

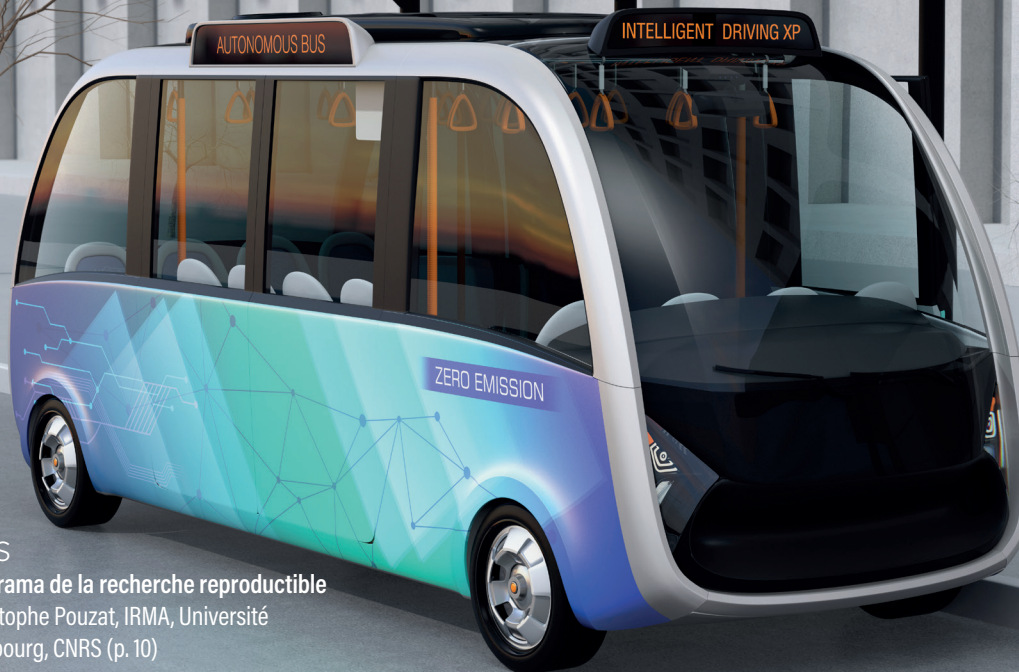
« ON THE ROAD » !

UN PEU DE ROADÉF
POUR LA ROUTE

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE
ET D'AIDE À LA DÉCISION

DOSSIER

DES VÉHICULES AUTONOMES POUR LE TRANSPORT DE PERSONNES ET DE BIENS DANS NOS VILLES (p. 7)



FOCUS

Un panorama de la recherche reproductible
par Christophe Pouzat, IRMA, Université
de Strasbourg, CNRS (p. 10)



DÉCEMBRE
2021

ROADÉF

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE
ET D'AIDE À LA DÉCISION

ROADEF



Écrire à l'ensemble du bureau :
bureau@roadeff.org

ou individuellement à

François Clautiaux, president@roadeff.org

Sandra Ulrich Ngueveu, secrtaire@roadeff.org

Caroline Prodhon, tresorier@roadeff.org

Brice Mayag, vpresident1@roadeff.org (bulletin)

Ronan Bocquillon, vpresident2@roadeff.org (site web)

Alain Nguyen, vpresident3@roadeff.org (relations industrielles et internationales)

Céline Gicquel, promotion_road@roadeff.org (promotion de la RO/AD)

Éditeur : François Clautiaux, Université de Bordeaux, Inria Bordeaux Sud-Ouest / Siège social : Institut Henri Poincaré, 11, rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05 / Publication : Brice Mayag, Université Paris Dauphine / Langues officielles : français et anglais

Site web : <http://www.roadeff.org>

ON THE ROAD

UN PEU DE ROADEF POUR LA ROUTE

éditORial

par François Clautiaux



En attendant de se retrouver tous ensemble à Lyon pour la prochaine édition de notre conférence, en présentiel, vous trouverez dans ce bulletin des nouvelles de notre communauté.

Remercions tout d'abord très chaleureusement nos confrères de Lyon, qui ont accepté avec enthousiasme de nous accueillir en février prochain, et ce malgré les incertitudes liées à la crise sanitaire. Les deux années passées ont souligné l'importance des rencontres et des discussions de vive voix, et c'est avec beaucoup d'impatience que nous attendons cet événement, qui s'annonce déjà une belle réussite.

Dans ce numéro, vous trouverez une présentation des activités RO chez Orange Labs. Les présentations d'industriels se poursuivront dans les prochaines éditions du bulletin.

Nous contribuons aussi aux questionnements sur nos pratiques et l'impact de nos travaux. Le bulletin vous propose dans ses pages un point de vue sur la recherche reproductible, un sujet qui a pu être sous-estimé par le passé en recherche opérationnelle.

Dans le cadre de cette réflexion sur nos pratiques, vous recevrez d'ici peu une enquête visant à connaître votre position sur le sujet des supports de publication, notamment le soutien aux revues en open-access, les maisons d'édition scientifiques traditionnelles. Ce sera la première étape d'un débat qui nous paraît crucial et qui nécessite une vraie concertation au sein de la communauté. Nous vous invitons à répondre en grand nombre à ce questionnaire. Il nous permettra de renforcer la position portée par ROADEF sur ces sujets, en France et au niveau européen.

Malgré la crise sanitaire, notre association a montré sa grande vitalité, avec de nombreux événements organisés par ses membres. La ROADEF a notamment poursuivi ses activités de promotion, en partenariat avec le GDR RO. La version « bibliothèque » du magazine Tangente vient de sortir, n'hésitez pas à utiliser ce bel outil, conçu pour faire découvrir notre discipline au grand public. Nous allons aussi inaugurer les nouveaux flyers et posters lors des prochaines événements locaux soutenus par notre association. Notons enfin le retour en 2022 du prix du projet industriel RO, rebaptisé « Indus'RO », qui mettra en lumière quelques projets réalisés par des entreprises adhérentes à la ROADEF.

Au plaisir de se revoir en présentiel à Lyon,

Sommaire

4 repORtage

La Recherche Opérationnelle à Orange
Nancy Perrot / Orange..... p. 4

7 rADicalement ROAD

Des véhicules autonomes pour le transport
de personnes et de biens dans nos villes
Jakob Puchinger..... p. 7

10 hORs-les-murs

Un panorama de la recherche reproductible
Christophe Pouzat p. 10

14 Vie du GDR RO

Christian Artigues, Nadia Brauner
et Pierre Fouilhoux p. 14
Le GDR RO (CNRS 3002) :
Bilan de l'année 2021 p. 14

La Recherche Opérationnelle dans la
bibliothèque de culture mathématique
de Tangente p. 15

Les congrès..... p. 16

Compte-rendu
de la 42^e JFRO p. 17

1^{re} Journée commune
ROADEF-ORBEL..... p. 18

19 ActuROAD

ROADEF/EURO Challenge 2020
Grid operation-based outage
maintenance planning p. 19
Prix du Master 2020..... p. 20
Prochains événements p. 21

21 citROnnADe

..... p. 21

repORtage

La Recherche Opérationnelle à Orange

par Nancy Perrot / Orange

Présentation du Groupe

Orange est l'un des principaux opérateurs de télécommunications au monde. Le Groupe est la huitième marque de télécommunications au monde, présent dans 26 pays pour les services aux particuliers et dans 220 pays et territoires où il opère pour les clients professionnels sous la marque Orange Business Services. Le Groupe compte 139 000 collaborateurs et sert 259 millions de clients dans le monde. Les principaux domaines d'activité du Groupe sont : les **Réseaux**, cœur de métier historique du groupe, les **Services aux entreprises**, les **Services financiers mobiles**, à travers le service Orange Money et la filiale Orange Bank, la **Cybersécurité**, Orange étant un leader européen de la CyberDefense, les **Contenus** et la **Santé**.

La Recherche Opérationnelle

L'expertise en **Recherche Opérationnelle** est un socle historique de la Recherche du Groupe Orange. Elle est indispensable de par la nature même du domaine des télécommunications qui nécessite le recours à la modélisation et à la résolution de problèmes d'optimisation et d'aide à la décision très complexes. Présente au sein du Centre national d'études des télécommunications (CNET), l'activité a continué à se développer à France Télécom R&D, créée en 2000, puis à Orange Labs, devenu Orange Innovation, nouvelle entité du Groupe dédiée au développement des nouvelles technologies et à la Recherche.

Les applications de la Recherche Opérationnelle ont largement évolué au gré de l'évolution des technologies de communication, de l'écosystème économique mondial des télécoms, et enfin des activités du Groupe. Ces activités se sont considérablement diversifiées ces dernières années, notamment avec l'avènement des réseaux programmables, le développement du secteur bancaire et, plus récemment, la création d'une filiale dédiée à la cybersécurité.

Les problématiques d'optimisation interviennent à différents niveaux dans le Groupe :

- Dans les domaines de Recherche. Par exemple, dans la Recherche en Sécurité, où la RO est nécessaire pour modéliser la complexité des systèmes à protéger et déterminer les stratégies optimales de protection ; dans la Recherche en Infrastructures Logicielles, où la RO est utilisée pour

concevoir et développer des algorithmes de gestion des ressources réseaux, algorithmes qui seront embarqués au cœur même des futurs réseaux pour prendre des décisions autonomes ;

- Dans les projets de développement, les Communautés d'Experts du Groupe, et auprès des filiales. Les applications vont du marketing des services à la planification opérationnelle des réseaux, généralement pour fournir des études, du support à la modélisation, des algorithmes, et des outils d'aide à la décision pour répondre à des besoins à court, moyen et long termes des filiales et des unités d'affaire.

