

Routage, Mesure & Supervision des Réseaux IP

Pascal Mérindol, MC 27^{ème}, ICube (UMR 7357)

Synthèse de mes recherches & perspectives

Thématique : réseaux informatiques

Préambule

Ce document synthétise l'ensemble des problèmes de recherche et contributions auxquels je me suis attelé depuis ma soutenance de thèse en septembre 2008 et mon départ de l'université Louis Pasteur (Strasbourg I). Ces travaux ont d'abord été réalisés en tant que post-doctorant à l'université catholique de Louvain-la-neuve (Belgique) entre début 2009 et fin 2010 puis en tant qu'enseignant-chercheur (maître de conférences) à l'Université de Strasbourg depuis septembre 2010. Ces douze années ont été autant d'occasions privilégiées de faire de nombreuses rencontres fructueuses tant sur le plan professionnel que personnel. Ma curiosité scientifique s'est nourrie de ces rencontres qui ont suscité une envie croissante d'explorer des thématiques relativement éloignées de mon champ d'expertise initial. En pratique, cela s'est traduit par la diversification de mes activités de recherche et d'enseignement avec pour objectif systématique de mener mes projets de leur genèse conceptuelle, voire théorique, jusqu'à leur réalisation sous forme d'implémentation logicielle et leur évaluation expérimentale. Cette synthèse s'efforcera de mettre en évidence la cohérence de l'évolution et le fil conducteur de mes travaux de recherche réalisés en collaboration avec des étudiants stagiaires, des doctorants et des chercheurs expérimentés et aux compétences très variées. Après une brève description de mes thèmes de recherche, de leurs spécificités et de leurs enjeux socio-économiques, ce document se focalise sur deux objectifs : synthétiser et mettre en perspective mes principales réalisations scientifiques, puis définir un projet de recherche à moyen et à plus long terme pour motiver ma candidature à l'habilitation à diriger des recherches.

Mots clés : *réseaux & communications IP; routage, calcul et sélection dynamique des chemins; supervision des réseaux IP & mesures sur Internet; protocoles & algorithmes distribués; théorie des graphes appliquée aux réseaux; évaluation de performances.*

Contexte scientifique & Enjeux socio-économiques

Mes travaux s'inscrivent dans le contexte des réseaux IP, et traitent essentiellement de routage, de mesures et supervision. Je m'intéresse aux algorithmes et protocoles distribués se rapportant aux réseaux d'opérateur Internet (ou domaines autonomes). Acheminer des données sur Internet, c'est à dire *router* le trafic IP, consiste généralement à garantir une utilisation optimale des ressources mises en œuvre dans les réseaux d'opérateur (les fournisseurs d'accès et de transit Internet) : comment améliorer l'existant et pallier à ses limites techniques ou théoriques ? Les réseaux de cœur sont un support essentiel à de nombreux services. Actuellement, la majeure partie des communications, dont certains services critiques (données de santé et personnelles, flux financiers, gestion des réseaux électriques et de chauffage, bâtiments intelligents, etc.) transite sur les réseaux IP. Le routage est l'une des clés de voûte pour optimiser l'expérience des utilisateurs et apporter des garanties en terme d'acheminement des données. La qualité et la fiabilité des routes empruntées par les paquets IP est déterminante pour assurer de bonnes performances en termes de délais, de bande passante, de taux d'erreurs, etc.

Deux champs de compétences sont fondamentaux pour mener à bien ces recherches, de la compréhension du contexte opérationnel à la conception et le déploiement pratique des solutions théoriques, ceux-ci exigent respectivement : une connaissance technique approfondie des propriétés des réseaux, des protocoles considérés et des déploiements réels ainsi qu'une maîtrise théorique des algorithmes et systèmes distribués pour le calcul et la sélection des meilleurs chemins. Que ce soit au niveau intra-domaine (en terme de connectivité logique ou bien de structuration physique) ou, à plus grande échelle, sous forme de domaines autonomes (Autonomous System, AS), il est primordial de comprendre en détail l'objet étudié, Internet, et les protocoles déployés se rapportant à chacune de ses parties et niveaux. De même, une maîtrise théorique des algorithmes et systèmes distribués est nécessaire pour le calcul et la sélection des meilleurs chemins dans ces

types de graphes, leurs re-configurations automatiques (la convergence du protocole) et leur protection/robustesse avec des techniques de re-routage rapide efficaces. Le premier champ de compétence nécessite des connaissances techniques en terme de mesures et supervision afin de mieux cerner la réalité du terrain et ainsi y confronter le second domaine de compétence pour vérifier l'exactitude pratique de ses principes théoriques et évaluer ses limites en terme de déploiement effectif.

