



MATHematics and NETworks

MATH&NET

IMT-Atlantique, Brest

Rapport d'activité

01/01/2021 - 31/12/2023

1 Composition de l'équipe

Enseignants chercheurs permanents

Sandrine Vaton, Professeure (HDR), IMT Atlantique (responsable de l'équipe)

Isabel Amigo, Maîtresse de conférences, IMT Atlantique – *congés pour convenance personnelle depuis 03/2023*

Alexandre Reiffers Masson, Maître de conférences, IMT Atlantique

Françoise Sailhan, Professeure (HDR), IMT Atlantique – *arrivée depuis 10/2022*

Ingénieur permanent

Santiago Ruano Rincon, Ingénieur de recherche (à temps partiel), IMT Atlantique – *congés pour convenance personnelle depuis 04/2023*

Post-doctorants

Hajer Rejeb, Post-doctorante depuis 04/2023

Serge Olivier Tsemogne Kamguia, Post-doctorant depuis 02/2023

Doctorants

Anas El Ankouri, Doctorant de 11/2017 à 05/2021

Pierre Charreaux, Doctorant depuis 10/2023

Robin Duraz, Doctorant depuis 03/2021

Amine Echraïbi, Doctorant de 10/2018 à 02/2022

Sanaa Ghandi, Doctorante de 10/2020 à 12/2023

Stanislas Mareschal de Charentenay, Doctorant depuis 04/2023

Vincent Messié, Doctorant de 10/2019 à 09/2022

Ziad Tlaiss, Doctorant de 01/2020 à 12/2023

Colin Troisemaine, Doctorant depuis 10/2021

Minqi Wang, Doctorante de 10/2019 à 11/2022

2 Présentation de l'équipe

2.1 Objectifs généraux

Les travaux de l'équipe ont deux grands domaines d'application: d'une part les performances de réseaux et d'autre part la sécurité et la résilience des réseaux. Une spécificité de notre équipe est que nous accordons une importance particulière aux aspects méthodologiques de l'analyse des données de

- Sécurité des réseaux
- Performances des réseaux
- Méthodes pour l'analyse des réseaux

2.2 Contexte

2.3 Enjeux et verrous scientifiques

2.4 Mots-clés

- Métrologie, performance de réseaux, management de réseau, qualité de service et d'expérience, détection d'anomalie, sécurité des réseaux, allocation de ressources
- Inférence bayésienne, méthodes MCMC, chaînes de Markov (cachées), processus de décisions markoviens, apprentissage par renforcement, optimisation, théorie des jeux, calcul distribué, approximations stochastiques
- Virtualisation / Softwarisation de réseaux, technologies de registres distribués, Internet, 5G

3 Principaux résultats scientifiques sur la période

3.1 Analyse de données de mesure réseaux

Contributeurs: Sandrine Vaton, Isabel Amigo, Alexandre Reiffers-Masson, Françoise Sailhan, Ziad Tlaiss, Amine Echraïbi, Colin Troisemaine, Robin Duraz, Sanaa Ghandi

3.1.1 Applications au diagnostic de pannes dans les réseaux d'accès optiques

Contributeurs: Amine Echraïbi, Colin Troisemaine, Sandrine Vaton, Alexandre Reiffers-Masson

Des travaux sont menés avec Orange Innovation dans le cadre des thèses CIFRE de Amine Echraïbi, soutenue en décembre 2021, et de Colin Troisemaine, démarrée en octobre 2021. Ces travaux font suite à une précédente collaboration dans le cadre de la thèse de Serge Romaric Tembo Mouafo, soutenue en janvier 2017.

Le contexte applicatif de la collaboration concerne le diagnostic de pannes dans les réseaux d'accès optiques GPON-FTTH. Le système de diagnostic de panne en production chez Orange, DELC pour Diagnostic Expert de la Ligne Client, est basé sur des signatures de pannes. Ces signatures sont complexes à maintenir car elles nécessitent une forte expertise métier du domaine de l'accès optique. Par ailleurs un pourcentage significatif de pannes, les DNI pour Défauts Non Identifiés, sont non diagnostiquées par le système DELC.

L'objet de la collaboration est d'explorer les possibilités offertes par les méthodes d'apprentissage statistique pour identifier les pannes, et en particulier pour découvrir de nouveaux clusters de pannes dans les défauts non identifiés. La thèse de Serge Romaric Tembo, soutenue en 2017, avait porté sur l'utilisation de réseaux bayésiens pour cela.

Dans le cadre de la thèse de Amine Echraïbi, soutenue en décembre 2021, nous avons pris le parti d'utiliser des modèles de mélange infinis ou DPMM (Dirichlet Process Mixture Models) pour découvrir de nouveaux clusters, en nombre inconnu, dans les données non labellisées (ou DNI). L'inférence des labels des clusters, qui correspondent aux variables non observées dans le modèle de mélange infini, pourrait être réalisée en utilisant un algorithme d'échantillonnage de Gibbs mais il est également possible d'utiliser des méthodes d'inférence variationnelle, l'avantage de ces dernières étant la rapidité d'exécution. Nous avons dérivé les équations de point fixe permettant d'obtenir les paramètres des lois d'approximation variationnelle avec une approximation de type mean field [12].

Une spécificité du problème applicatif considéré est qu'une partie des observations sont des variables catégorielles (alarmes, etc...), les autres étant numériques (températures, puissances, etc...) Une autre spécificité du problème est qu'une partie des données sont étiquetées (pannes reconnues par le système DELC à base de signatures) tandis que d'autres données ne le sont pas (Défauts Non Identifiés). Dans [12] une approche semi-supervisée a été développée, afin que la présence de données labellisées aide au diagnostic pour les données non labellisées. Nous avons combiné des réseaux de neurones profonds et des modèles de mélanges infinis pour construire une approche semi-supervisée pour la classification des pannes et la découverte de pannes jusque là inconnues. Le réseau de neurones permet de construire des descripteurs pertinents (ou features) qui sont les variables d'entrée, d'une part d'un module d'inférence basé sur un DPMM pour les données non étiquetées, et d'autre part d'une unité softmax pour la classification en ce qui concerne les classes connues. L'architecture proposée a été validée sur un corpus de pannes réelles du réseau opérationnel GPON FTTH de l'opérateur Orange.