Structure, équipes et environnement

Orange Innovation bénéficie d'un vivier de plus de 600 chercheurs et 140 doctorants et post-doctorants. La **Recherche** est organisée en Domaines de Recherche, eux-mêmes divisés en Programmes de Recherche. Deux de ces programmes reposent sur une expertise de pointe en Recherche Opérationnelle. Cette expertise est portée par une vingtaine de chercheurs spécialisés dans les domaines de l'optimisation combinatoire, de la théorie des jeux, des processus de décision Markovien, de l'optimisation robuste et multi-objectif, de l'optimisation convexe et de la théorie des graphes.

Le programme *Mathematical Optimization, Models and Algorithms for networks, operations and service efficiency*, a pour objectifs principaux de 1/ faire de la veille scientifique, développer des modèles et méthodes théoriques d'optimisation mathématique ainsi que des algorithmes et méthodes basées sur la RO, l'IA, et des combinaisons IA-RO ; 2/ relever les défis algorithmiques et accompagner les évolutions majeures des futurs réseaux, en proposant des modèles et des algorithmes pour la planification, la gestion, la sécurité, et la résilience des nouvelles architectures de réseau ; 3/ développer des méthodes et outils d'aide à la décision visant à améliorer l'efficacité et minimiser les coûts et la consommation d'énergie des réseaux et des services délivrés.

Le programme *Tools for Economic Modelling and Strategic decision support* a pour objectifs principaux de 1/ fournir des modèles économiques et d'optimisation des marchés Wholesales et développer des outils d'aide à la décision (simulation & optimisation) pour aider les entités Wholesale à optimiser leurs coûts et revenus sur ces marchés ; 2/ fournir



des méthodes mathématiques pour modéliser la concurrence dans les systèmes économiques des opérateurs telecom et comprendre les interactions entre acteurs ; 3/ optimiser les stratégies d'investissement réseau, en développant des méthodes pour éclairer ces stratégies (architecture, estimation du budget, investissements mobiles long terme).

La plupart des sujets traités sont construits puis explorés en collaboration directe avec les experts métiers.

La plupart des sujets traités sont construits puis explorés en collaboration directe avec les experts métiers (ingénierie des télécoms, technologie réseau, sécurité, business) appartenant aux filiales du Groupe ou au sein d'Orange Innovation. L'environnement des équipes de Recherche Opérationnelle est extrêmement riche et stimulant, d'une part grâce à la diversité des sujets étudiés et d'autre part grâce aux nombreuses collaborations internes et externes dont bénéficient les experts en RO.

Les experts participent également à de nombreux projets collaboratifs de type ANR ou Européen, et sont très actifs dans la communauté RO, y compris au sein du GdR RO. Les projets collaboratifs et les encadrements de thèse sont autant d'opportunités de s'enrichir des dernières avancées scientifiques du domaine, tout en mettant à disposition de la communauté un vivier de nouveaux problèmes d'optimisation auxquels les acteurs de l'industrie des télécoms doivent s'attaquer pour faire face aux transformations majeures de leur écosystème économique et technologique.

Exemples de problèmes d'optimisation réseaux et leurs évolutions

Les problèmes classiques d'**optimisation de réseaux** tels que les problèmes de multi-flot, de planification de réseaux

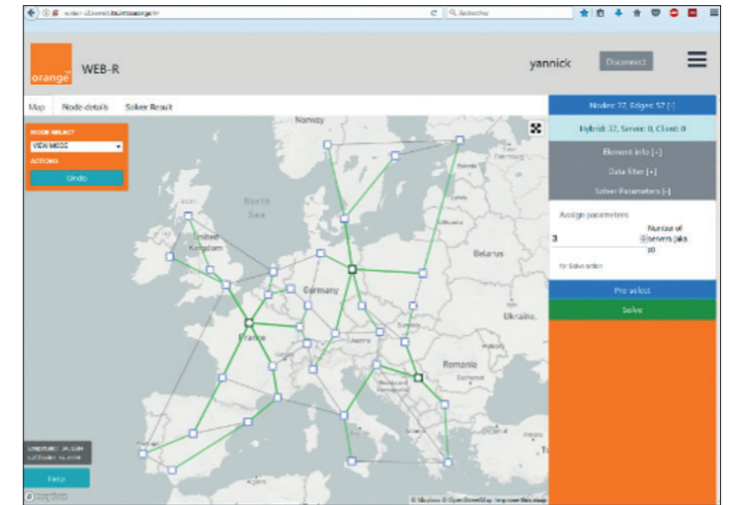


Figure 2 : Web-R est un outil générique pour les problèmes de placement optimal, y compris le déploiement d'équipements réseau.

ou de placement d'équipements, sont étudiés depuis longtemps. Ils évoluent en permanence pour se rapprocher au maximum des problématiques terrains, et doivent toujours relever les défis du passage à l'échelle, de l'incertitude des données, de la sécurisation des services et de la prise en compte de nombreuses contraintes métiers, parfois particulièrement difficiles à modéliser. Après validation auprès des équipes opérationnelles, les nouveaux algorithmes de résolution de ces problèmes ont vocation à être intégrés dans des outils de simulation et d'aide à la décision pour être utilisés par les filiales. Deux exemples d'outils issus des équipes RO sont illustrés en Figure 1 et Figure 2.

De **nouvelles variantes de problèmes d'optimisation dans les réseaux** sont apparues récemment, avec l'émergence des **réseaux programmables** (Software Defined Networking (SDN)) et des techniques de **virtualisation**. La « programmabilité » des réseaux doit permettre d'intégrer des algorithmes d'optimisation dans des contrôleurs positionnés au cœur du réseau, et capable d'interagir automatiquement avec les éléments du réseau. Ceci permettrait, par exemple, d'envoyer de nouvelles règles de routages à des routeurs en fonction de l'état réel du réseau (en cas de panne ou de congestion de certains liens), de mieux protéger certains services particulièrement sensibles, ou encore de mettre en veille automatiquement certains équipements réseaux lorsqu'ils sont sous-utilisés. La virtualisation des fonctions réseau (Virtualized Network Function - VNF) amène une flexibilité supplémentaire, avec la possibilité de déployer, dimensionner et migrer les fonctions réseau en les faisant tourner comme de simples applications sur des serveurs banalisés. Ainsi, un des nouveaux problèmes réseaux auxquels les équipes RO sont confrontées consiste à optimiser le déploiement de chaînes de VNFs (exemple en Figure 3) en déterminant à la fois le placement optimal des fonctions sur les nœuds, le « packing » de fonctions hétérogènes au sein d'un nœud, et le routage optimal des flux de trafic. Il s'agit du problème de placement de chaînes de fonctions de service (Service Function Chain - SFC).

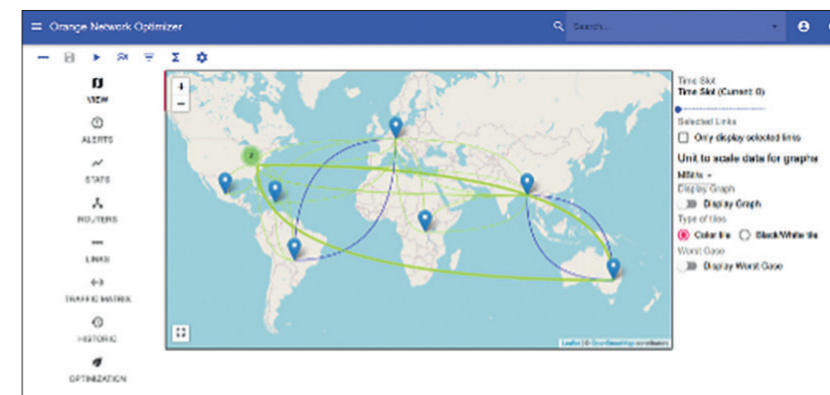


Figure 1 : Orange Network Optimizer est un outil de simulation et d'optimisation de stratégies de routage des flux de trafic dans les réseaux.

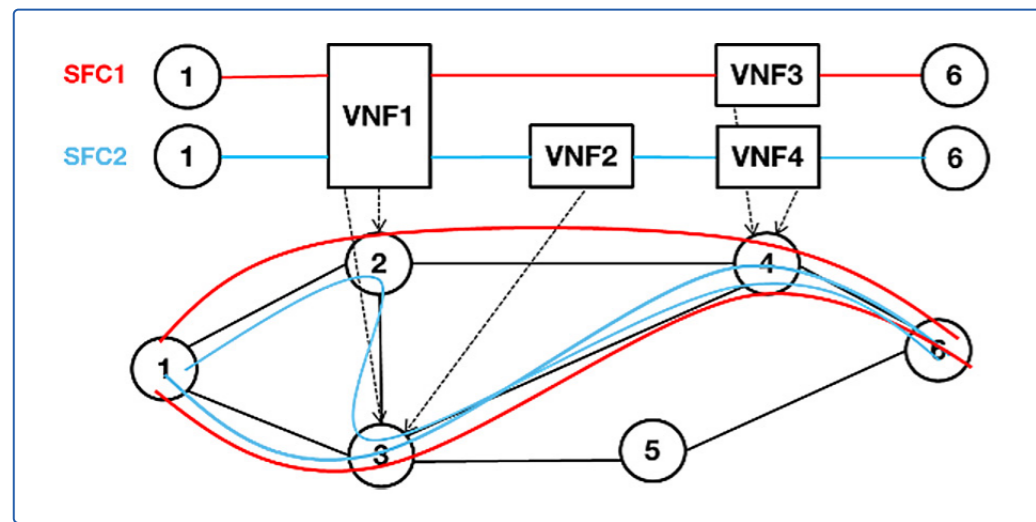


Figure 3 : Placement de deux chaînes de fonctions de service, SFC1 et SFC2 sur une topologie réseau.

L'un des principaux objectifs des réseaux 5G et au-delà est d'intégrer plusieurs services différents dans une infrastructure physique commune...

