69–88, Singapore, Singapore. IEEE.
- [Fossati et al., 2018] Fossati, F., Hoteit, S., Moretti, S., and Secci, S. (2018). Fair Resource Allocation in Systems with Complete Information Sharing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 26(6) :2801–2814.
- [Gao et al., 2018] Gao, M., Addis, B., Bouet, M., and Secci, S. (2018). Optimal Orchestration of Virtual Network Functions. *Computer Networks*, 142 :108–127.
- [Iskounen et al., 2016] Iskounen, S., Nguyen, T. M. T., and Monnet, S. (2016). Wifi-direct simulation for inet in omnet++.
- [Kassar et al., 2008] Kassar, M., Kervella, B., and Pujolle, G. (2008). An Overview of Vertical Handover Decision Strategies in Heterogeneous Wireless Networks. *Computer Communications*, 31(10) :2607–2620.
- [Khabaz et al., 2022] Khabaz, S., Nguyen, T.-M.-T., Pujolle, G., and Braconnot-Velloso, P. (2022). Resource Allocation Modes in C-V2X : From LTE-V2X to 5G-V2X. *IEEE Internet of Things Journal*.
- [Lyazidi et al., 2018] Lyazidi, M. Y., Aitsaadi, N., and Langar, R. (2018). A dynamic resource allocation framework in LTE downlink for Cloud-Radio Access Network. *Computer Networks*, 140 :101–111.
- [Mattos et al., 2018] Mattos, D. M. F., Duarte, O. C. M. B., and Pujolle, G. (2018). A lightweight protocol for consistent policy update on software-defined networking with multiple controllers. *Journal of Network and Computer Applications (JNCA)*, 122 :77–87.

- [Medeiros et al., 2017] Medeiros, D. S. V., Elias Mitre Campista, M., Mitton, N., Dias de Amorim, M., and Pujolle, G. (2017). The Power of Quasi-Shortest Paths : ρ -Geodesic Betweenness Centrality. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 4(3) :187–200.
- [Neto et al., 2018] Neto, J. L. D., Yu, S.-Y., Macedo, D. F., Nogueira, J.-M., Langar, R., and Secci, S. (2018). ULOOF : a User Level Online Offloading Framework for Mobile Edge Computing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 17(11) :2660–2674.
- [Ortiz Guerra et al., 2022] Ortiz Guerra, E., Alfonso Reguera, V., Duran-Faundez, C., and Nguyen, T.-M.-T. (2022). Channel hopping for blind rendezvous in cognitive radio networks : A review. *Computer Communications*, 195 :82–98.
- [Ouali et al., 2017] Ouali, K., Kassar, M., Nguyen, T.-M.-T., Sethom, K., and Kervella, B. (2017). Modeling D2D Handover Management in 5G Cellular Networks. In *13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2017)*, Valencia, Spain.
- [Yu et al., 2018] Yu, S., Langar, R., Fu, X., Wang, L., and Han, Z. (2018). Computation Offloading with Data Caching Enhancement for Mobile Edge Computing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(11) :11098–11112.
- [Zanni et al., 2017] Zanni, A., Yu, S.-Y., Secci, S., Langar, R., Bellavista, P., and Macedo, D. F. (2017). Automated Offloading of Android Applications for Computation/Energy-usage Optimizations. In *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 990–991, Atlanta, GA, United States. IEEE.

A ANNEXE — MEMBRES PERMANENTS AU 31/12/2022

La table ci dessous liste les membres permanents de l'équipe Phare.

NOM	Prénom	Corps	Employeur
KERVELLA	Brigitte	MCF	Unidversité d'Amien

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 01



Projet ou collaboration

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Titre de l'élément : ENE5AI et B4MESH - Les projets menant aux réseaux horizontaux 6G

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

Définir l'architecture des réseaux du futur est une expertise au niveau international de l'équipe Phare. C'est un sujet de recherche qui demande d'être réalisé dans de grands projets de recherche collaboratifs dirigés par des experts ayant des visions disruptives vers le futur. La vision de l'équipe Phare est vers les réseaux horizontaux 6G pour l'année 2030. Deux projets ENE5AI et B4MESH déroulés dans la période 2017-2022 constituent les éléments de base pour arriver à cette vision.