Une autre contribution significative de la thèse d'Amine Echraïbi sur la période a été publiée dans [11]. L'étape de rétropropagation du gradient est un défaut bien connu des réseaux probabilistes. En effet la fonction coût s'exprime comme une espérance par rapport à une distribution qui dépend des paramètres à optimiser. Le calcul des dérivées partielles est pour cette raison difficile. Une règle générale de rétropropagation stochastique du gradient fondée sur une re-paramétrisation applicable à une large classe de distributions, y compris des distributions discrètes, a été proposée. Cette approche, qui exploite le lien entre fonction caractéristique et transformée de Fourier, permet de découpler le calcul du gradient de celui de l'espérance. L'approche a été développée dans le cas général puis déclinée sur différents exemples. Il a par ailleurs été démontré que la règle classique de rétropropagation déterministe des réseaux de neurones est un cas particulier de rétropropagation stochastique avec des distributions de Dirac.

Dans la thèse de Colin Troisemaine, la découverte de nouveaux clusters de pannes dans les réseaux d'accès optiques GPON FTTH a été abordée comme un problème de découverte de nouvelles classes, ou Novel Class Discovery (NCD). Les approches NCD sont des approches récentes qui ont pour objectif de trouver de nouvelles classes dans un ensemble non étiqueté lorsqu'un ensemble étiqueté de classes connues mais différentes est disponible. Ces approches ont jusqu'à présent été appliquées sur des jeux de données

d’images, alors que les données industrielles comme celles constituant le domaine d’application de la thèse, sont bien souvent tabulaires et hétérogènes.

Nous avons développé une nouvelle méthode pour résoudre le problème NCD, dans le contexte de données tabulaires contenant des variables hétérogènes. L’objectif de l’approche NCD est de transférer les connaissances acquises à partir des données labellisées pour aider à la découverte de nouvelles classes dans les données non labellisées. L’approche développée dans [29] [30] combine (1) un encodeur qui apprend une représentation partagée entre les classes connues et inconnues (2) un réseau de classification entraîné pour reconnaître les classes connues (3) un réseau de clustering entraîné pour reconnaître des clusters parmi les données non étiquetées. L’encodeur construit un espace latent de représentation des données des classes connues et des nouvelles classes, et assure que l’espace latent de représentation contient l’information nécessaire pour reconstruire toutes les classes (en évitant un *overfitting* sur les classes connues).

Afin de faciliter la prise en main par des experts métier n’ayant pas de compétences avancées en apprentissage statistique une interface a été développée [31]. L’interface permet à un expert métier sans connaissances particulières en analysé de données d’exécuter les algorithmes de l’état de l’art pour la découverte de nouvelles classes dans des données tabulaires. L’interface permet la visualisation des données et la génération des clusters de nouvelles classes ainsi qu’une représentation interprétable des classes découvertes sous la forme d’un arbre de décision.

3.1.2 Applications à la qualité de service

Contributeurs: Sanaa Ghandi, Ziad Tlaiss, Alexandre Reiffers Masson, Sandrine Vaton, Isabel Amigo

La thèse de Sanaa Ghandi a porté sur l’utilisation de méthodes statistiques pour l’analyse de mesures de délais dans les réseaux. Les mesures de RTT sur Internet sont simples à obtenir, et des bases de données de mesure publiques telles que celles mises à disposition dans le cadre du projet RIPE Atlas sont disponibles pour la recherche.

Les outils récents d’analyse de données permettent de répondre à un certain nombre de besoins, afin d’automatiser partiellement le traitement de ces mesures de délai qui fournissent une information sur l’état du réseau au cours du temps. Cette thèse fait suite à une précédente thèse, celle de Maxime Mouchet, soutenue en novembre 2020. Dans le cadre de la thèse de Sanaa Ghandi, deux problèmes différents ont été considérés: prédiction pour les mesures de délai (complétion de données manquantes), et segmentation des séries temporelles de délai.

Les mesures de délai telles que celles mises à disposition par RIPE Atlas présentent un certain nombre de caractéristiques. La distribution du délai entre deux points de mesure est en règle générale stable sur des horizons de temps longs (plusieurs heures) puis présente des changements brusques dans le cas, par exemple, de changements de routage. Un pourcentage important de mesures sont manquantes, du fait de sondes qui par exemple ne répondent pas. Enfin les mesures de délai de bout en bout sont fortement corrélées entre elles, puisque les paquets empruntent en partie des routes et des équipements communs.

Dans [14] le problème de prédiction de délai réseau est formulé comme un problème de factorisation de matrice non négative, afin d’utiliser la forte corrélation spatiale et temporelle dans les mesures. Le problème de factorisation est résolu en utilisant deux algorithmes: un gradient alterné projeté, et l’algorithme NeNMF basé sur l’approche de Nesterov. Dans [13] une autre approche a été proposée: le problème de complétion a été formulé comme un problème de filtrage collaboratif neuronal et deux architectures différentes ont été testées, la factorisation de matrice généralisée et le perceptron multi-couches.

La segmentation de séries temporelles de délai permet de détecter des plages homogènes dans la distribution des délais et aider à analyser de possibles incidents impactant la qualité de service. Dans [15] [16] nous avons exploré l’utilisation du clustering hiérarchique pour segmenter des séries de délai multivariées. Cette approche à bas coût de calcul exploite la corrélation spatiale dans les délais et segmente conjointement un ensemble de séries temporelles détectées comme appartenant à un même cluster. Toutes les méthodes proposées dans le cadre de la thèse ont été validées sur des données simulées et sur des données issues de la plateforme RIPE Atlas.