Les problèmes d'optimisation pour les réseaux au-delà de la 5G vont encore plus loin. L'un des principaux objectifs des réseaux 5G et au-delà est d'intégrer plusieurs services différents dans une infrastructure physique commune, de sorte que chaque service dispose de son propre réseau logique, isolé des autres réseaux logiques. Le découpage du réseau (« slicing ») permet de créer des partitions de réseau logiquement isolées, chaque tranche étant définie comme une unité composée de ressources programmables telles que le réseau, le calcul et le stockage. Ainsi, le « slicing » est considéré comme la technologie clé pour répondre aux différentes exigences de service sur une infrastructure partagée. Les récentes avancées dans ce domaine posent un certain nombre de défis algorithmiques pour l'exploitation des futurs réseaux : comment déployer et optimiser une « tranche réseau » (« slice ») pour garantir la qualité de service requise par les services correspondants ? Comment allouer et partager les ressources physiques aux différentes tranches en tenant compte des propriétés d'isolation ? Comment concevoir les politiques d'orchestration au sein de chaque tranche de réseau ? Une fois les tranches conçues, il faut également relever des défis opérationnels : composer les fonctions de réseau virtuel pour chaque service, placer et acheminer les flux pour que le service soit correctement fourni.

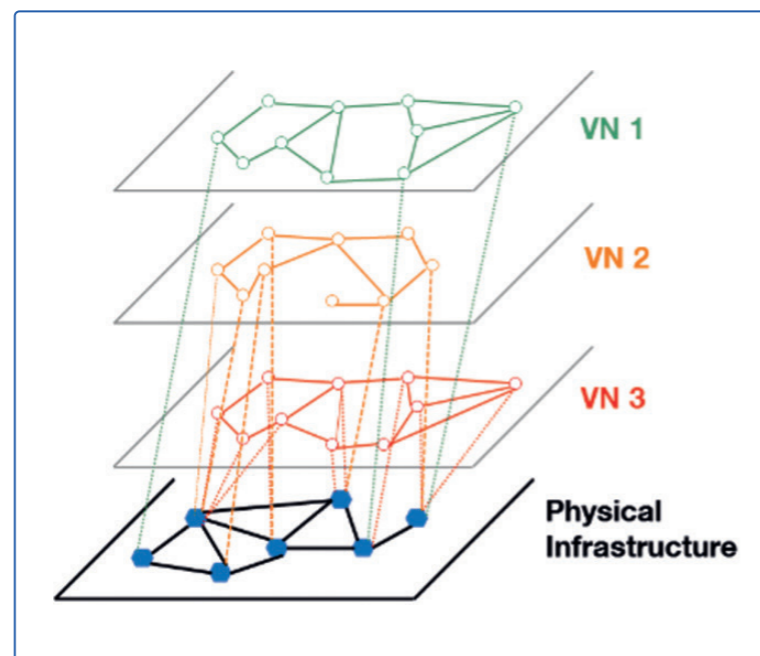


Figure 4 : Problème de placement de « slice » réseau, s'apparentant au problème de Virtual Network Embedding.

Ces défis, même considérés indépendamment les uns des autres, correspondent tous à des problèmes d'optimisation combinatoire complexes. Malgré l'intérêt croissant de la communauté pour ces nouvelles problématiques réseau, il reste d'importants défis à relever pour les experts RO avant de pouvoir gérer efficacement les futurs réseaux. Pour cela il est nécessaire et urgent de développer des algorithmes de résolution efficaces à intégrer dans des logiciels de gestion de réseau automatisés. Les récentes avancées sur le développement d'approches hybrides IA et RO sont une des pistes les plus prometteuses pour y parvenir.

rADicalement ROAD

Des véhicules autonomes pour le transport de personnes et de biens dans nos villes

..... par Jakob Puchinger Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire Génie Industriel et IRT SystemX

Les villes grandissent en termes de nombre d'habitants et de taille géographique, ce qui pose des défis majeurs en termes d'habitabilité, d'écologie et d'accessibilité. Selon les prévisions actuelles (OCDE 2021), l'activité totale du secteur de transport va augmenter d'un facteur 2.3 pour le transport de personnes et de 2.6 pour le transport de biens d'ici 2050 comparé à 2015.

La pollution ainsi que les effets néfastes pour la santé liés au transport routier posent un grand problème dans la plupart de grandes villes du monde. D'après les prévisions de l'OCDE les émissions de CO₂ augmenteront de 16% même si les engagements actuels sont pleinement respectés. Pour aller au-delà l'OCDE préconise des programmes de décarbonation ambitieux et prévoit ainsi la possibilité de diminutions jusqu'à 80% des émissions de CO₂ émanant de la mobilité urbaine.

Pour réduire les émissions, l'électrification, ainsi que la réduction de trafic automobile pourraient être des solutions. Un des grands défis des prochaines années pour les villes est l'amélioration de la qualité de vie urbaine. Celle-ci est fortement corrélée avec une réduction du trafic automobile, de la vitesse des véhicules, de l'espace disponible pour les voitures et par conséquent du développement des autres modes de transport plus soutenables que la voiture individuelle.

Parmi les solutions souvent proposées pour répondre à ces défis se trouvent les véhicules autonomes (électriques et partagés). Dans cet article, nous nous penchons sur ces véhicules autonomes pour la mobilité des personnes ainsi que sur leur potentiel pour les livraisons en ville. Nous présenterons certains travaux menés dans le cadre de la chaire Anthropolis portée par l'IRT SystemX et CentraleSupélec où nous nous intéressons, entre autres, à l'impact potentiel des véhicules autonomes sur nos villes.

Les véhicules autonomes pour transporter des personnes

Actuellement les modes de déplacement urbain sont en profonde mutation, ceci devient encore plus apparent à l'aune de la crise du COVID-19. Les modes actifs comme le vélo et la marche sont en augmentation. Même si les modes de transport partagés (transport public, transport à la demande partagé) voient une réduction importante de leur demande, leur rôle reste important pour le futur avec une normalisation de la situation sanitaire, et vu leur importance au niveau de la réduction des émissions. Ainsi la promesse des véhicules autonomes partagés reste intacte.

Depuis plusieurs années Elon Musk le patron du constructeur automobile Tesla évoque un modèle économique qui permet aux propriétaires de

véhicules autonomes de gagner de l'argent en les louant en tant que robot-taxis partagés à d'autres utilisateurs. Dans un travail récent nous avons étudié ce concept et nous l'avons comparé à une variante plus classique d'une flotte de robot-taxis gérée de façon centralisée (Mourad *et al.*, 2019). Nous avons considéré deux modèles de propriété pour des véhicules autonomes. D'une part des véhicules qui appartiennent à des propriétaires privés individuels et d'autre part une flotte de véhicules partagés gérée de façon centralisée. Dans le premier cas, le propriétaire bénéficie d'une utilisation prioritaire de son véhicule et le partage via un système de transport à la demande quand il n'en a pas besoin. Dans le second cas, le service ne connaît pas de priorités et fonctionne uniquement en partagé. Deux exemples de tournées de véhicules autonomes correspondant aux deux différents modèles sont visualisés dans la Figure 1. Notre approche pour évaluer ces différents modèles, se base sur des algorithmes de couplage et de points de rencontre. La distance et le nombre des trajets sont évalués pour les deux modèles dans notre analyse de différents scénarios pour les villes de New York et Paris. Les résultats obtenus montrent que les modèles se basant sur une flotte de véhicules partagés est plus efficace que le modèle avec la priorité pour les propriétaires individuels : jusqu'à 25% de la distance totale parcourue a pu être économisée.



¹ <https://www.chaire-anthropolis.fr/>

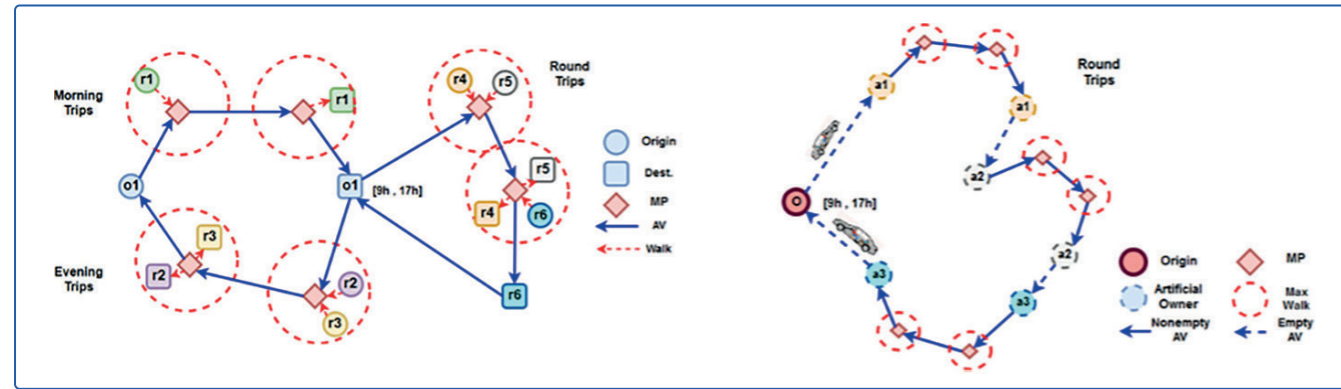


Figure 1 : Modèles de partage de véhicules autonomes à g. : propriétaires individuels avec priorité, à d. : flotte partagée (Auteur de la figure : Abood Mourad)

Nous nous intéressons aussi à la simulation de transport dans les villes pour concevoir et évaluer l'impact de mise en œuvre de services de transport à la demande de type robot-taxi (Vosooghi et al. 2019a, 2019b, 2020).

Les robots de livraison

Ces dernières années les avancements technologiques ont permis d'expérimenter la livraison avec des drones et des robots. D'une part, on voit des expérimentations avec des drones pour des livraisons en zones suburbaines ou rurales utilisant des pads d'atterrissage et de décollage spécifiques. Des drones basés sur des camionnettes sont utilisés pour augmenter l'efficacité du système de livraison dans des zones avec des points de livraison plus espacés. D'autre part, des expérimentations sont réalisées pour tester des robots dédiés à la livraison, l'un des premiers exemples était la livraison de pizzas. En milieu urbain les contextes de livraisons autonomes deviennent un sujet de plus en plus important avec des investissements importants qui se profilent mais aussi avec des sujets réglementaires majeurs à traiter (OECD, 2018).