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

L'équipe Phare a démarré une recherche à partir de 2018 pour déterminer les éléments de base qui interviendront dans les futurs réseaux. Avec cette vision, l'équipe s'est intéressée à deux aspects importants : déterminer une architecture de nouvelle génération allant dans le sens d'une forte distribution pour succéder à la centralisation provenant du Software-Defined Networking (SDN). Associé à cette forte distribution, un besoin urgent se fait sentir d'aller vers le Web 3.0 et la blockchain.

Les deux directions présentées ci-dessus ont été confortées par l'acceptation de deux projets allant dans ce sens. Ils ont permis de mener à bien les recherches envisagées par l'équipe.

Le premier projet, ENE5AI (Edge Networking pour des Entreprises et des Services Publics Agiles et Intelligents) [2], a permis de proposer une nouvelle architecture que l'on appelle Architecture Horizontale au contraire des architectures classiques du monde des télécommunications qui sont des architectures verticales. Dans une architecture horizontale, les traitements des demandes initiées par les utilisateurs sont effectués dans des centres de données qui sont très près des utilisateurs. Ces centres de données sont embarqués sur l'équipement terminal ou bien dans le nœud de rattachement situé à très courte distance de l'utilisateur. Si le traitement ne peut pas se faire directement sur la machine terminale ou sur le nœud de rattachement, une recherche est effectuée pour trouver le centre de données qui prendra en charge le traitement.

Ce nœud doit si possible se trouver au même niveau, d'où le nom de réseau horizontal. Ce choix provient de différentes études montrant que plus le traitement est près de l'utilisateur, plus la latence est faible, plus la consommation énergétique est faible, plus la sécurité est grande et plus il est facile d'avoir une bonne qualité de service. Dans les réseaux verticaux, il faut remonter la hiérarchie pour aller vers des centres de données beaucoup plus gros et plus puissants qui peuvent être nécessaires mais qui vont demander une consommation énergétique plus importante, une qualité de service plus difficile à obtenir, une sécurité moins assurée et un temps de latence plus important. Les architectures horizontales utilisent le mode direct, c'est-à-dire un mode D2D (Device to Device). Le mode direct existe en Wi-Fi et dans d'autres technologies comme dans les réseaux de capteurs utilisant Bluetooth ou ZigBee. Le mode direct dans la 5G a été défini et spécifié par le 3GPP mais il n'est pas disponible commercialement, ni même sous forme de logiciel libre. Mais cela n'est qu'une question de temps avant sa disponibilité.

Dans l'architecture 6G, la proposition est de mixer architecture verticale et horizontale, c'est-à-dire les modes directs et les modes infrastructures. L'objectif du projet ENE5AI est de développer une architecture horizontale sur un environnement hybride 5G/Wi-Fi pour assurer une forte fiabilité. En d'autres termes, les nœuds du réseau sont connectés entre eux via des liaisons en mode direct. Ces différentes liaisons sont réalisées en mode direct Wi-Fi et/ou 5G (dès que le mode direct 5G sera disponible). Le mode vertical peut aussi être utilisé pour permettre des connexions entre nœuds en passant par une antenne 5G. Le projet contient la réalisation d'un démonstrateur réalisé avec l'aide des Sapeurs-Pompiers de Paris qui voient dans cette solution un moyen d'avoir un réseau fiable capable de passer des murs porteurs en utilisant du Wi-Fi ou de la 5G en mode direct sur de courtes distances. Cette architecture est fondée sur des femto centres de données embarqués mobiles qui sont positionnés

sur les pompiers pour former un réseau mesh totalement flexible avec la mobilité des personnes qui portent les équipements.

La partie logicielle de l'environnement que nous venons de décrire est composée de machines virtuelles qui sont intégrées dans les pico centres de données et qui peuvent migrer à volonté pour se positionner dans la machine qui permet d'obtenir le meilleur compromis entre temps de latence, qualité de service, sécurité et dépense énergétique. L'ensemble des applications est distribué et nécessite la désignation de nœuds leaders à chaque instant. En effet, comme l'environnement est mobile, que ce soit les machines terminales ou les nœuds, il faut envisager des ruptures (split) des réseaux et son contraire avec des regroupements (merge). L'objectif du deuxième projet B4Mesh (Blockchain pour les réseaux mesh mobiles) [1] est de trouver une solution pour une blockchain qui a des splits et des merges. Dans ce projet nous avons inventé le Blockgraph qui est une solution pour utiliser la technologie blockchain dans un réseaux mesh mobile. L'architecture avec les interfaces du blockgraph est décrite à la Fig 1.