Les opérateurs de télécommunication utilisent traditionnellement l’analyse du comportement des algorithmes de contrôle de congestion pour diagnostiquer l’état du réseau. En effet les algorithmes de contrôle de congestion adaptent automatiquement le comportement d’émission du trafic de la source aux conditions réseau. L’observation de ce comportement apporte par conséquent d’une manière indirecte une information utile pour diagnostiquer l’état du réseau.

Le déploiement du chiffrement profond avec QUIC rend obsolètes les techniques classiquement utilisées par les opérateurs et se basant sur l’observation des entêtes TCP des paquets pour faire du diagnostic de pannes. Dans le cadre de la thèse CIFRE de Ziad Tlaiss avec Orange, nous avons travaillé sur l’automatisation de

l'analyse des mesures de trafic au niveau paquet pour le diagnostic de dégradation de QoS par un opérateur télécom.

Une première contribution a été, sur la base de l'analyse d'un grand nombre de traces de trafic correspondant à des conditions réseau variées, d'identifier des comportements typiques dans le cas de différents types de dégradation: problème de transmission, congestion, limitation de l'application et variation des délais [26]. Une autre contribution a concerné l'automatisation de la détection de la sortie de l'état Slow Start de l'algorithme de contrôle de congestion, en proposant une nouvelle représentation, intemporelle, des octets en vol (Bytes in Flight, BIF) [28]. Enfin, une dernière contribution de la thèse [27] [36] a été de proposer une technique de classification automatique de l'algorithme de contrôle de congestion BBR sur la base de la distribution des temps inter-paquets.

3.1.3 Applications à la sécurité et la résilience des réseaux

Contributeurs: Robin Duraz, Sandrine Vaton, Françoise Sailhan

Nous développons des travaux autour de l'intégration de techniques issues de l'apprentissage automatique (ou *Machine Learning*, ML) dans les systèmes de détection d'intrusion (IDS). Les IDS sont historiquement basés sur des règles de décision. De la même façon que les systèmes à base de règles pour le diagnostic de pannes dans les réseaux d'accès optiques de la section précédente peuvent être complétés par des méthodes basées sur une analyse statistique des données, les techniques d'apprentissage automatique peuvent être utilisées pour enrichir le fonctionnement des IDS.

La thèse de Robin Duraz, financée dans le cadre de la Chaire Cyberdéfense des Systèmes Navals, a pour objectif d'explorer différents aspects relatifs à l'apprentissage automatique pour les IDS [8]. Une première contribution de la thèse a été de proposer une nouvelle métrique pour évaluer les performances des méthodes ML pour la détection d'attaques cyber [9]. Cette métrique tient compte de la sévérité des différentes attaques au travers de leur score CVSS (Common Vulnerability Scoring System). Contrairement aux métriques de performance classiques (fausse alarme, non détection, etc...) la nouvelle métrique, baptisée CyberInformedness, tient compte non seulement du nombre d'instances de chaque classe bien ou mal détectées mais aussi de la sévérité de l'attaque correspondante. Cette métrique permet de mettre en évidence les détecteurs qui priorisent la détection des attaques les plus sévères, contrairement aux métriques génériques de performance.

Une seconde contribution a concerné l'utilisation des principes de l'intelligence artificielle explicable (XAI, eXplainable Artificial Intelligence) pour aider les opérateurs à interpréter les résultats fournis par les méthodes ML pour la découverte de cyber-attaques [10]. Cette contribution avait pour objectif d'évaluer la pertinence des techniques XAI et a introduit deux métriques permettant de comparer quantitativement la qualité des explications. Une première métrique évalue la compacité des explications, c'est-à-dire la capacité à expliquer la décision grâce à un nombre réduit de caractéristiques. La seconde métrique évalue la qualité des prédictions du système de détection d'intrusion. Les travaux ont également montré que ces deux métriques peuvent également aider à identifier des erreurs dans les décisions.

Les cyberattaques représentent également un risque important pour les fournisseurs de services cloud, et, pour atténuer ce risque, la détection et l'atténuation des anomalies en temps quasi réel jouent un rôle essentiel. Dans le cadre de la thèse de Wassim Berriche au CNAM, co-encadrée par Françoise Sailhan, a été proposé un système statistique de détection d'anomalies [1]. Ce système comprend plusieurs modèles auto-régressifs (ARIMA) réglés pour détecter des motifs complexes (par exemple, des modèles saisonniers et multidimensionnels). Plusieurs échelles de temps sont prises en compte. Le modèle adapte la période d'observation et fait des prédictions basées sur plusieurs fenêtres temporelles. La solution proposée a été testée sur un jeu de données public et offre une solution ayant une bonne précision avec une utilisation de ressources réduite.

3.2 Modélisation stochastique de systèmes distribués

Contributeurs: Alexandre Reiffers-Masson, Isabel Amigo, Stanislas Mareschal de Charentenay, Hajer Rejeb, Serge Olivier Tsemogne Kamguia

3.2.1 Performance des registres distribués basé sur les graphes orientés acycliques

Cet axe de recherche se concentre sur l'étude et le management des registres distribués. Les registres distribués sont une technologie émergente dans le domaine des systèmes de communication. Les exemples les plus connus sont la blockchain et la crypto-monnaie Bitcoin. La fondation IOTA a introduit un nouveau type de registre distribué basé sur le concept de graphique orienté acyclique (DAG). Dans ce cadre, nous nous concentrons sur les objectifs suivants :

1. le développement de nouveaux modèles théoriques se focalisant sur l'étude de la performance de ces nouveaux registres distribués [21].
2. La création de nouveaux algorithmes distribués, asynchrones, et robustes aux attaques, basés sur la théorie des approximations stochastiques, permettant d'améliorer leurs performances [17].