En examinant les différents cas d'usage possibles pour les livraisons par robot et par drone, on se rend rapidement compte qu'une utilisation significative de drones n'est pas réaliste dans les zones densément peuplées. Cependant, des robots à vitesse réduite deviennent une alternative intéressante dans des environnements où l'accès est limité pour les camionnettes car ils sont généralement plus petits, plus lents, plus silencieux et plus propres que les livraisons par voiture ou scooter. Plusieurs expérimentations ont été réalisées sur des campus et des zones piétonnes. Il semble qu'à l'avenir, on verra une augmentation de ce genre d'expériences, car la promesse d'accroître l'efficacité et de réduire les coûts en se passant de personnel de livraison est attrayante pour de nombreuses entreprises. Tout récemment, un nouveau camion de restauration rapide a été testé

à Shanghai, permettant une interaction sophistiquée avec le véhicule de livraison robotisé : les clients peuvent choisir et payer leur repas directement auprès du véhicule.

Ces développements technologiques très intéressants ont suscité notre intérêt et nous ont fait réfléchir aux possibilités opérationnelles et aux implications d'une telle technologie. Nous avons étudié divers aspects opérationnels liés aux livraisons robotisées.

D'abord, des livraisons urbaines à deux échelons utilisant des robots pour la livraison sur les routes du deuxième niveau ont été étudiées (Yu et al. 2020). Dans ce concept, la camionnette vaisseau-mère transporte les robots sur l'itinéraire du premier niveau et les dépose et les récupère à des points de rendez-vous. Dans cette version, seuls les robots sont capables de livrer aux clients.

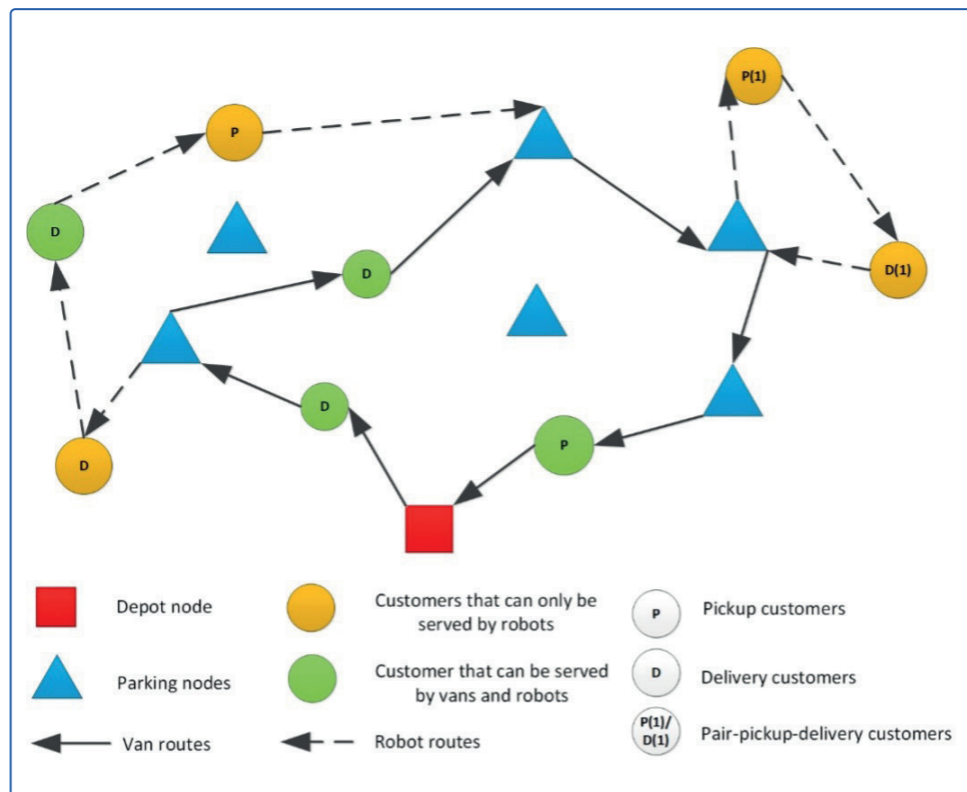


Figure 2 : Ramassages et livraisons avec des camionnettes et des robots (Auteur de la figure : Shaohua Yu)

Nos applications cibles sont les zones piétonnes de centre-ville ou de campus par exemple. Nous avons proposé des modèles mathématiques pour évaluer différents scénarios et effectué une analyse de sensibilité pour les combinaisons de vitesse des différents véhicules, révélant que l'augmentation de la vitesse des robots n'a que des avantages très limités. Nous recommandons donc de maintenir la vitesse des robots à un niveau assez bas pour une insertion acceptable dans un environnement urbain piéton.

Nous avons ensuite considéré une variante de problème assez générale où des robots et des camionnettes effectuent des opérations de ramassage et de livraison en ville (Yu et al. 2021). Certaines zones ont un accès limité, uniquement les robots peuvent s'y rendre, comme par exemple, des zones piétonnes. Les camionnettes s'arrêtent à des points de stationnement pour déposer et/ou récupérer leur robot, pour le réapprovisionner et pour échanger la batterie du robot si nécessaire. Dans une étude de cas portant sur la ville de Xi'an, nous avons effectué une analyse comparative avec des approches de livraison plus classiques. Elle a montré la compétitivité opérationnelle du système de livraison robotisé proposé.

Notre recherche a montré que des livraisons par robot peuvent être très efficaces d'un point de vue opérationnel par rapport aux approches de livraison plus classiques, ce qui explique l'intérêt accru de l'industrie pour ces technologies. De plus, d'autres chercheurs ont montré que la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ peuvent être considérablement réduites dans les zones urbaines grâce à l'introduction de livraisons autonomes par robot (Figliozzi & Jennings 2020).

Nous pouvons donc être assez optimistes quant à ces développements technologiques, car ils devraient diminuer les coûts des livraisons et réduire leurs impacts environnementaux négatifs. Cependant, elles poseront également des questions sociétales : les interactions humaines seront réduites par exemple. Il existe des idées sur la combinaison de convoyeurs robotisés et de porteurs humains dans les zones densément peuplées pour assurer des services locaux personnalisés avec une touche humaine. L'augmentation attendue des livraisons urbaines réduira l'attrait des centres urbains, les possibilités d'achats locaux changeant le visage de nos villes. Nous pouvons nous attendre à des avancées technologiques et opérationnelles dans les années à venir dans le domaine des livraisons robotisées. Ces développements auront des conséquences économiques et sociétales qui affecteront le fonctionnement des villes.

Conclusion et perspectives

Pour pouvoir répondre à l'introduction de ce type de véhicules les villes ont besoin d'outils pour mieux comprendre leurs impacts sur différents niveaux comme le trafic, l'environnement, les interactions avec les autres modes de transport, l'impact sur la vie dans les villes, etc. Ces outils seront fortement alimentés par la recherche dans les domaines de la modélisation et de la simulation ainsi que de l'optimisation. Il reste donc beaucoup à faire dans ce domaine en tant que chercheurs et professionnels de la recherche opérationnelle. Par contre ces travaux vont devoir s'articuler en collaboration avec d'autres domaines applicatifs et scientifiques comme l'urbanisme, la sociologie, l'économie, la soutenabilité, et d'autres.

Bibliographie

- Figliozzi, M. & Jennings, D. (2020). Autonomous delivery robots and their potential impacts on urban freight energy consumption and emissions. Transportation Research Procedia, 46.
- Mourad, A., Puchinger, J. & Chu, C (2019). Owning or sharing autonomous vehicles: comparing different ownership and usage scenarios. European Transport Research Review, 11.
- OECD (2018), (Un)certain Skies?: Drones in the World of Tomorrow. International Transport Forum Policy Papers 54, OECD Publishing, Paris.
- OECD (2021), ITF Transport Outlook 2021. OECD Publishing, Paris.
- Vosooghi, R., Puchinger J., Jankovic M. & Vouillon, A (2019a). Shared Autonomous Vehicle Simulation and Service Design. Transportation research. Part C, Emerging Technologies, 107.
- Vosooghi, R., Kamel, J., Puchinger J., Leblond, V. & Jankovic M. (2019b). Robo-Taxi service fleet sizing: assessing the impact of user trust and willingness-to-use. Transportation, 46.
- Vosooghi, R. Puchinger, J. Bischoff, J., Jankovic, M. & Vouillon, A (2020). Shared Autonomous Electric Vehicle Service Performance: Assessing the Impact of Charging Infrastructure and Battery Capacity. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 81.
- Yu, S., Puchinger, J. & Sun, S. (2020). Two-echelon urban deliveries using autonomous vehicles. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 141.
- Yu, S., Puchinger, J. & Sun, S. (2021). Van-based robot hybrid pickup and delivery routing problem. European Journal of Operational Research, in press.

hORs-les-murs



Un panorama de la recherche reproductible

..... par **Christophe Pouzat**, IRMA, Université de Strasbourg, CNRS

Qu'est-ce que la « recherche reproductible » et pourquoi en faire ?

La recherche reproductible a pour but de diminuer l'écart entre un idéal — les résultats de recherche publiés devraient être reproductibles — et la réalité — il est souvent difficile, même pour leurs auteurs, de reproduire des / leurs résultats. Concrètement, c'est une démarche qui consiste à fournir aux lecteurs d'articles, d'ouvrages, etc, l'ensemble des données et des programmes utilisés pour obtenir les résultats présentés *accompagnés d'une description algorithmique de la façon dont les programmes ont été appliqués aux données, ainsi que, si besoin, de l'environnement de calcul.*

Un élément implicite mais important de la définition précédente est que, dans la pratique, ce qui est entendu par « reproduction » est tout ce qui vient *après* la collecte des données — il serait donc plus judicieux de parler d'*analyse reproductible des données* —, mais comme l'approche requiert un *accès libre* à celles-ci, elles deviennent critiques et comparables, *ce qui devrait améliorer la reproductibilité des données elles-mêmes.*

Du fait du caractère très explicite de la présentation des résultats que la recherche reproductible impose, considérée comme méthodologie, elle intéresse un public beaucoup plus large que celui des (enseignants-)chercheurs produisant des publications. Même si les résultats ne sont pas rendus publics, comme au sein d'une entreprise privée, cette façon de travailler permet une préservation des savoir-faire. Cette méthodologie peut aussi être adoptée avec grand profit lors de la préparation de cours, de didacticiels ou d'ouvrages techniques.