Cette approche bi-modale me permet d'affiner mes contributions scientifiques liées au routage IP, et aux chemins de commutation qu'il contrôle. Pour une circulation efficace de l'information, il est fondamental de déterminer les meilleurs chemins en fonction de caractéristiques sous-jacentes au type de trafic; la capacité de ces routes à répondre aux besoins à et évoluer dans un contexte (plus ou moins) dynamique est en effet crucial pour assurer des garanties de service, même lorsque l'état du réseau est dégradé. Sur cette thématique, le routage IP à états des liens ou à vecteurs de chemins, j'ai relevé trois défis : (i) le calcul et la sélection des meilleures interfaces de sorties pour le routage interne multi-chemin, (ii), la re-configuration des routes sans boucle en cas de changement topologique et, (iii), l'opportunité de prévenir toutes les pannes internes pour le trafic externe, ainsi que le déploiement de routes multi-critères (avec une technologie de routage par la source). La réponse au premier sous défi s'est faite pendant mon post-doctorat alors que les deux autres ont été le fruit d'un travail réalisé dans le cadre de deux co-encadrements de thèse. Ce premier thème **routage, fiabilité et qualité de service** est primordiale pour supporter l'évolution du contexte sociétal en matière de consommation numérique : les solutions se doivent d'être efficaces pour répondre aux besoins toujours plus exigeants de services tels que les flux financiers ou les jeux en ligne, les réseaux pour la santé (données sensibles), les appels et visio-conférences sur IP (avec plusieurs contraintes spécifiques), la retransmission temps-réel de grands événements, les enseignements et interventions en ligne et diverses opérations où la sécurité et les performances sont essentielles.

La première compétence, liée aux mesures et aux analyses des propriétés topologiques et des mécanismes de routage se rapportant aux réseaux d'opérateur, nourrit donc la seconde : il s'agit de collecter des informations et mesures, voire de superviser des réseaux pour les rendre plus automatiques. Des mécanismes adaptatifs et incrémentaux peuvent être mis en oeuvre pour évaluer les performances et des bénéfices des solutions susceptibles d'être déployées. Ce travail s'articule lui aussi en trois sous-défis : (i) découverte de topologies, (ii) leur supervision par des infrastructures de mesures actives/passives, et, (iii), l'étude des mécanismes de routage et d'ingénierie de trafic réellement déployés. Ces contributions sur le second thème **mesures, analyse et supervision** permettent ainsi "d'alimenter" le premier thème (et réciproquement de s'en inspirer), et ont aussi un grand intérêt pour des disciplines comme les systèmes complexes qui étudient les propriétés des grands graphes de terrain. Que ce soient avec les données collectées en elles-mêmes ou les méthodes de collecte, la mesure permet également à chaque opérateur d'assurer une maîtrise à long terme de son cœur de métier, l'optimisation de ses ressources, afin d'offrir les meilleurs services possibles – c'est à dire des plus rentables aux plus équitables et/ou les plus performants possibles selon des objectifs souvent orthogonaux. Ces défis sont particulièrement difficiles à relever, pour deux raisons en particulier : le contexte technique est sophistiqué, un empilement de protocoles complexes et imbriqués, et la nature de la dynamique de ces réseaux et de cet empilement logiciel est encore largement méconnue.

Enfin, dans un autre registre, celui des **Objets Connectés**, j'ai également initié plusieurs collaborations pour étudier d'une part les infrastructures de routage économes en énergie et, d'autre part, la possibilité de garantir la confidentialité des données. Les enjeux sont nombreux et importants : comment assurer la sécurité des données tout en limitant la consommation énergétique de l'infrastructure de communications ?

Alors qu'à court et moyen termes je souhaite continuer à développer ces trois axes de recherche, à plus long terme, je souhaite que mes travaux s'orientent vers une nouvelle direction, néanmoins connexe au premier thème mentionné : l'algorithmique distribuée et les algorithmes auto-stabilisants. En particulier, j'envisage de travailler sur des méthodes de vérification formelle des architectures et algorithmes de routage et de leur déploiement.