3.2.2 Apprentissage en ligne des propriétés structurelles et des contrôles de systèmes en réseaux

Dans cet axe de recherche, nous décrivons nos activités de conception de nouveaux algorithmes adaptatifs pour l'estimation et le contrôle des propriétés structurelles de systèmes en réseaux.

Dans [2], nous nous sommes intéressés à la maximisation de la propagation d'une rumeur dans un réseau dont les liens sont inconnus. Nos algorithmes se basent sur différentes méthodes d'échantillonnages du réseau permettant une observation partielle, mais efficace de la diffusion de la rumeur. Dans [6], nous avons étudié un problème d'ordonnancement pour une variante du cascade modèle, où un consommateur parcourt des choix via un menu multipage. Pour ce modèle, nous avons proposé un algorithme optimal pour l'ordonnancement des choix. Nous avons également proposé une version adaptative, lorsque les paramètres du modèle ne sont pas connus a priori. Dans [25], nous avons proposé un nouvel algorithme adaptatif pour l'estimation d'une mesure de robustesse d'un graphe. Cet algorithme utilise des techniques d'échantillonnage basées sur les marches aléatoires. Cet algorithme est plus précisément dédié à l'estimation de la connectivité algébrique, mais il peut également être utilisé pour étudier d'autres propriétés spectrales d'un graphe. Dans [24], nous avons généralisé des algorithmes standard d'estimation du gradient d'une fonction avec un oracle d'ordre zéro à un scénario où certains noeuds du réseau peuvent fournir des informations erronées.

Pour chacune de nos contributions, nous avons fourni une analyse mathématique rigoureuse de la performance des algorithmes, notamment concernant leur convergence et leur complexité, en utilisant la théorie des approximations stochastiques.

3.2.3 Contrôle distribué dans un environnement hostile

Cet axe se concentre sur la conception de contrôle distribué de système multi-agents sous menace de défaillances et destructions des agents. Cet axe est porté par la thèse de Stanislas Mareschal de Charentenay.

3.3 Nouvelles technologies et services réseau

Contributeurs : Françoise Sailhan, Isabel Amigo, Sandrine Vaton, Ayman Chouayakh, Vincent Messié, Serge Olivier Tsemogne Kamguia

3.3.1 Softwarisation et virtualisation de fonctions réseaux

Contributeurs: Minqi Wang, Isabel Amigo, Françoise Sailhan

Avec les progrès considérables des réseaux définis par logiciel (SDN) et de la virtualisation des fonctions de réseau (NFV), de nouveaux défis se posent du point de vue de :

- la gestion de l'infrastructure d'accès optique [32][35][33][34]
- l'orchestration, allocation et réarrangement des microservices de réseau 5G [20][18][19].

Si les microservices sont largement adoptés lors de la conception des fonctions de réseau virtualisées (VNF), les réseaux 5G/6G nécessitent d'orchestrer soigneusement l'allocation et le réarrangement des microservices afin d'éviter un espace de solution largement segmenté lorsque les services arrivent et quittent le réseau. Pour fournir des services efficaces en termes de latence, nous introduisons une nouvelle stratégie de placement et de migration qui choisit le(s) microservice(s) à migrer et sélectionne la destination optimale (centre de données) tout en tenant compte de l'impact de la migration sur d'autres microservices. En particulier, nous proposons des heuristiques rapides et efficaces qui sont évaluées par des simulations, qui montrent que l'approche proposée réduit de manière significative la latence du service. Par ailleurs, nous avons réalisé un banc d'essai assurant la migration de fonction du coeur de réseau 5G (Magma) appartenant à un cluster K8S distant.

Le développement récent des technologies d'informatique en nuage permet de nouveaux scénarios dans lesquels les réseaux d'accès fixes et mobiles convergent à différents niveaux et travaillent en synergie au-delà de la simple agrégation des flux mobiles. Dans ce cadre, des solutions sont proposées et évaluées à l'aide d'un banc d'essai expérimental. Tout d'abord, nous avons réutilisé l'infrastructure FTTH comme lien de protection

pour répondre aux exigences de forte disponibilité des services mobiles avec un effort de déploiement minimal de la part des opérateurs. Deuxièmement, nous avons réalisé une latence de liaison montante jusqu'à 140 s pour les services 5G sensibles au temps avec le Multi-Access Edge Computing (MEC) et des fonctions centrales 5G spécifiques à l'intérieur d'un OLT désagrégé. Troisièmement, nous avons proposé une interface de coopération entre les contrôleurs SDN fixes et mobiles et nous avons démontré un scénario de découpage 5G.

3.3.2 Services et réseaux télécom dans un contexte multi-acteurs

Contributeurs: Vincent Messié, Isabel Amigo, Sandrine Vaton

Les réseaux télécom impliquent de multiples acteurs. Les différents opérateurs télécom sont en concurrence pour l'accès aux ressources (par ex. pour l'accès aux fréquences dans le domaine des accès radio) mais doivent également collaborer entre eux, par exemple pour offrir des réseaux d'accès multi-acteurs ou pour garantir une qualité de service de bout-en-bout. La présence de plusieurs acteurs ayant des intérêts communs tout en étant en concurrence pose bien sûr des problèmes techniques, mais aussi des problèmes économiques et des problèmes de confiance ou responsabilité. Différents outils peuvent être utilisés pour répondre à ces challenges. Les thèses CIFRE avec Orange de Ayman Chouayakh et de Vincent Messié se placent dans ce contexte.