Reproductibilité, répliquabilité, répétabilité ?

Le lecteur curieux effectuant une recherche sur Internet s'apercevra vite qu'un débat assez intense porte en ce moment sur la terminologie : on parle beaucoup de reproductibilité (*reproducibility*), de répliquabilité (*replicability*), mais aussi de répétabilité (*repeatability*) (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine 2019). Mon point de vue — fortement influencé par mon passé d'expérimentateur qui

continue comme analyste de données et modélisateur (en neurophysiologie) — est que tout paramètre estimé à partir de données expérimentales collectées sur un échantillon d'individus loins d'être tous identiques doit être accompagné d'un intervalle de confiance — sinon, il n'y a pas de « résultat ». Si des collègues refont l'expérience sur une population identique et mesurent le même paramètre, les deux intervalles de confiance doivent se recouvrir ; dans le cas contraire, le résultat n'est pas reproductible¹. Pour avoir un sens, ces intervalles de confiance doivent prendre en compte la variabilité des individus au sein de la population, les propriétés des instruments de mesure (bruit, erreur systématique, etc), les propriétés des algorithmes d'estimation — ce qui occupe traditionnellement les statisticiens — la précision des flottants utilisée dans les programmes mettant en œuvre les algorithmes, les compilateurs employés, voir même le matériel (CPU/GPU) utilisé pour effectuer concrètement les calculs.

Plan de l'article

La première partie présente, dans un contexte historique, la première « tentative aboutie » de mise en œuvre de la recherche reproductible et ses outils. Un article sur le sujet écrit il y a dix ans se serait arrêté là (Delescluse et al. 2012). La seconde partie présente les développements récents sous l'influence de trois facteurs : la demande croissante d'outils de recherche reproductible de la part de communautés scientifiques — en Biologie et Sciences Humaines notamment — au bagage informatique et numérique « faible » ; conséquence du point précédent, l'usage de plus en plus fréquent de langages interprétés nécessitant de nombreuses bibliothèques — Python est ici le principal acteur — dont l'évolution est très (trop) rapide ; le fait que la recherche reproductible exposée en première partie demande un surcroît de travail pour peu de bénéfices à *court terme*, ce qui constitue un problème majeur pour la carrière des (jeunes) chercheurs. Il sera alors temps de conclure cet article.

1. Si les deux intervalles sont « à 95 % », la probabilité pour qu'ils ne se recouvrent pas par chance est de $(1-0,95)^2=2,5 \times 10^{-4}$.

La recherche reproductible a pour but de diminuer l'écart entre un idéal — les résultats de recherche publiés devraient être reproductibles — et la réalité...

Une révolution dans la formation et dans le transfert technologique résulte du mariage du traitement de texte et des interpréteurs en ligne de commande de type script.

Première époque

Au début de la conclusion d'un article (Wood and Erpenbeck 1976) de 1976 intitulé : *Molecular Dynamics and Monte Carlo Calculations in Statistical Mechanics*, Wood et Erpenbeck écrivent :

Nous souhaitons néanmoins insister sur le fait que ces études [basées sur des simulations] ont de nombreuses caractéristiques communes avec les travaux expérimentaux habituels : elles sont sujettes à des erreurs aussi bien statistiques que systématiques. De ce point de vue, nous considérons que nos articles devraient respecter les mêmes critères que les articles expérimentaux. Ils devraient ainsi inclure une estimation de l'erreur statistique, une description des conditions expérimentales (c.-à-d. les paramètres des calculs) ainsi que des informations sur la conception de l'appareil de mesure (le programme), une comparaison avec les résultats d'études antérieures, une discussion des erreurs systématiques, etc. C'est seulement dans ces conditions que les résultats pourront être utilisés pour améliorer notre compréhension théorique...

Cette citation traduit, à mon sens, les problèmes entraînés par l'absence de section « Méthodes » dans la plupart des publications que nous classerions aujourd'hui comme « computationnelles ». Mais il se trouve que pour ce type de travail, la section « Méthodes » des articles expérimentaux peut être rendue beaucoup plus explicite grâce aux outils de développement logiciel. C'est ce qu'a démontré l'approche proposée au début des années 90 par le *Stanford Exploration Project*.

Le Stanford Exploration Project

En 1992, Jon Claerbout et Martin Karrenbach dans une *communication* au congrès de la *Society of Exploration Geophysics* écrivent :

Une révolution dans la formation et dans le transfert technologique résulte du mariage du traitement de texte et des interpréteurs en ligne de commande de type script. Ce mariage permet à un auteur d'associer à chaque légende de figure une étiquette référençant tout ce qui est nécessaire à la régénération de la figure : les données, les paramètres et les programmes. Ceci fournit un exemple concret de reproductibilité en science computationnelle. Notre expérience, au Stanford Exploration Project, montre que la préparation de ce type de document électronique ne demande pas beaucoup plus de travail que celui nécessaire à la préparation d'un rapport classique ; il faut juste tout archiver de façon systématique.

Les outils du Stanford Exploration Project

Les géophysiciens du SEP effectuent l'analyse de gros jeux de données ainsi que des simulations de modèles géophysiques « compliqués » (basés sur des EDPs) ; ainsi :

- ils ont l'habitude des langages compilés *et normalisés* comme le Fortran et le C ;
- ils emploient des *moteurs de production* comme Make ;

- ils écrivent leurs articles en TeX (Knuth 1984) et LaTeX (Lamport 1986).

L'idée clé est d'utiliser le moteur de production, non seulement pour générer les « exécutables », mais aussi pour les appliquer aux données grâce à des scripts — et ainsi (ré)générer les figures et les tables de l'article automatiquement —, avant de compiler le fichier .tex.

Avec cette approche, nous voyons que *tout* (données, codes sources, scripts, textes) est conservé dans une collection de répertoires imbriqués ce qui rend le travail « facile » à sauvegarder et à distribuer ; de plus un accent est mis dès le départ sur l'utilisation de logiciels libres avec un recours aux langages de programmation normalisés. Par contre, l'emploi de TeX (ou LaTeX) se prête mal à la « prise de notes » et constitue souvent un véritable obstacle pour les chercheurs hors des maths et de la physique. De plus, la gestion d'une arborisation de fichiers, pour ne pas dire l'ensemble de l'approche, s'avèrent « compliquées » dans le cadre d'une analyse exploratoire « au quotidien ».

Les « nouveaux » outils qui permettent à tout un chacun de mettre en œuvre l'approche du SEP

Au début des années 2000, le verrou constitué par LaTeX a été essentiellement éliminé par le développement des *langages de balisage léger* comme : Markdown ; reStructuredText ; AsciiDoc ; Org mode (utilisé pour écrire ce texte). Avec le logiciel *pandoc* il est possible de passer quasi instantanément de l'un à l'autre et, grâce à l'extension *pandoc de Markdown*, un débutant avec une heure de pratique peut générer un fichier LaTeX qui ferait envie à un expert (Bonjour 2014).

Le mariage du langage de balisage léger avec des langages interprétés populaires comme Python et R a résulté dans des « cahiers de notes numériques »² (*notebooks*) qui permettent très facilement de mélanger un texte descriptif / explicatif avec des lignes de codes. On obtient ainsi des *documents dynamiques* dans lesquels, les figures et les tables ont été remplacées par les instructions qui les génèrent. Il est alors possible de recalculer les résultats, mais aussi d'inspecter et de modifier les instructions qui les ont générés.

La gestion d'arborisation de fichiers est maintenant grandement facilitée par l'apparition du logiciel de *gestion de version* décentralisé git et des serveurs associés GitHub et GitLab.³ En fait, la combinaison langage de balisage léger / serveur git est tellement efficace et accessible

2. Il s'agit pour le logiciel R du paquet RMarkdown dont l'usage est rendu aussi simple que celui d'un éditeur de texte par l'environnement de développement *RStudio*. Les utilisateurs de Python peuvent quant à eux employer *Pweave* ou le « carnet de notes » (*notebook*) de *jupyter*.

3. De nombreux instituts de recherche comme l'INRIA, l'INSMI (les maths du CNRS) et de plus en plus d'universités proposent aux chercheurs leurs propres serveurs basés sur GitLab

qu'elle peut être employée avec profit par toute personne travaillant sur des textes (je pense aux disciplines littéraires).

Le partage des données, nécessaires à une mise en œuvre complète de la recherche reproductible, a aussi longtemps été un obstacle majeur pour les disciplines qui en génèrent en grande quantité. Les astrophysiciens confrontés très tôt au problème avaient dès les années 70 développé des formats de fichiers permettant de stocker des grandes quantités de données *hétérogènes* — le format FITS (*Flexible Image Transport System*), toujours utilisé — ainsi que des serveurs hébergés, par exemple, par la NASA. Ces idées se sont généralisées avec, au niveau du format de fichiers, le *Hierarchical Data Format* (HDF5) et, au niveau des serveurs de données, des initiatives comme *zenodo*.

Nous disposons ainsi à présent d'outils de base, essentiellement dérivés du développement logiciel, qui permettent après un apprentissage peu « chronophage » de mettre en œuvre la recherche reproductible. J'ai néanmoins bien conscience que le tour d'horizon proposé dans cette section a été très (trop) bref et j'invite le lecteur curieux d'en savoir plus à suivre le CLOM / MOOC⁴ gratuit que nous avons préparé avec mes collègues Arnaud Legrand et Konrad Hinsien : *Recherche reproductible : principes méthodologiques pour une science transparente*.