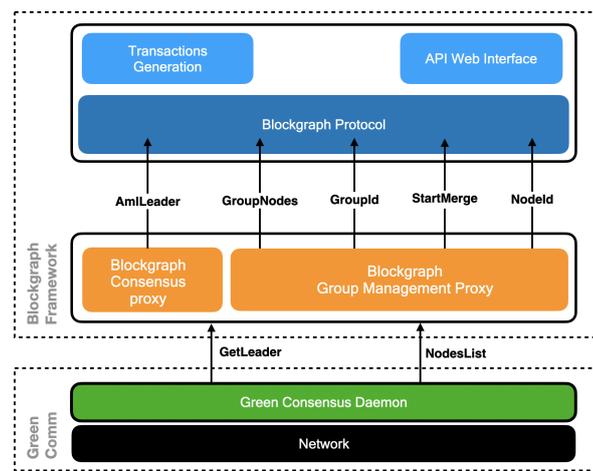


FIGURE 1 – Architecture du Blockgraph

Le Blockgraph peut être présenté comme un Framework composé de trois modules différents : un algorithme de consensus permettant de déterminer un nœud qui se chargera de créer un nouveau bloc, un système de gestion de groupe, qui est le module responsable de la découverte de la topologie du réseau et de l'envoi de notifications s'il y a un changement de topologie et enfin un protocole Blockgraph, qui est chargé de gérer la structure des données et des différentes fonctions de gestion de cette structure.

Un troisième projet, SECPB (Sécurisation de l'Ecosystème Cloud par Blockchain), a permis de réaliser des recherches complémentaires sur l'interconnexion de Blockchains dont nous aurons également besoin dans les nouvelles architectures de réseau.

Globalement, ces trois projets permettent de bâtir une nouvelle génération d'architecture qui intègre à la fois le réseau et les services et qui, nous l'espérons, deviendra prépondérante dans la 6G.

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Projet B4Mesh - <https://b4mesh.lip6.fr>.

[2] Communiqué de presse - Stratégie d'accélération 5G : Annonce de cinq nouveaux projets lauréats et publication d'un observatoire de la 5G, décembre 2021.

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 02



Distinction

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Titre de l'élément : Prix de recherche d'étudiants de l'équipe Phare

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

Durant la période 2017-2022, les thésards de l'équipe Phare ont eu d'excellentes contributions scientifiques. Nous présentons dans cet élément deux prix de recherche obtenus par nos étudiants.

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

3.1 Accessit du prix de thèse du GDR Réseaux et Systèmes Distribués 2021

La thèse de doctorat de Agathe Blaise, intitulée "Nouveaux algorithmes de détection d'anomalies et de classification pour les réseaux IP et mobile" [1], a été soutenue en décembre 2020.

Ces dernières années ont été marquées par une nette augmentation de la fréquence et de la diversité des attaques réseau, qui apparaissent toujours plus sophistiquées et conçues pour être indétectables. En parallèle, l'essor des techniques statistiques et d'apprentissage machine ont permis un développement rapide de techniques innovantes visant à détecter de telles attaques. Cette thèse propose de nouveaux algorithmes de détection d'anomalies et de classification appliqués aux réseaux IP et mobiles.

Dans la première contribution, nous proposons une solution Split-and-Merge qui détecte des botnets (réseau d'ordinateurs infectés qui servent à lancer des attaques) se propageant lentement sur Internet en exploitant des vulnérabilités émergentes. Cette méthode analyse l'évolution à long-terme de l'usage des ports applicatifs. Nous obtenons une très grande précision de détection et très peu de faux positifs grâce aux contre-validations dans divers sous-réseaux. Notre technique de détection est aussi très légère et serait idéale pour être implémenté au niveau d'un switch dans un contexte de réseaux programmables.