Dans le cadre de la thèse de Vincent Messié, les technologies de registre distribués (Distributed Ledger Technologies, ou DLT) ont été utilisées pour introduire de la confiance et de la traçabilité dans les relations entre acteurs. Une première application a concerné les réseaux d'accès décentralisés et multi-acteurs. Une nouvelle application décentralisée basée sur la Blockchain qui améliore la couverture réseau grâce à des partenariats a été conçue, BALAdIN [22]. Le trafic véhiculé par chaque acteur est tracé grâce à un mécanisme de surveillance du réseau décentralisé et fiable et chaque acteur est récompensé en fonction de son utilisation. La faisabilité d'implémentation sur une Blockchain classique a été étudiée en validant les performances en termes de débit et de propagation des transactions Blockchain résultantes. Une deuxième application a concerné la validation d'une chaîne de services de bout en bout construite par plusieurs acteurs qui peuvent ne pas se faire confiance. Une couche de données (ou *data layer*) basée sur un registre distribué ayant une structure de graphe orienté acyclique (Directed Acyclic Graph, DAG) a été introduite afin de permettre à tous les acteurs impliqués dans une chaîne de services réseau de partager des données de performances fiables et sécurisées, tout en évitant la participation d'un tiers de confiance. Il a été démontré par simulation que l'utilisation d'un grand registre distribué basé sur un DAG permet à la couche de données de passer à l'échelle malgré la quantité de données de performance requises pour la surveillance dans un cas d'usage réaliste.

La thèse de Ayman Chouayakh a quant à elle porté sur les mécanismes d'enchères pour le partage des fréquences dans les réseaux 5G. Les débits élevés et la diversité des services offerts par la 5G exigent une utilisation souple et efficace de toutes les fréquences disponibles. En particulier, de nouvelles approches de partage dynamique du spectre seront déployées, permettant aux opérateurs de réseaux mobiles (ORM) d'accéder au spectre d'autres opérateurs historiques, après avoir obtenu une licence du régulateur. L'attribution des licences se fera par le biais de mécanismes d'enchères valables pour des zones géographiques et des durées données. Différents systèmes d'enchères ont été proposés, mais il s'agit toujours d'enchères à un coup. Nous proposons une mise en œuvre ascendante du mécanisme bien connu de Vickrey-Clarke-Groves (VCG) lorsque le régulateur dispose de plusieurs blocs de spectre identiques à attribuer [4] [3]. Les enchères ascendantes sont plus transparentes que les enchères à un coup car les enchérisseurs voient l'évolution des enchères. En outre, elles préservent la confidentialité car les enchérisseurs ne révèlent pas nécessairement leurs enchères. Par ailleurs, pour estimer le montant qu'un enchérisseur est prêt à payer pour le spectre, nous avons proposé un modèle basé sur la modélisation par chaîne de Markov du comportement de l'enchérisseur et calculer sa satisfaction en fonction du spectre obtenu [5]. La méthode a été illustrée en l'appliquant à des données d'opérateurs réels. Pour déterminer comment faire une offre, chaque ORM doit estimer sa valeur pour le spectre, c'est-à-dire le montant qu'il est prêt à payer pour le spectre. Dans cet article, nous proposons un modèle pour estimer cette valeur. Le modèle est basé sur la modélisation de la chaîne de Markov du comportement de l'utilisateur, pour calculer la satisfaction de l'ORM en fonction du spectre obtenu. Nous illustrons ensuite notre méthode en l'appliquant à des données d'opérateurs réels.

4 Soutenances de thèse

Thèses soutenues sur la période

1. Anas El Ankouri ; thèse soutenue le 04/05/2021; Étude des solutions d'accès optique en adéquation avec les interfaces du Radio Access Network
2. Amine Echraibi ; thèse soutenue le 06/12/2021 ; Les modèles probabilistes graphiques: théorie et application au diagnostic réseau
3. Minqi Wang ; thèse soutenue le 03/11/2022 ; La virtualisation (SDN/NFV) dans les réseaux d'accès optiques : contributions pour une convergence fixe mobile améliorée
4. Vincent Messié ; thèse soutenue le 18/11/2022 ; Mécanismes de confiance pour l'assurance de services de connectivités sur infrastructures multiacteurs
5. Sanaa Ghandi ; thèse soutenue le 15/12/2023 ; Analyse de mesure de délais réseau : méthodes de data mining pour la complétion et la segmentation
6. Ziad Tlaiss ; thèse soutenue le 21/12/2023 ; Analyse automatique de traces de paquets réseau pour le diagnostic de panne et l'identification de version de TCP

5 Animation scientifique

5.1 Chercheurs invités

Eshwar Sure Reddappa Setty, doctorant IISC Bangalore co-supervisé par Alexandre Reiffers Masson 3 avril 21, 2023

Patient Ntumba, post-doctorant CNAM ; 26/05/23 au 08/07/23

Chen Yan: 21 Nov - 25 Nov 2022 /12 juin - 16 juin 2023 (Restless Bandit for resource allocation in networks)

Gugan Thoppe: 11 juillet 2022 - 22 juillet 2022 (Online Learning with Adversary)

Parimal Parag: 27 juin 2022 - 1 juillet 2022 (Queuing models for datacenters)

Rajesh Sundaresan: 26 juin 2023 - 27 juin 2023 (Restless Bandit for anomaly detection)

Lucas Ingles, Doctorant UdelaR (Uruguay), 22 septembre 2023 - 14 Novembre 23 - 30 Aout 24

5.2 Séminaire recherche

05/10/2021: Example-Based Explanations (Imen Ben-Amor, Univ. Avignon), and Stop Explaining Black Box Machine Learning Models for High Stakes Decisions and Use Interpretable Models Instead (Antoine Caubrière, Univ. Avignon) [XAI reading group]

15/12/2021, Andrea Moricetta (TU Wien), Explain-IT: Towards eXplainable AI for unsupervised network traffic analysis, Conférence Invitée [XAI reading group]

10/03/2022, Nathan Dahlin (University of Southern California), Designing interpretable approximations to deep reinforcement learning with soft decision trees, Conférence Invitée [XAI reading group]

18/05/2022, Stéphane Gosselin (Orange Innovation/Networks), Artificial Intelligence for Network Management – a use case perspective [Machine Learning track @ IMT Atlantique]

23/05/2022, Minqi Wang, A MEC and UPF Compatible OLT for Time-Critical Mobile Services, ONDM 2022 Best Paper Award 25/02/2022, Julien Francq (Naval Group), Anomaly Detection using Machine Learning on Public ICS Datasets [Machine Learning track @ IMT Atlantique]