1 Routage : Calcul et Contrôle des Chemins

1.1 Sélection de Chemins Multiples

Cette problématique fait partie des premiers projets sur lesquels j'ai travaillé en tant que post-doctorant dans l'équipe *IP Networking Lab* d'Olivier Bonaventure à Louvain-la-Neuve (UCL). Cette thématique s'inscrit directement dans la continuité de mes travaux de thèse, la conception d'algorithmes efficaces pour le calcul de chemins multiples afin d'exposer un maximum de diversité de chemins à la

couche transport. Ils ont été réalisés dans le cadre du projet Européen Trilogy qui est à l'origine du nouveau protocole de transport MP-TCP. Après avoir collaboré avec plusieurs membres de l'équipe pour proposer un ensemble d'algorithmes efficaces calculant les deux meilleurs chemins disjoints du premier lien (GIS09 et COMNET11), nous avons également proposé une technique, *Controllable per Flow Load Balancing* (COMNET13), permettant de déterminer le choix des routes depuis la source du trafic dans les centres de données.

1.2 Prévention des Boucles de Routage

Les réseaux IP subissent de fréquents changements (pannes ou reconfigurations planifiées par exemple) provoquant des périodes d'instabilité de convergence durant lesquelles des boucles de commutation transitoires peuvent survenir du fait des protocoles de routage à états des liens utilisés dans les réseaux intra-domaine. Ces boucles provoquent des pertes de paquets et des ralentissements inacceptables pour les applications critiques. En collaboration avec l'UCL, IMDEA et Cisco Systems, nous avons proposé des solutions optimales pour supprimer ces boucles – provoquées par la perte de synchronisation entre les routeurs en cas de changement topologique. Ces algorithmes sont, dans leur registre, les meilleurs et les plus efficaces connus pour traiter ce problème inhérent aux protocoles d'acheminement des données à états des liens. En collaboration avec Pierre Francois (INSA Lyon) puis avec Stefano Vissichio (UCLondon), nous avons décidé de revisiter les premières solutions proposées pour prévenir les boucles de routage. Nous avons proposé des solutions incrémentales pour supprimer les boucles transitoires de routage. Ces travaux ont donné lieu à trois publications dans des communications internationales très visibles (les meilleures du domaine) : une de rang A en conférence (ICNP13); et deux de rang A* en revue (ToN14 et ToN15). Il s'agit d'un travail réalisé dans le cadre d'un contrat doctoral financé par une bourse ministérielle entre 2011 et 2014 dont le docteur, François Clad[1], est actuellement ingénieur de recherche chez Cisco Systems. Nous continuons aujourd'hui à collaborer notamment sur la thématique développée ci-dessous.

1.3 Qualité de Service & Reroutage Rapide

Actuellement co-encadrant de la thèse de Jean-Romain Luttringer avec Cristel Pelsser (directrice), nous travaillons sur deux aspects qualitatif du routage que sont la sélection et le calcul des chemins. Notre cadre de travail est le routage par la source avec Segment Routing (SR) proposé par Cisco. Ces travaux s'inscrivent dans le contexte des réseaux d'opérateurs IP : routage intra-domaine (IGP) SR multi-zones et interactions avec BGP. D'un côté, il s'agit de sélectionner un ensemble de chemins k-connexes assurant une convergence transparente pour le trafic de transit BGP en cas de changements IGP (INFOCOM21, rang A*). Pour cela nous développons actuellement une solution appelée OPTIC que nous souhaitons évaluer expérimentalement par prototypage. De l'autre (NCA20, rang A), notre objectif est de calculer efficacement l'ensemble des chemins DCLC (*Delay Constraint Least Cost*), c'est à dire le front de Pareto satisfaisant une contrainte sur le délai de propagation et minimisant la métrique de routage interne (par ex. sur le temps d'émission). Ces routes sont déployées avec SR et nous évaluons actuellement l'extensibilité de nos algorithmes dans différents contextes, par exemple dans de très grands graphes subdivisés en zones.