La deuxième contribution aborde la détection d'hôtes infectés par un botnet, cette fois en utilisant des techniques de classification au niveau de l'hôte, dans une solution nommée BotFingerPrinting. Les approches récentes de l'état de l'art tendent à délaisser les approches classiques par flux induisant une complexité algorithmique très importante. Notre technique vise à rendre compte des relations entre les hôtes, tout en simplifiant ces graphes de communication pour éviter d'éventuels problèmes de scalabilité. Grâce à une approche supervisée, nous apprenons les signatures des hôtes bénins et des hôtes infectés pour ensuite les classer dans un jeu de test. Nous démontrons par le jeu de données CTU-13 que notre approche est considérablement plus légère que les approches de l'état de l'art et également plus efficace, avec une précision de détection très importante.

La troisième contribution propose l'algorithme nommé "Anomaly SpatioTEmporal Convex Hull detection" (AS-TECH) qui permet la détection d'anomalies brutes dans les séries temporelles des réseaux mobiles, les regroupe en enveloppes convexes spatio-temporelles, et finalement induit plusieurs classes d'événements. Nous avons appliqué notre système de détection sur des données réelles provenant de l'opérateur Orange et montré l'existence de cinq grandes catégories d'événements : les événements nationaux, les événements locaux, les mises à jour et les pannes applicatives, les jours fériés et les pannes d'un opérateur cloud ou réseau. Nous étudions précisément la nature des applications mobiles impactées pour chaque catégorie d'événements ainsi que l'évolution spatio-temporelle de ces jeux d'applications mobiles pour un même événement.

3.2 Deuxième prix de Student Research Competition à la conférence ACM SIGCOMM 2021

La démonstration "Blockgraph proof-of-concept" [2], présentée par David Cordova, a obtenu le deuxième prix de recherche étudiant (Student Research Competition) à la conférence ACM SIGCOMM 2021, une des conférences

les plus sélectives dans notre domaine. Une vidéo associée à cette publication est disponible (<https://youtu.be/dC37jCzj0tI>).

La technologie Blockchain permet de maintenir un registre des informations d'une manière distribuée tout en garantissant la sécurité des données. Pour bénéficier d'une telle technologie, il est nécessaire de disposer d'une connectivité fiable. Les réseaux maillés ad-hoc mobiles rendent l'utilisation de blockchain difficile car la mobilité des nœuds crée des instabilités dans la topologie du réseau, résultant ainsi des partitions (splits) et des fusions (merges) qui peuvent être intentionnelles ou non. Cela pose un problème pour une blockchain traditionnelle car un split du réseau cause une bifurcation (fork) de la blockchain, ce qui entraîne des chaînes concurrentes et un risque sur la cohérence des données. Ce problème est souvent résolu en choisissant la chaîne la plus longue et ignorant les autres. Or, les chaînes concurrentes créées par l'effet de la mobilité et des partitions du réseau doivent être considérées comme des chaînes légitimes portant des informations relatives à une partition de réseau donnée. Il est donc important d'inclure ces chaînes dans le registre distribué.

Pour faire face aux problèmes de split et merge dans les réseaux maillés ad-hoc mobiles, nous proposons le Blockgraph, une structure de données de type blockchain capable de gérer les partitions de réseau. Le Blockgraph prend la forme d'un graphe orienté acyclique qui est créé en fonction de la mobilité des nœuds et qui hérite de toutes les propriétés de sécurité de la blockchain. Le Blockgraph utilise une architecture modulaire qui sépare le consensus, la gestion de mobilité et la gestion du registre distribué. Chaque module de notre architecture est conçu pour fonctionner dans un contexte de mobilité. Nous avons également conçu le Consensus-for-Mesh (C4M), un algorithme de consensus tolérant aux partitions réseaux inspiré de RAFT. La gestion de mobilité est basée sur l'exploitation des tables de routage d'Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) pour déterminer les changements qui ont lieu dans la topologie du réseau.



FIGURE 1 – Blockgraph

Pour évaluer notre concept de Blockgraph, nous avons commencé par implémenter notre architecture dans le simulateur réseau NS-3 pour réaliser une première étude des performances du système. Puis nous avons implémenté le Blockgraph dans de vrais routeurs maillés comme une preuve de concept. Notre banc d'essai est composé de cinq routeurs maillés à faible consommation déployés au laboratoire LIP6. Tous les routeurs exécutent le système Blockgraph. La démonstration consiste à créer une partition réseau en éloignant deux routeurs maillés des trois autres jusqu'à ce que le réseau soit partitionné en deux clusters. Nous laissons les clusters se séparer suffisamment longtemps pour qu'ils puissent générer de nouveaux blocs. Lorsque les clusters sont réunis à nouveau, notre système a pu fusionner les deux chaînes en une seule structure de données formant ainsi le Blockgraph.