30/05/2022, Gugan Thoppe (Indian Institute of Science), Improving Sample Efficiency in Evolutionary Reinforcement Learning using Off-policy Ranking

09/06/2022, Lucas Drumetz, Handling stochasticity when learning dynamical systems from data

30/06/2022, Parimal Parag, Low latency scheduling of replicated fragments on memory constrained servers

13/07/2022, Gugan Thoppe, Approximate Q-learning and SARSA(0) under the ϵ -greedy policy: a Differential Inclusion Analysis

24/11/2022, Chen Yan, LP-update policy for weakly coupled Markov decision processes

26/06/2023, Rajesh Sundaresan, Restless Bandit for anomaly detection

25/09/23-30/09/23 Seminaire RAMONaas (Resource Allocation Methods for Optical Networks as a Service)

5.3 Invitations

17/09/2021: Local Model-Agnostic Methods, Alexandre Reiffers-Masson [XAI reading group]

22/10/2021: Interpretability of Neural Networks, Robin DURAZ [XAI reading group]

6 Promotion des activités de recherche et de leur dissémination

6.1 Best paper

Mathilde Jay, Ambre Mollard, Ye Sun, Ruyi Zheng, Isabel Amigo, Alexandre Reiffers-Masson, Santiago Ruano Rincón. "Utility maximisation in the Coordinator-less IOTA Tangle". In 7th International Symposium on Ubiquitous Networking (UNet), May 19–22, 2021.

6.2 Organisation d'événements

- Alexandre Reiffers-Masson:
 - General Co-Chair: NETGCOOP 2020 (International Conference on NETWORK Games, CONTROL and OPTimization)
 - Track Chair: UNET 2021 (International Symposium on Ubiquitous Networking)
 - Regional Chairs: VALUETOOLS 2021 (International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools)
 - Poster session chair: Sigmetrics 2023

6.3 Membre de comités de programme sur la période

- Françoise SAILHAN : IEEE CSNET, (*Cybersecurity in Networking Conference*), IEEE ICC (*International Conference on Communications*), IEEE SMARTCOMP (*International Conference on Smart Computing*), IEEE CSI (International Conference on Connected System & Intelligence), ICIOT (*International Conference on Internet of Things*), IEEE ICIN (*Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks*), ISI (7th International Symposium on Intelligent Informatics),
- Alexandre Reiffers-Masson:
 - GameSec 2022 (Conference on Decision and Game Theory for Security), BLOCKCHAIN'23, GameSec 2023 (Conference on Decision and Game Theory for Security)

6.4 Participation à des événements

Keynote speaker: F. SAILHAN Int conférence ICAIGs'23

Juillet 2023: Alexandre Reiffers-Masson a donné un cours d'été à l'IISc sur les problèmes d'allocation dynamique des ressources dans les réseaux de communication

7 Direction d'école doctorale

Sandrine Vaton, responsable de l'équipe Math&Net, a pris la direction de l'école doctorale SPIN, Sciences Pour l'Ingénieur et le Numérique, en janvier 2023, peu de temps après son lancement.

L'ED SPIN coordonne le cursus de formation et de recherche de 310 doctorant-es rattachés-es à 8 unités de recherche et inscrit-es dans deux écoles d'ingénieur-es (IMT Atlantique et ENSTA Bretagne).

Elle est présente sur 3 métropoles (Brest, Nantes, Rennes) et 4 campus et est rattachée aux collèges doctoraux de Bretagne et des Pays de Loire. C'est la seconde plus grosse école doctorale de Bretagne en nombre de doctorant-es inscrit-es.

Le LabSTICC (UMR 6285) est un des 8 laboratoires rattachés à l'ED SPIN, les autres laboratoires étant le GEPEA (UMR 6144), l'IRDL (UMR 6027), l'IRISA (UMR 6074), le LATIM (UMR 1101), le LEGO, le LEMNA et le LS2N (UMR 6004). L'école doctorale SPIN est une école pluri-disciplinaire, avec un focus important autour du numérique et des sciences pour l'ingénieur.

Sur les 310 doctorant-es inscrit-es dans SPIN, environ la moitié (154) font partie d'équipes Lab-STICC. De l'ordre de 80 thèses de doctorat sont soutenues chaque année au sein de l'ED SPIN.

Au-delà du suivi de la scolarité des doctorant-es l'école doctorale joue un rôle important dans leur intégration en organisant, entre autres, une journée d'accueil avec un atelier pour réussir son projet de thèse, des journées thématiques comme celle sur les débouchés du doctorat, des formations (intégrité scientifique, harcèlement au travail, diverses formations scientifiques...)

Site Web de l'école doctorale SPIN: <https://ed-spin.doctorat-bretagne.fr/fr>

8 Partenariat et coopérations

8.1 Contrats industriels

CET Echraibi

- Financeur: Orange
- Contrat d'encadrement de la thèse de Amine Echraibi
- 10/2018 à 10/2021; 30 kEuros

CET Messie

- Financeur : Orange
- Contrat d'encadrement de la thèse de Vincent Messié
- 10/2019 à 10/2022 ; 30 kEuros

CET Tlaiss

- Financeur : Orange
- Contrat d'encadrement de la thèse de Ziad Tlaiss
- 01/2020 à 01/2023 ; 30 kEuros

CET Mareschal de Charentenay

- Financeur : Thales dans le cadre de la chaire LATERAL ; le portage financier est assuré par l'Université de Brest
- Intelligence en essaim et gestion de conflits N contre P
- Contrat d'encadrement de la thèse de Stanislas Mareschal de Charentenay

8.2 Initiatives internationales

STIC-AMSUD RAMONAAS

- Projet STIC AmSud avec l'Uruguay et le Brésil
- Resource Allocation Methods for Optical Networks as a Service
- Responsable Int-Atlantique : Alexandre Reiffers-Masson
- 01/01/2023 au 31/12/2024; 10 kEuros