2 Mesures & Analyse des Réseaux IP

2.1 Cartographie de l'Internet

La structure d'Internet est méconnue : bien que son utilisation soit de plus en plus répandue, sa structure est elle de plus en plus illisible car complexe et difficile à sonder. L'objectif de ces travaux est d'inférer des graphes IP réalistes. Il s'agit là aussi de travaux entamés dès mon arrivée dans l'équipe *IP Networking Lab* avec Benoit Donnet, aujourd'hui professeur d'Informatique à l'université de Lige, et Pietro Marchetta, docteur de l'Université de Naples. Contrairement à l'approche active classique qui consiste à se servir de traceroute puis de méthodes de résolution d'alias, nous avons défini un outil, basé sur des sondes multicast (IMC09, rang A), permettant d'avoir un accès plus direct à la topologie des graphes de routeurs. Nous avons en effet été les premiers à utiliser l'outil de sondage actif *mrinfo* qui permet de collecter de précieuses informations sur les routeurs multicast de l'Internet, notamment une vue native de niveau routeur et une distinction entre les équipements point-à-point et les équipements point-à-multipoints (les publications suivantes IMC10, PAM10 et JSAC11 – rang A* – témoignent de la reconnaissance de notre travail). Nous avons encore amélioré ces contributions sur deux plans : son efficacité (NGI11) et sa capacité à reconnecter des graphes partitionnés (GLOBE12). Les données collectées ont également donné lieu à une étude analytique et à la définition d'un modèle théorique et d'un générateur de graphes bipartis avec modélisation du niveau liaison (COMNET13a).

2.2 Supervision des Réseaux IP

Dans le cadre de nos recherches pour supprimer les boucles transitoires de routage, nous avons déployé avec RENATER, le réseau Français de l'éducation et de la recherche (un NREN), des équipements de mesure actifs et passifs nous permettant de collecter des informations liées au routage et à ses effets sur les performances de leur réseau. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence de nombreuses boucles dégradant la qualité de service lors de changements topologiques planifiés ou non. Ces boucles se traduisent par de longues et nombreuses pertes de connectivité même dans le cas d'ajout topologique planifié. Ces travaux nous permettent d'envisager de nombreuses extensions, tant sur le plan de déploiement à plus grande échelle que sur les analyses elles mêmes. Il s'agit d'un travail expérimental en collaboration avec RENATER, dans le cadre des open calls européens initiés par GEANT (le meta-NREN européen) : ces recherches nous ont permis d'obtenir un financement européen (H2020 GN4 phase 2) et de travailler avec l'ensemble des NRENs. Dans ce cadre nous avons publié deux papiers dans des revues prestigieuses de rang A (COMCOM18, en tant que premier auteur, et COMNET19) : elle traitent respectivement du déploiement d'une infrastructure de mesures croisées mono- et multi-domaines avec VPN M-BGP.

2.3 Étude des Mécanismes d'Ingénierie de Trafic

Ces travaux ont été réalisés avec Benoit Donnet de l'université de Liège dans le cadre de la thèse d'Yves Vanaubel[2] et répondent à ces questions scientifiques : Est-ce que le routage IP, traditionnellement best-effort, est toujours le plus répandu dans l'Internet d'aujourd'hui ? Quelles sont les technologies les plus utilisées et communes pour mettre en œuvre l'ingénierie de trafic ? Ces questions sont à l'origine de nos travaux dans ce domaine, avec pour objectif la découverte, la classification et la compréhension des tunnels MPLS (principal *outil* accessible aux opérateurs pour modifier le routage en intra-domaine). Dans le cadre d'une collaboration avec l'ULg et CAIDA, nous avons mis au point plusieurs techniques de mesure spécifiques à la technologie MPLS. Nous sommes les pionniers dans l'investigation des techniques de mesure par sondage actif se rapportant aux tunnels MPLS (CCR12 et PAM16). Nous avons développé des méthodes de collecte de données ainsi que des algorithmes de classification originaux pour la distinction des usages de MPLS dans les réseaux IP de transit. Nous avons, sur la même base et en parallèle, pu développer des techniques actives de mesure pour étudier les empreintes de routeurs afin de distinguer leurs systèmes et caractéristiques. Ces travaux ont donné lieu à deux conférences de rang A (IMC13 et IMC15) et nous étendons actuellement deux de leurs capacités : comment révéler ou inférer activement la présence des technologies qui sont dissimulées par plusieurs couches d'abstraction (comme MPLS ou SR) ? et comment interpréter l'usage de ces technologies en fonction des structures et de la dynamique observée ? Nos travaux sur la révélation des tunnels MPLS invisibles ont déjà donné lieu à trois publications majeures : IMC17, TMA19 (best paper et data set awards) et TNSM20 avec la participation de Jean-Romain Luttringer depuis en thèse dans l'équipe. Nous poursuivons aujourd'hui ces mesures pour inférer le déploiement de SR à large échelle.

Nous nous sommes également intéressés aux défaillances du routage inter-domaine : mensonges BGP et détours de routage interne. Il s'agit de révéler les éléments faibles d'Internet, de ses IXP et du routage inter-domaine, ses limites et ses failles. Pour cela nous avons construit et proposé avec l'équipe COMICS de Naples (Antonio Pescapé et Valerio Persico) plusieurs outils et systèmes de mesure et d'analyse passant à l'échelle. Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de Julian Del Fiore [3] (avec Cristel Pelsser, directrice) et ont conduit à plusieurs publications reconnues dont TMA19 et TNSM21 (rang A*).