L'évolution actuelle

Nouvelles communautés

Avec la généralisation des approches quantitatives, de plus en plus de communautés scientifiques comme la Biologie au sens large et les Sciences Humaines, produisent une partie de leurs résultats par analyse ou simulations sur ordinateurs. Les membres de ces communautés, de par le cursus qu'ils ont suivis, ont rarement une culture informatique / numérique comparable à celle des chercheurs du SEP. Leur bagage dans ce domaine se limite souvent à un cours d'introduction à Python (parfois à Matlab ou R) et ni les langages compilés, ni les moteurs de production comme Make ne font partie de leur « boîte à outils ». Leur demande d'outils « tout en un » génère dès lors une profusion de bibliothèques / modules utilisables directement depuis leur langage interprété et interactif favori : Python dans la majorité des cas. Tout comme les domaines dans lesquels le besoin de recherche reproductible s'est historiquement fait sentir, les chercheurs de ces « nouvelles communautés » souhaitent eux aussi rendre leur production reproductible. De plus, du fait de la complexité des tâches de récupération et d'agrégation de données ou du fait de la complexité des chaînes de traitement utilisées, ces communautés ont poussé de façon très intéressante le développement d'extension du moteur de production traditionnel pour aboutir aux *workflows* ou *pipelines* modernes — Ricardo Wurmus a donné une présentation courte et

lumineuse des enjeux et problèmes des *workflows* dans le cadre de la recherche reproductible au FOSDEM 2021⁵. Ces outils⁶ intéressent *a priori* toute personne impliquée dans la recherche reproductible.

Reproductibilité dans la durée

Une expérience souvent désagréable attend le chercheur qui se lance dans la recherche reproductible : malgré un document dynamique préparé avec le plus grand soin et permettant effectivement de régénérer une étude complète *au moment de la création du document*, cette régénération échoue six mois ou deux ans après. Cet échec résulte de la non prise en compte de la dépendance des résultats (numériques) de l'étude vis à vis de l'environnement logiciel dans lequel celle-ci a été effectuée⁷. Cela peut se traduire concrètement (c'est une expérience tout à fait réelle) par une mise en œuvre de la méthode d'optimisation quasi-Newton BFGS (*Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*) ayant complètement changé lors d'une mise à jour de la bibliothèque SciPy de l'« écosystème Python scientifique ». Ainsi, la même optimisation sur les mêmes données ne donne plus les mêmes résultats. Clairement, dans cette situation, une saine attitude scientifique consiste à faire une comparaison détaillée des deux mises en œuvre pour déterminer celle qui est la plus correcte des deux. Mais une tendance lourde en recherche reproductible, la reproductibilité bit à bit⁸, « évacue » cette question pour privilégier un critère évaluable par une machine. Des échecs de reproduction dus à un changement de la mise en œuvre de la méthode BFGS ou à un changement des couleurs par défaut utilisées par la bibliothèque graphique de Python, matplotlib, se voient ainsi attribués le même poids⁹. Le choix d'une reproductibilité bit à bit combiné à l'adoption de logiciels de « haut niveau », qui évoluent vite, sans que les développeurs se soucient outre mesure de la rétrocompatibilité (*backward compatibility*) de leurs bibliothèques — un problème récurrent de l'écosystème Python⁹ — expliquent le recours de plus en plus systématique aux conteneurs comme Docker ou Singularity, qui permettent, théoriquement au moins, de figer tous les programmes et logiciels

5. https://fosdem.org/2021/schedule/event/guix_workflow/.

6. Il y en a profusion — voir le dépôt GitHub : *Awesome Pipeline* —, l'évolution est rapide ce qui rend toute recommandation délicate à ce stade.

7. Une étude génère une collection de fichiers qui peut être vue comme une séquence de bits et l'étude est reproductible si, lorsque le document dynamique est relancé, une séquence identique est obtenue.

8. Dans les cas extrêmes, on accorde plus de crédit à un résultat faux mais reproductible bit à bit, qu'à un résultat scientifiquement correct mais non reproductible bit à bit car la couleur par défaut des graphes est passée du noir au bleu.

9. Le lecteur, pour s'en convaincre, est fortement encouragé à lire la justification de la refonte totale de la génération de nombres (pseudo)aléatoires dans la bibliothèque numpy, par le seul (!) développeur responsable de cette fonctionnalité : <https://numpy.org/neps/nep-0019-rng-policy.html>.

4. Cours en Ligne Ouvert Massif / Massive Open On-line Course.

Nous disposons ainsi à présent d'outils de base, essentiellement dérivés du développement logiciel, qui permettent après un apprentissage peu « chronophage » de mettre en œuvre la recherche reproductible.



dont dépend une application donnée. Une critique claire de cette approche est développée par R. Wurmus⁵ ; le lecteur qui voudrait se familiariser rapidement à ce type d'outils pourra consulter avec profit le cours en ligne *Reproducible research* du projet *Code Refinery*. Il est clair que la reproductibilité bit à bit constitue le critère idéal de reproductibilité dans une période où les instances d'évaluation se focalisent d'une part sur des indices bibliométriques et, d'autre part, commencent à demander une « recherche reproductible » : avec la reproductibilité bit à bit on fait une telle recherche sans trop perdre de temps — car on fige sa pile logicielle plutôt que de décrire précisément ce qu'on fait — et on produit plus (d'articles). Il y a potentiellement une alternative que les chercheurs plus âgés, ayant déjà un emploi permanent, peuvent s'offrir le luxe d'explorer : cloisonner au maximum les étapes d'une étude ; avoir recours le plus possible à des programmes écrits dans un langage compilé et normalisé comme le Fortran, le C ou le C++ ; utiliser Python au minimum et essayer de se limiter à sa bibliothèque standard. Les langages normalisés évoluent, mais moins vite ; une grande importance est accordée par les comités de normalisation à la rétrocompatibilité d'une version à l'autre ; plusieurs compilateurs de grande qualité sont

systématiquement disponibles. Cette approche n'élimine pas tous les problèmes de dépendance, mais elle les limite fortement.

Conclusions

Mettre en œuvre une recherche reproductible « au quotidien » ne présente plus aujourd'hui de gros problèmes. Le chercheur n'a pas besoin de changer de façon radicale sa façon de travailler, juste de systématiser un peu son travail ; les outils nécessaires sont disponibles et maintenant bien documentés ; des cours sont développés. Mais la recherche reproductible est une approche jeune qui doit faire face à des problèmes pas toujours pleinement anticipés, comme la reproductibilité dans la durée. Comme toute discipline nouvelle et dynamique elle voit se présenter de nombreuses propositions de solutions, pas toujours compatibles, aux problèmes rencontrés. Nous avons ainsi aujourd'hui de nombreux moteurs de *workflow* à disposition, plusieurs systèmes de conteneurs, etc. Comme l'un des enjeux majeurs est la fiabilité dans le temps il va nous falloir nécessairement faire preuve de patience et rester ouverts.

Bibliographie

Bonjour, J.-D. 2014. *Élaboration Et Conversion de Documents Avec Markdown Et Pandoc*. EPFL-ENAC-IT, sous licence CC BY-SA 3.0. <http://enacit1.epfl.ch/markdown-pandoc/>.

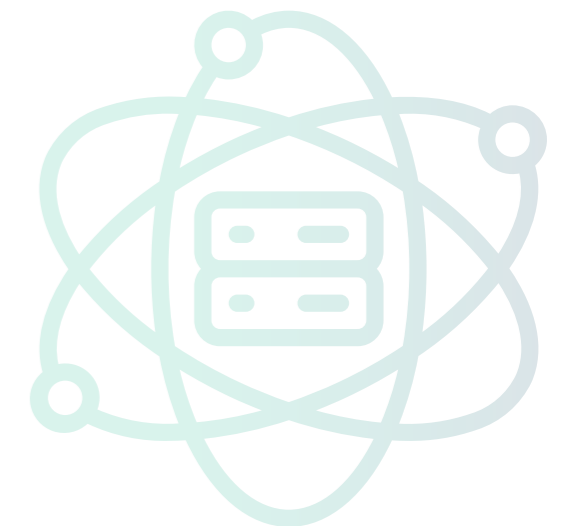
Delescluse M., R. Franconville, S. Joucla, T. Lieury, and C. Pouzat. 2012. *Making Neurophysiological Data Analysis Reproducible: Why and How?* *Journal of Physiology-Paris* 106 (3-4): 159-70. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2011.09.011>.

Knuth, D. E. 1984. *The TeXbook*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

Lamport, L. 1986. *LaTeX: A Document Preparation System*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. 2019. *Reproducibility and Replicability in Science*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25303>.

Wood, W. W., and J. J. Erpenbeck. 1976. *Molecular Dynamics and Monte Carlo Calculations in Statistical Mechanics*. *Annual Review of Physical Chemistry* 27 (1): 319-48. <https://doi.org/10.1146/annurev.pc.27.00176.001535>



Vie du GDR RO



..... Par Christian Artigues, Nadia Brauner et Pierre Fouilhoux

Le GDR RO (CNRS 3002) : Bilan de l'année 2021

En janvier 2021, la nouvelle structure GDR RO (présentée dans le bulletin de décembre 2020) est devenue effective.

Elle se base principalement sur 7 axes (Optimisation Mathématique - Optimisation Combinatoire et Programmation en Nombres Entiers ; Optimisation Mathématique - Programmation Mathématique Non Linéaire ; Décision : Modélisation, Évaluation, Incertitude ; Méthodes Hybrides, (Méta)Heuristiques, Programmation Par Contraintes ; Complexité, Approximation et Graphes pour la Décision et l'Optimisation ; Réseaux, Énergie Services, Transport ; Ordonnement, Planification et Applications) et sur 3 actions transverses (Données, Apprentissage Automatique et Optimisation ; Décision et Optimisation Robuste ; Recherche Opérationnelle, Développement durable et Sobriété Numérique). Les axes rassemblent des groupes de travail dont certains sont la continuité de groupes existants auparavant.