8.3 Initiatives Nationales

ANR PARFAIT

- Projet Agence Nationale de la Recherche
- Planification et apprentissage pour AI-Edge Computing
- Participants : Françoise Sailhan
- 03/2022 à 03/2026; portage financier assuré par le CNAM

8.4 Subventions

SAMR

- Financeur: Brest Métropole
- Nouvelles méthodes statistiques pour la métrologie réseau
- Demi-financement de la thèse de Sanaa Ghandi
- 10/2020 à 09/2023; 47,2 kEuros

SECDAG SAD

- Financeur: Conseil Régional de Bretagne
- Co-financement du post-doctorat de Hajer Rejeb
- 12/2022 à 03/2025; 47 kEuros

SECDAG Creach Labs

- Financeur: DGA-MI dans le cadre de Creach Labs
- Co-financement du post-doctorat de Hajer Rejeb
- 12/2022 à 03/2025; 76 kEuros

VNET-DEF ARED

- Financeur: Conseil Régional de Bretagne
- Défense proactive et mobile pour l'amélioration de la sécurité des réseaux virtualisés
- Demi-financement de la thèse de Pierre Charreaux
- 10/2023 à 09/2026; 55 kEuros

Publications

- [1] Wassim Berriche and Françoise Sailhan. Predictive Anomaly Detection. In *18th International Conference on Information Assurance and Security*, KLE, India, December 2022.
- [2] Vivek S Borkar and Alexandre Reiffers-Masson. Opinion shaping in social networks using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 9(3):1305–1316, 2021.
- [3] Ayman Chouayakh, Aurélien Bechler, Isabel Amigo, Loutfi Nuaymi, and Patrick Maillé. A truthful ascending auction mechanism for dynamic allocation of LSA spectrum blocks. *Netnomics: Economic Research and Electronic*, June 2021.
- [4] Ayman Chouayakh, Aurelien Bechler, Isabel Amigo, Loutfi Nuaymi, and Patrick Maillé. An ascending implementation of the Vickrey-Clarke-Groves mechanism for the Licensed Shared Access. In *NETG-COOP 2020 - 10th International Conference on NETWORK Games, COntrol and OPTimization*, pages 1–14, Cargèse, France, September 2021.
- [5] Ayman Chouayakh, Aurélien Bechler, Isabel Amigo, Loutfi Nuaymi, and Patrick Maillé. Estimation of spectrum valuation for 5G dynamic frequency allocation and auctions. In *VTC 2021-Spring - IEEE 93rd Vehicular Technology Conference*, pages 1–6, Helsinki (Online), Finland, April 2021. IEEE.
- [6] Richa Dhingra, Hansraj Satyam Verma, Alexandre Reiffers-Masson, and Veeraruna Kavitha. Multi-page menu recommendation in cascade model with externalities. In *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 6614–6619. IEEE, 2021.
- [7] Lucas Drumetz, Alexandre Reiffers-Masson, Naoufal El Bekri, and Franck Vermet. Geometry-preserving lie group integrators for differential equations on the manifold of symmetric positive definite matrices. In Springer, editor, *GSI 2023 - 6th International Conference on Geometric Science of Information 23*, pages 1–18, Saint Malo, France, August 2023.

- [8] Robin Duraz, David Espes, Julien Francq, and Sandrine Vaton. Machine Learning and Visualization tools for Cyberattack Detection. In *RESSI 2022 : Rendez-vous de la Recherche et de l'Enseignement de la Sécurité des Systèmes d'Information*, Chambon-sur-Lac, France, May 2022.
- [9] Robin Duraz, David Espes, Julien Francq, and Sandrine Vaton. Cyber Informedness: A New Metric using CVSS to Increase Trust in Intrusion Detection Systems. In *European Interdisciplinary Cybersecurity Conference (EICC 2023)*, Stavanger, Norway, June 2023.
- [10] Robin Duraz, David Espes, Julien Francq, and Sandrine Vaton. Explainability-based Metrics to Help Cyber Operators Find and Correct Misclassified Cyberattacks. In *CoNEXT 2023: The 19th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies*, Paris, France, December 2023. ACM.
- [11] Amine Echraibi, Joachim Flocon Cholet, Stéphane Gosselin, and Sandrine Vaton. Stochastic Backpropagation through Fourier Transforms. In *29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Dublin (virtual), Ireland, August 2021.
- [12] Amine Echraibi, Joachim Flocon-Cholet, Stephane Gosselin, and Sandrine Vaton. Deep Infinite Mixture Models for Fault Discovery in GPON-FTTH Networks. *IEEE Access*, 9:90488 – 90499, 2021.
- [13] Sanaa Ghandi, Alexandre Reiffers-Masson, Sandrine Vaton, and Thierry Chonavel. Neural collaborative filtering for network delay matrix completion. In *18th International Conference on Network and Service Management*, Thessalonique, Greece, October 2022.
- [14] Sanaa Ghandi, Alexandre Reiffers-Masson, Sandrine Vaton, and Thierry Chonavel. Non-negative Matrix Factorization For Network Delay Matrix Completion. In *NOMS 2022: IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium - 7th IFIP/IEEE International Workshop on Analytics for Network and Service Management*, Budapest, Hungary, April 2022.
- [15] Sanaa Ghandi, Alexandre Reiffers-Masson, Sandrine Vaton, and Thierry Chonavel. Lightweight Network Delay Segmentation Based on Smoothed Hierarchical Clustering. In *IFIP Networking 2023*, Barcelone, Spain, June 2023.
- [16] Sanaa Ghandi, Alexandre Reiffers-Masson, Sandrine Vaton, and Thierry Chonavel. Segmentation à faible coût des délais réseau basée sur le regroupement hiérarchique. In *GRETSI 2023*, Grenoble, France, August 2023.
- [17] Mathilde Jay, Ambre Mollard, Ye Sun, Ruyi Zheng, Isabel Amigo, Alexandre Reiffers-Masson, and Santiago Ruano Rincón. Utility maximisation in the Coordinator-less IOTA Tangle. In *UNET 2021: International Symposium on Ubiquitous Networking*, Marrakesh, Morocco, May 2021.
- [18] Kiranpreet Kaur, Fabrice Guillemin, and Francoise Sailhan. A microservice migration approach to controlling latency in 5G/6G networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Rome, Italy, May 2023.
- [19] Kiranpreet Kaur, Fabrice Guillemin, and Francoise Sailhan. Dynamic migration of microservices for end-to-end latency control in 5G/6G network. *Journal of Network and Systems Management*, 31(84), October 2023.
- [20] Kiranpreet Kaur, Fabrice Guillemin, and Francoise Sailhan. Live migration of containerized microservices between remote Kubernetes Clusters. In *IEEE International Conference on Computer Communications - Workshop (INFOCOM)*, pages 114–119, New York, United States, May 2023.
- [21] Navdeep Kumar, Alexandre Reiffers-Masson, Isabel Amigo, and Santiago Ruano Rincon. The effect of network delays on distributed ledgers based on directed acyclic graphs: A mathematical model. *Performance Evaluation*, page 102392, 2023.
- [22] Vincent Messié, Gaël Fromentoux, Nathalie Labidurie, Benoit Radier, Sandrine Vaton, and Isabel Amigo. BALADIN: truthfulness in collaborative access networks with distributed ledgers. *Annals of Telecommunications - annales des télécommunications*, June 2021.
- [23] Vincent Messié, Benoit Radier, Veronica Quintuna Rodriguez, Gaël Fromentoux, Sandrine Vaton, and Isabel Amigo. A decentralised data layer for collaborative End-to-End service assurance. In *ICIN 2022: 25th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks*, Paris (virtual conference), France, March 2022.