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Agathe Blaise. *Novel anomaly detection and classification algorithms for IP and mobile networks*. PhD thesis, 2020. Thèse de doctorat dirigée par Secci, Stefano Informatique Sorbonne université 2020.
- [2] David Cordova Morales, Pedro Velloso, Alexandre Guerre, Thi-Mai-Trang Nguyen, Guy Pujolle, Khaldoun Alagha, and Guillaume Dua. Blockgraph proof-of-concept. In *Proceedings of the SIGCOMM '21 Poster and Demo Sessions*, SIGCOMM '21, page 82–84, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 03



Publication

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Titre de l'élément : Data-Driven C-RAN Optimization Exploiting Traffic and Mobility Dynamics of Mobile Users

URL de l'élément : <https://hal.science/hal-03363370>

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

L'article, intitulé "Data-Driven C-RAN Optimization Exploiting Traffic and Mobility Dynamics of Mobile Users" [1], a été publié en 2020 dans le journal IEEE Transactions on Mobile Computing, un journal majeur dans notre domaine. Cette contribution marque deux tendances importantes dans le domaine des réseaux mobiles durant la période 2015-2020 : l'application des techniques de machine learning dans les réseaux et l'évolution de l'infrastructure réseau vers les technologies basées sur le Cloud.

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

Pour faire face à la croissance rapide du trafic mobile, les opérateurs doivent augmenter la capacité du réseau en déployant d'avantage de stations de base, élargissant sa zone de couverture et ajoutant plus de puissance de calcul. Cependant, plus le réseau est grand, plus les dépenses d'investissement et d'exploitation sont grandes. La consommation d'énergie augmente et il est plus difficile d'assurer la qualité de service comme le débit, la latence et la continuité de service due au changement de cellules (handover). La conception d'une architecture réseau efficace est devenue importante.

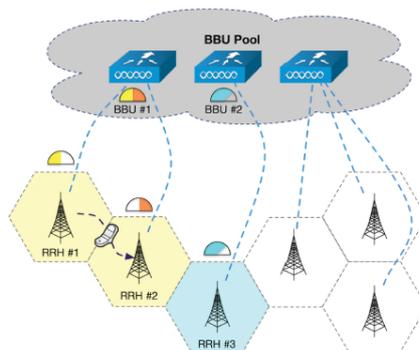


FIGURE 1 – Réseau d'accès radio basé sur le cloud

Le réseau d'accès radio basé sur le cloud (Cloud Radio Access Network - C-RAN) est une architecture prometteuse. Une station de base classique est composée de deux unités disassociées mais co-localisées au même endroit : l'antenne (Remote Radio Head - RRH) qui s'occupe de la transmission radio et l'unité de traitement du signal (Baseband Unit - BBU). L'architecture C-RAN (Fig. 1) regroupe les BBU dans un centre de données à distance pour mutualiser les ressources de calcul, faciliter la coopération entre les stations de base et réduire le coût de maintenance. Les RRH et BBU sont interconnectés via les liaisons de fibre optique à haut débit.

Dans cette contribution, nous proposons une méthode d'optimisation du réseau C-RAN axée sur les données. Tout d'abord, nous proposons un modèle d'apprentissage profond de type Multivariate long short term memory (MuLSTM) pour modéliser et capturer les caractéristiques d'espace-temps du trafic et de la mobilité utilisateur. Ce modèle permet une prédiction précise des demandes, ce qui est important pour un dimensionnement efficace et dynamique. La Fig. 2 montre que le trafic d'une zone commerciale et celui d'une zone résidentielle sont complémentaires et peuvent être agrégés vers le même centre de données pour augmenter le taux d'utilisation

des ressources de calcul et économiser la consommation d'énergie. Les axes de mobilité principaux peuvent aussi être identifiés en analysant les données mobiles permettant d'affecter les RRH concernés au même centre de BBU et réduire le temps de handover.