À ces axes s'ajoutent des actions spécifiques en direction des jeunes chercheurs, ainsi que des actions de réflexion et de propositions sur l'éthique, les sciences ouvertes, les relations académie/industrie ou l'ouverture internationale.

L'année 2021 a été une année difficile pour l'animation scientifique. Pourtant les axes et groupes du GDR RO ont réussi à organiser en présentiel ou en distanciel un nombre important d'activités malgré les confinements. Plusieurs activités sont également planifiées pour la fin d'année 2021. Le site du GDR RO <http://gdrrp.lip6.fr> retrace l'ensemble de ces activités.

Le GDR RO au congrès ROADEF (26-30 avril)

Le congrès ROADEF 2021 en distanciel a été l'occasion d'une coopération forte entre la ROADEF et le GDR RO. De nombreuses sessions ont été organisées par les groupes du GDR RO. Et huit tutoriels ont été proposés par les axes :

- « Multiagent scheduling problems », Alessandro Agnetis;
- « Décomposition de graphes et composition de polyèdres associés », Fatiha Bendali-Mailfert ;
- « Équilibre entre exploration et exploitation. Nécessité ou mantra », Maurice Clerc ;
- « Introduction à l'algorithmique en ligne », Christoph Dürr ;
- « Métaheuristiques et contraintes », Jin-Kao Hao ;
- « Approches d'optimisation biniveau pour les problèmes de tarification », Martine Labbé ;
- « Optimisation de boîtes noires avec l'algorithme MADS et le solveur NOMAD », Sébastien Le Digabel ;
- « Partage équitable de biens indivisibles », Nicolas Maudet.

Le GDR RO a également convié des industriels à faire un retour d'expérience lors de sessions du congrès avec Issam Mazhoud - DecisionBrain, Nancy Perrot - Orange, Alexandre Marié - Artelys, Ariel Waserhole - SunR.

Action jeunes chercheurs

Plusieurs actions envers les jeunes chercheurs ont été mises en place par les groupes et les axes :

- L'école du GDR RO organisée par l'axe Ordonnement, Planification et Applications les 24-26 novembre.
- L'école doctorale sur le sujet « MINLPs and Bilevel Problems » du groupe POC de l'axe « Optimisation Mathématique - Optimisation Combinatoire et Programmation en Nombres Entiers » a accompagné les journées JPOC 2021, les 22-25 juin.
- L'école thématique « Approches Quantiques pour une nouvelle recherche opérationnelle » coorganisée par le groupe GT2L avec le GT IQ du GDR IM et du groupe d'EURO, EUME, le 2 novembre.
- Prix de la meilleure thèse en Transport et Logistique par le groupe GT2L décerné le 24 avril à Nicholas Kullman (1^{er} prix), Imen Ben Mohamed et Michael Saint Guillaïn (2^e prix exæquo).

Un forum virtuel utilisant l'outil gathertown a tenté de compenser l'absence de rencontres physiques lors du congrès ROADEF en proposant un forum de rencontre entre étudiants, industriels et académiques. Vu le succès rencontré avec un bon nombre de participants et des retours positifs, un deuxième forum fonctionnant sur même le principe a réuni des étudiants de dernière année (Master et d'écoles d'ingénieurs) et les entreprises/laboratoires académiques proposant des stages le 28 octobre. Avec une 60aine de participants, il semble utile que ce forum soit réorganisé sur ce mode virtuel dans les années à venir.

Journées spéciales et actions transverses

Outre l'activité des groupes de travail, notons cette année des journées spéciales organisées par les axes et par les actions transverses :

- L'axe « Réseaux, Énergie Services, Transport » a organisé un webinaire « Aide à la décision & RO face à la Covid-19 » le 11 juin et sa première journée d'axe le 1^{er} juillet ;
- L'axe « Méthodes Hybrides, Métaheuristiques, Programmation par Contraintes » a organisé les Journées Francophones de la Programmation par Contraintes du 22 au 24 juin ;
- Pour l'axe Décision, Modélisation, Évaluation, Incertitudes, une journée du groupe COSMOS est organisée en novembre ;
- L'axe « Optimisation Mathématique - Programmation Mathématique Non Linéaire » a proposé le 10 juin des exposés en visio-conférence ;
- Les axes « Complexité, Approximation et Graphes pour la Décision et l'Optimisation » avec le groupe TADJ, en lien avec l'axe « Réseaux, Énergie Services, Transport » organise une journée « Modèles et algorithmes des graphes pour les transports » en fin d'année 2021 ;



- L'action transverse « Données, Apprentissage Automatique et Optimisation » a proposé un tutoriel « Combinatorial optimization and interpretable machine learning » par Thibault Vidal le 21 juin en distanciel ;
- L'action transverse Décision et Optimisation Robuste propose une journée « Optimisation robuste et stochastique » à l'École des ponts le 19 novembre.

Trois sujets de société ont été abordés au travers des actions transverses et des actions spécifiques :

- L'action transverse « Développement Durable et Sobriété Numérique » a organisé une première table ronde à ROADEF 2021 sur ce sujet.
- L'action « Éthique » a également organisé une table ronde à ROADEF 2021, point de départ d'une réflexion qui a conduit à une journée « Éthique et Recherche Opérationnelle » à Paris le 26 novembre.
- L'action « Sciences ouvertes » a mis en place une page sur le site du GDR RO pour recenser les différentes actions sur cette thématique : n'hésitez pas à contribuer à ce sujet en faisant connaître des initiatives en cours ou des propositions d'actions collectives.

Des conférences internationales se déroulant en France ont été soutenues par le GDR RO : EUROPT 2021 les 7-9 juillet à Toulouse ; IEEE CASE 2021 les 23-27 juillet à Lyon et APMS 2021 les 5-9 septembre à Nantes.

Actions à venir 2022

De nombreuses activités reportées de l'année 2021 sont prévues en 2022 comme les journées industrielles et les réunions (en présentiel) des groupes de travail. Le GDR va également remettre en place l'aide à la mobilité des jeunes chercheurs et ouvrir de nouvelles perspectives à l'aide aux coopérations internationales.

D'autre part, suite à la réorganisation de l'INS2I, les GDRs se voient confier des missions scientifiques au-delà de l'animation scientifique. Il est souvent demandé de participer à des textes collectifs sur des sujets scientifiques précis ou plus généraux s'apparentant à de la veille scientifique. Nous réfléchirons également ensemble à mettre en avant et dynamiser nos activités collectives concernant la réponse aux projets (ANR, PEPR, projets européens, ...) ainsi qu'à la valorisation des projets académiques dans le tissu industriel.

La Recherche Opérationnelle dans la bibliothèque de culture mathématique de Tangente

..... Par Christian Artigues, Nadia Brauner, François Clautiaux et Pierre Fouilhoux

Le dernier numéro bibliothèque Tangente vient de sortir et il parle de Recherche Opérationnelle : http://infinimath.com/librairie/descriptif_livre.php?type=magazines&theme=7&soustheme=1&ref=3070&.

Vous avez aimé le hors-série 75 de la revue Tangente sur le Recherche Opérationnelle qui est paru en kiosque l'été 2020 ? Ce numéro bibliothèque reprend les articles du numéro kiosque avec de nombreux nouveaux articles, des brèves sur les grands noms de la RO...

Les numéros bibliothèque Tangente sont des livres grand public (niveau bac) consacrés aux mathématiques. Pour ceux qui ne connaissent pas la RO, c'est un panorama intéressant et didactique. Pour les autres, vous pouvez vous appuyer dessus dans vos cours par exemple pour montrer que la RO est utilisée pour des problèmes très variés et avec des méthodes que nous enseignons. C'est aussi un ouvrage utile pour parler de RO dans vos entreprises et établissements.

Les dossiers avec quelques exemples de sujets traités sont :

- Au confluent de l'algorithmique et de la modélisation (P et NP, Recherche Arborescente, programmation dynamique, optimisation dans l'incertain...)
- De grands problèmes résolus (ordonnement, transport, dualité, RO et apprentissage...)
- Les défis sociétaux (en santé, énergie, biodiversité, télécom...)
- Aide à la décision (théorie des jeux, découpage électoral, optimisation équitable, algorithme à véricité garantie...)



Ce numéro a été piloté par des membres du GDR RO et de la ROADEF. N'hésitez pas à utiliser ce numéro (commande possible depuis fin octobre) pour communiquer autour de vous !

¹ Aucun bénéfice n'est reversé aux auteurs ou aux organisations.

Retour sur le Congrès ROADEF, du 26 au 30 avril 2021 à Mulhouse

..... Pour le comité d'organisation, Laurent Moalic et Lhassane Idoumghar



Lorsque nous avons proposé notre candidature à l'organisation de ROADEF 2021, c'était évidemment sans compter sur la tournure que les événements allaient prendre ! Nous nous attendions bien à démarrer une aventure, avec son lot d'aléas... mais le caractère stochastique de ce qui nous attendait a été (considérablement) minimisé. Dans ces quelques lignes nous revenons sur les faits marquants de cette édition spéciale.

Lorsque nous avons proposé notre candidature à l'organisation de ROADEF 2021, c'était évidemment sans compter sur la tournure que les événements allaient prendre ! Nous nous attendions bien à démarrer une aventure, avec son lot d'aléas... mais le caractère stochastique de ce qui nous attendait a été (considérablement) minimisé. Dans ces quelques lignes nous revenons sur les faits marquants de cette édition spéciale.