3 Internet des Objets

3.1 Économie d'Énergie

L'équipe réseaux du laboratoire ICube est aussi spécialisée en communications sans fils (WSN et IoT, couches MAC et routage). Je peux profiter de cette expertise pour collaborer localement avec mes collègues sur ces thématiques,

notamment sur des algorithmes et architectures favorisant l'économie d'énergie. Le but est par exemple d'endormir une partie du réseau afin d'étendre la capacité des batteries (PIMRC09). Nous avons aussi défini des heuristiques distribués, approchant un MLST (Maximum Leafs Spanning Tree) dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons proposé un algorithme de routage distribué permettant de construire une architecture convergecast efficace car peu gourmande en énergie pour établir une épine dorsale adaptative (ICC12). Nous approfondissons actuellement ces travaux dans un contexte différent avec l'essor des réseaux 6G.

3.2 Confidentialité des Données

Dans le cadre d'un projet ANR JCJC que je coordonne depuis 2019 (NanoNet), nous étudions avec Renato Neto (le doctorant financé par le projet) et Fabrice Theoleyre (le directeur de thèse) la possibilité de déployer une architecture multi-domaine préservant la confidentialité des données via leur agrégation intégrée au routage NDN. Nous avons publié deux papiers dans des conférences de rang A (LCN20 et NCA20), présentant respectivement les bases et évaluant notre architecture basée sur des politiques de routage avec de l'échantillonnage, du filtrage et de l'agrégation de données. Notre proposition se base sur les principes des réseaux NDN et s'articule sur un arbre d'agrégation des données pour assurer des propriétés comme la k-anonymité. Nous avons également publié une étude (IWCMC21) sur le déploiement d'antennes Lora pour une application de transport intelligente.

4 Perspectives

L'identification des infrastructures critiques ainsi que l'amélioration de la robustesse offerte aux opérateurs face aux pannes de celles-ci, et ce en particulier dans un contexte de routage IP inter-domaine, restent deux de mes objectifs prioritaires pour mes prochains travaux de recherche à court terme. En effet, pour commencer, je souhaite diriger des thèses dans mon domaine d'expertise initial.

L'observation et l'analyse des performances des réseaux de cœur nous permettront de dresser un inventaire des limites des protocoles et architectures actuelles, notamment en corrélant les événements de routage avec les performances observées. Cela nous mènera à l'élaboration de méthodes de conception de réseaux dont les caractéristiques pourraient permettre à des protocoles de routage dynamiques d'acheminer les données avec davantage de robustesse et d'efficacité supportant les services et fonctionnalités réseaux du futur dans le contexte des réseaux programmables.

Mon expertise dans le domaine de la métrologie de l'Internet me servira de base à la détection des ressources critiques actuelles tandis que j'aurai l'opportunité d'étendre mes compétences en terme d'analyse de problèmes de convergence liés aux changements d'état. En particulier, nous projetons de tirer parti de nos résultats antérieurs sur la recherche d'une plus

grande diversité des chemins de routage afin de proposer des mécanismes d'ingénierie de trafic qui soient en mesure de relever ces nouveaux défis dans un contexte d'architectures réseaux logicielles (par exemple avec des architectures SDN et le paradigme NFV).

Outre les perspectives à courts termes évoquées dans la continuité des travaux que je mène actuellement, plusieurs axes d'ouverture sont envisagés ici pour mes recherches à venir. Sont mentionnées ici les deux principales pistes que je souhaite respectivement développer à moyen et à long termes.

À court et moyen termes : vers un plan de données robuste et une analyse des déploiements SR Dans les années à venir, la finalisation d'un projet de longue haleine me tient tout particulièrement à cœur : la construction logicielle d'un prototype d'OPTIC (voir partie 1.3) aussi bien sur le plan données que contrôle. C'est la direction que nous prenons avec l'étude et la réalisation d'un plan de données programmable pour l'implémentation idéale d'OPTIC (par exemple avec le langage P4). En pratique, le but est de systématiquement limiter le nombre changements d'états des tables de commutation aux nombres de routeurs de bordure dans un domaine (voire au degré du noeud dans certains cas particuliers avec un routage compact). Cela aurait pour effet de minimiser la durée de convergence des protocoles intra- et inter-domaine et donc d'améliorer la qualité d'acheminement fournie par les réseaux d'opérateurs. La difficulté de ce sujet réside dans la mise à jour de structures de données plus complexe pour encoder les fonctionnalités de commutation entre le routage interne et externe. En effet, le gain en nombre de changements d'états pour les modifications topologiques internes risque de se traduire par une structure plus complexe à manipuler quand des changements externes surviennent (auxquelles il faudra aussi s'adapter efficacement par ailleurs). Ce travail nécessitera de solides connaissances en théorie des graphes, en complexité algorithmique mais aussi en ce qui concerne les technologies utilisées par les opérateurs actuels et futurs.