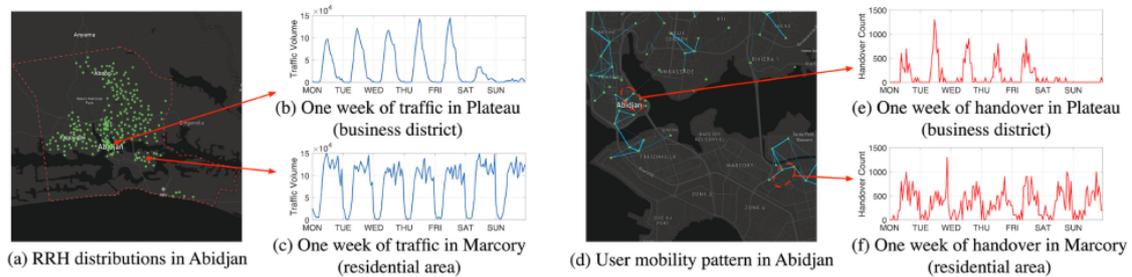


FIGURE 2 – Les mesures du trafic RRH et de la mobilité d'utilisateur à Abidjan (Côte d'Ivoire) durant une semaine

Ensuite, nous formulons le problème d'affectation RRH-BBU avec une fonction objectif comprenant le coût et la qualité de service sous la forme d'un problème de partitionnement et proposons un algorithme à base de propagation d'étiquettes (Resource-Constrained Label-Propagation - RCLP) pour le résoudre. La solution de ce problème d'optimisation est utilisée pour le clustering dynamique des RRH. Chaque groupe de RRH est servi par un centre de BBU ayant une capacité appropriée.

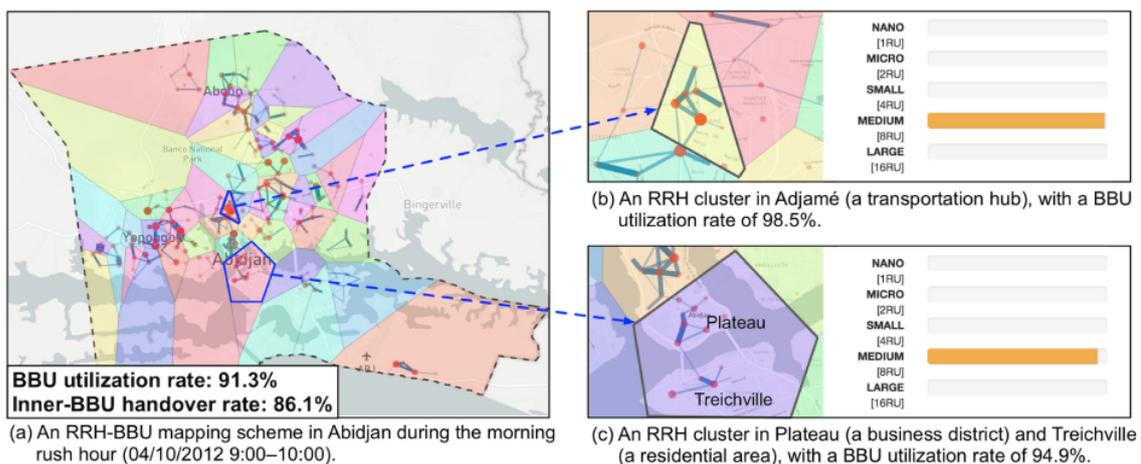


FIGURE 3 – Une étude de cas d'affectation RRH-BBU durant une heure de pointe au matin à Abidjan

Les évaluations en utilisant des jeux de données réelles de la Côte d'Ivoire (Fig. 3) et du Sénégal montre que notre méthode fournit un taux d'utilisation moyen de BBU de plus de 85,2% avec plus de 82,3% de handover de bonne qualité, dépassant d'autres méthodes citées dans l'état-de-l'art. Dans certains cas, le taux d'utilisation des centres BBU peut atteindre 98,5% avec un taux de handover intra-centre-BBU jusqu'à 86,1%.

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Longbiao Chen, Thi-Mai-Trang Nguyen, Dingqi Yang, Michele Nogueira, Cheng Wang, and Daqing Zhang. Data-driven C-RAN optimization exploiting traffic and mobility dynamics of mobile users. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(5) :1773–1788, May 2021.