- [24] Alexandre Reiffers-Masson and Isabel Amigo. Online multi-agent decentralized byzantine-robust gradient estimation. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 50(4):38–40, 2023.
- [25] Alexandre Reiffers-Masson, Thierry Chonavel, and Yezekael Hayel. Estimating Fiedler value on large networks based on random walk observations. In *ICASSP 2021: IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Toronto, Canada, June 2021.
- [26] Ziad Tlaiss. Anomaly root cause diagnosis from active and passive measurement analysis. In *ITC33*, avignon, France, August 2021.
- [27] Ziad Tlaiss, Alexandre Ferrieux, Isabel Amigo, Isabelle Hamchaoui, and S. Vaton. Automated slow-start detection for anomaly root cause analysis and bbr identification. *Annals of Telecommunications*, 08 2023.
- [28] Ziad Tlaiss, Isabelle Hamchaoui, Isabel Amigo, Alexandre Ferrieux, and Sandrine Vaton. Troubleshooting Enhancement with Automated Slow-Start Detection. In *2023 26th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN)*, pages 129–136, Paris, France, March 2023. IEEE.
- [29] Colin Troisemaine, Joachim Flocon Cholet, Stéphane Gosselin, Sandrine Vaton, Alexandre Reiffers-Masson, and Vincent Lemaire. A Method for Discovering Novel Classes in Tabular Data. In *2022 IEEE International Conference on Knowledge Graph (ICKG)*, pages 265–274, Orlando, United States, November 2022. IEEE.
- [30] Colin Troisemaine, Joachim Flocon Cholet, Stéphane Gosselin, Sandrine Vaton, Alexandre Reiffers-Masson, and Vincent Lemaire. Découvrir de nouvelles classes dans des données tabulaires. In *EGC 2023: Extraction et Gestion des Connaissances*, volume 39, pages 467–474, Lyon, France, January 2023.
- [31] Colin Troisemaine, Joachim Flocon-Cholet, Stéphane Gosselin, Alexandre Reiffers-Masson, Sandrine Vaton, and Vincent Lemaire. An Interactive Interface for Novel Class Discovery in Tabular Data. In *ECML PKDD 2023: European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases*, Turin, Italy, September 2023. Demo paper of 5 pages.
- [32] Minqi Wang, Gael Simon, Isabel Amigo, Luiz Anet Neto, Loutfi Nuaymi, and Philippe Chanclou. SDN-based RAN Protection Solution for 5G, an Experimental Approach. In *ONDM 2021: International Conference on Optical Network Design and Modeling*, pages 1–6, Gothenburg, Sweden, June 2021. IEEE.
- [33] Minqi Wang, Gael Simon, Luiz Anet Neto, Isabel Amigo, Loutfi Nuaymi, and Philippe Chanclou. A MEC and UPF Compatible OLT for Time-Critical Mobile Services. In *ONDM 2022 - International Conference on Optical Network Design and Modeling*, pages 1–3, Warsaw, Poland, May 2022. IEEE.
- [34] Minqi Wang, Gaël Simon, Luiz Anet Neto, Isabel Amigo, Loutfi Nuaymi, and Philippe Chanclou. SDN East–West cooperation in a converged fixed-mobile optical access network: enabling 5G slicing capabilities. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(7):540, 2022.
- [35] Minqi Wang, Gael Simon, Luiz Anet Neto, Ayoub Bella, Isabel Amigo, Loutfi Nuaymi, and Philippe Chanclou. SDN-oriented Disaggregated Optical Access Node for Converged 5G Mobile and Residential Services. In *ECOC 2021: European Conference on Optical Communication*, pages 1–4, Bordeaux, France, September 2021. IEEE.
- [36] Isabel Amigo Isabelle Hamchaoui Sandrine Vaton Ziad Tlaiss, Alexandre Ferrieux. Automated identification of bbr traffic based on packet inter-arrival times analysis. In *35th International Teletraffic Congress (ITC-35)*, pages 1 – 9, Torino, Italy, September 2023.