Mon autre thématique de prédilection, la mesure d'Internet, est également un domaine dans lequel j'aimerais diriger des thèses : localement pour commencer avec Cristel Pelsser et les possibles recrutements d'un chargé de recherche et d'un post-doctorant sur les aspects détection d'anomalies. Nous pensons notamment à des algorithmes de découverte d'équilibrage de charge plus efficace que les modèles actuels : pour cela, nous souhaitons développer des méthodes d'inférences statistiques utilisant les connaissances acquises a priori et aussi dynamiquement durant la campagne de mesure. La structuration en domaine est aussi une source exploitable pour réduire le coût de sondage. De plus, je poursuis une collaboration active avec Benoit Donnet pour l'analyse du déploiement SR et la découverte de topologie en général pour étendre et améliorer les outils existants (dans le cadre d'un co-encadrement de thèse dans leur université). Enfin, la sécurité des données est un aspect que je souhaite

encore développer sous un angle plus algorithmique comme décrit dans cette dernière partie.

À plus long terme : vers des algorithmes distribués auto-stabilisants et des robots non communicants Ces quatre dernières années, l'équipe réseaux a recruté deux maîtres de conférences (Quentin Bramas et Anissa Lamani) en tant que spécialistes de l'algorithmique distribuée, en particulier des robots et des algorithmes auto-stabilisants. En plus des cours et encadrements que nous assurons déjà ensemble dans la thématique Algorithmes Distribués, de nombreuses collaborations s'offrent à nous, en particulier sur l'étude de structures de routage auto-stabilisantes. Nous avons par exemple commencé à étudier et analyser la convergence de structures de routage arborescente pour l'agrégation de données sensibles car confidentielles. Quelles sont les conditions minimales requises pour qu'un arbre ou une forêt recouvrante émerge et se stabilise à coup sûr dans une interconnexion de domaines privées aux politiques différentes ? Comment définir les échanges de messages, les filtres et les politiques de sécurité, c'est à dire le protocole de communication en général, pour parvenir à cet état ?

Plus largement, nous sommes intéressés par la dynamique des réseaux et leur modèle de graphes sous-jacents, et étudions déjà les algorithmes les plus appropriés pour la reconvergence des structures de routage acycliques. Un co-encadrement de thèse dans ce domaine avec les nouvelles recrues de l'équipe me semble très opportun : je souhaite diriger des thèses sur cette thématique avec leurs co-encadrements. Enfin, j'ai aussi à cœur de continuer à diversifier mes activités et éventuellement d'encadrer des travaux dans le domaine des systèmes distribués en général, par exemple les robots non communicants accomplissant des missions variées (et sous diverses hypothèses/contraintes) : exploration de grille et couverture, regroupement, etc. En effet, bien qu'éloigné de mes contributions actuelles, c'est un domaine que je trouve très stimulant intellectuellement et je suis prêt et motivé à l'idée de m'y investir activement grâce à des décharges d'enseignement.

5 Bibliographie

- [1] Thèse de François Clad dirigée par Jean-Jacques Pansiot et encadrée par P. Mérindol, "Disruption-free routing convergence : computing minimal link-state update sequences", *École doctorale Mathématiques, sciences de l'information et de l'ingénieur, ICube, Unistra*, 2014.
- [2] Thèse d'Yves Vanaubel dirigée par Benoit Donnet et co-supervisée avec Jean-Jacques Pansiot et P. Mérindol, "Revealing and Characterizing MPLS Networks", *Ingénierie, informatique & technologie : Sciences informatiques, Université de Liège, Belgique*, 2018.
- [3] Thèse de Julian Del. Fiore dirigée par Cristel Pelsser et encadrée par P. Mérindol, "Detecting Hidden Broken Pieces of The Internet", *École doctorale Mathématiques, sciences de l'information et de l'ingénieur, ICube, Unistra*, 2021.