Toute personne ayant déjà été en charge de l'organisation de ce beau congrès sait à quel point les quelques jours d'échanges scientifiques intenses et autres moments conviviaux ne sont que la partie visible de l'iceberg. L'organisation d'un tel évènement démarre de longs mois auparavant... Autant dire que lorsque le premier confinement a été mis en place, les spéculations allaient bon train : « Mais non, en février tout sera revenu à la normale, c'est dans près d'un an... ! » ; « Tu es sûr, mais si ça n'est pas le cas est-ce qu'on pourra annuler le dîner de gala, et récupérer tous les frais avancés ? » ; « Les restrictions d'accès aux locaux seront-elles levées ? Les participants seront-ils présents ? Peut-on compter sur le soutien des sponsors et de la région ? » Bref, trop d'incertitudes planaient sur les mois à venir. Deux options se sont rapidement dégagées :

- maintenir ROADEF en février, « en distanciel »
- repousser ROADEF de quelques mois pour se laisser une (petite) chance de nous retrouver tous ensemble, « en présentiel » !

Vous l'aurez compris, nous nous sommes attachés à cette petite chance, et avons choisi d'organiser cette édition au mois d'avril. Ça n'est évidemment pas une période habituelle, mais dans le contexte actuel nous n'étions plus à un fait exceptionnel près, et nous espérions vivement pouvoir nous retrouver tous ensemble à Mulhouse !

Malheureusement la situation tardait à évoluer favorablement, et il nous fallait prendre une décision : ROADEF 2021 aurait lieu à distance, avec un format sur 5 jours. Le congrès ROADEF c'est évidemment un événement scien-

tifique, mais c'est également un événement convivial. Et la distance c'est a priori tout sauf convivial... Qu'à cela ne tienne. À travers les solutions techniques mises en œuvre, mais surtout grâce à la bonne humeur de chaque participant, la semaine passée ensemble aura été particulièrement riche ! Pour certain cette semaine aura été l'occasion de se retrouver, pour d'autres de nourrir des discussions à haute teneur scientifique. En tout état de cause vos nombreux témoignages nous confirment que chacun y aura passé un très bon moment, ce qui ne peut que nous réjouir !

C'est vrai que nous n'aurons pas eu l'occasion de partager une bonne choucroute accompagnée de son vin d'Alsace ou encore notre « fameux » Munster et autre tartes flambées... Mais les chiffres parlent d'eux-mêmes : grâce à chacun ROADEF 2021 aura été une belle réussite ! Nous ne saurions conclure sans remercier toutes les personnes qui ont œuvré à l'organisation de ROADEF 2021. Nous souhaitons remercier tout particulièrement les nombreux collègues de l'Université de Haute-Alsace qui ont répondu présent à nos sollicitations, ainsi que les collègues de l'UTBM, de l'UNISTRA et de Tours, de Bordeaux et du LORIA à Nancy qui se sont impliqués dans l'organisation de cette édition.

Nous remercions également François Clautiaux, Aziz Moukrim et l'ensemble du bureau de la ROADEF pour leur support lors des différentes décisions qui ont jalonné l'organisation de cette édition. Un grand merci à Christian Artigues, ainsi qu'à l'ensemble des porteurs d'axes du GDR RO qui ont été au cœur de l'organisation scientifique de cet évènement.

Nos remerciements sont également adressés à nos partenaires industriels pour leur soutien sans réserve et notamment Decision Brain, EDF, Eurodecision, FICO, Gurobi, Local-Solver, RTE, SNCF, TotalEnergies.

Enfin, nous remercions vivement tous les participants et les orateurs qui auront contribué à la réussite de cet évènement. Merci à tous !

Nous transmettons à présent le flambeau aux collègues de l'INSA Lyon, qui nous préparent une édition 2022 qui aura lieu du 23 au 25 février, et qui devrait être en présentiel !

ROADEF 2021 en quelques chiffres

Nous profitons de cette tribune pour présenter quelques chiffres qui auront marqué cette édition :

5 jours de conférence

plus de **600 participants** dont 558 personnes inscrites

16 pays représentés

186 présentations en sessions parallèles

4 présentations plénières rassemblant jusqu'à 300 personnes

8 tutoriels

2 tables rondes

4 sessions industrielles

DEC 2021 / n°43

Compte-rendu de la 42^e JFRO (Journées Franciliennes de Recherche Opérationnelle)

..... Comité d'organisation : Zacharie ALES, Sonia TOUBALINE, Emiliano TRAVERSI, Dimitri WATEL



Cette édition des Journées Franciliennes de Recherche Opérationnelle s'est déroulée le lundi 13 septembre 2021. La journée était intégralement en ligne, diffusée par visio-conférence. Elle avait pour thème "Conjectures". Quatre orateurs y ont participé pour un public d'une cinquantaine de participants.

Le premier exposé a été donné par Louis Esperet. Il a présenté plusieurs conjectures autour de l'identification de k-flots non nuls. Un k-flot non nul est un flot obtenu à partir d'un graphe non orienté en attribuant à chaque arête une orientation et une valeur de flux dans $\{1, 2, \dots, k\}$. Diverses conjectures ont été présentées. L'une d'entre elles, proposée par Tutte en 1954, affirme que tout graphe 2-arête-connexe possède un 5-flot. Bien qu'il ait été prouvé par Seymour en 1981 que ces graphes comportent nécessairement un 6-flot, la conjecture reste ouverte.

Andras Sebo a ensuite présenté quelques problèmes combinatoires ouverts liés à la programmation linéaire tels que les suivants :

- Existe-t-il un chemin Hamiltonien entre deux sommets donnés d'un graphe, 50% plus long que le résultat d'une relaxation PL naturelle ?
- Existe-t-il une solution du problème de bin packing qui utilise juste 1 bin de plus, que la relaxation PL ?

L'après-midi a débuté par un exposé de Julien Bensmail autour de la 1-2-3 conjecture posée en 2004 par Karonski, Luczak et Thomason. Cette conjecture indique que pour tout graphe connecté différent de K_2 , il est possible d'attribuer un label 1, 2 ou 3 à chaque arête de sorte à ce que les sommes des labels sur les arêtes incidentes à deux sommets adjacents

soient nécessairement différentes. Si l'on ajoute le label 4, la propriété a été démontrée mais malgré de nombreux efforts, la 1-2-3 conjecture reste ouverte. De nombreuses variantes de ce problème, ainsi que des résultats associés, ont été présentés.

La dernière présentation a été effectuée par William Lochet et traite d'une généralisation d'un théorème de Sands, Sauer et Woodrow de 1982. Dans ce cadre, un ensemble de sommets S d'un graphe dont les arcs sont bi-colorés est dit indépendant si pour tout couple de sommets de S il n'existe aucun chemin mono-chromatique les reliant. Sands, Sauer et Woodrow ont montré qu'il existe nécessairement un ensemble indépendant S tel que chaque sommet du graphe peut être atteint par un chemin mono-chromatique partant de S . Ce résultat n'est plus vrai si les arcs sont colorés en utilisant au moins 3 couleurs. Les auteurs ont cependant conjecturé l'existence d'une fonction f telle que pour tout graphe dont les arêtes sont k -coloriées, il existe un ensemble de taille $f(k)$ permettant d'atteindre tout sommet par un chemin mono-chromatique. À ce jour, l'existence d'une telle fonction reste encore ouverte même pour $k = 3$. Les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette conjecture, ainsi que certaines de ses variantes, ont été présentés.

Les enregistrements vidéo des exposés de cette journée sont en ligne sur le site des JFRO : <https://www.lamsade.dauphine.fr/~jfro/>.

Compte rendu de la première journée commune ROADEF / ORBEL

..... Pour le comité d'organisation, Zacharie ALES, Sonia TOUBALINE, Emiliano TRAVERSI, Dimitri WATEL, Daniele Catanzaro.

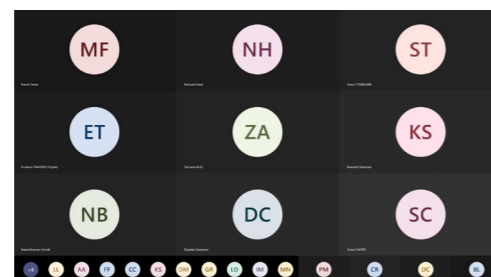
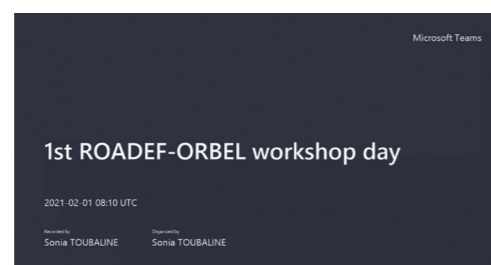
La première journée commune conjointement organisée par la ROADEF et ORBEL s'est déroulée le 2 février 2021 en distanciel. Elle a accueilli une cinquantaine de participants. Sept orateurs avaient accepté d'y présenter leurs travaux. La journée a débuté par un discours d'ouverture de François Clautiaux (président de la ROADEF) et de Kenneth Sørensen (président d'ORBEL).

Le premier exposé a été donné par Kenneth Sørensen (Université d'Antwerp) qui s'intéresse à l'application de la méta-analyse aux méta-heuristiques. La motivation de ces travaux provient du fait que la recherche en méta-heuristique se concentre généralement sur le développement algorithmique et la compétitivité. L'étude de ces deux points peut se faire au détriment de l'acquisition de connaissances généralisables. La méta-analyse pourrait permettre d'obtenir des connaissances indépendantes du problème et de l'implémentation en effectuant un examen statistique des résultats de plusieurs articles. Cette approche a été illustrée par l'étude de l'importance de la couche adaptative dans la recherche adaptative par grand voisinage (ALNS).

Sonia Cafieri (Laboratoire ENAC, Université de Toulouse) a présenté diverses applications qui ont été résolues avec succès par la programmation non-linéaire en nombre entiers (MINLP). Des résultats tels qu'une preuve numérique de l'optimalité d'une solution pour un problème de recouvrement en géométrie discrète ou encore l'élaboration de math-heuristiques pour le regroupement de réseaux ont été décrites.

La présentation suivante a été effectuée par Jannik Matuschke (Research Centre for Operations Management, KU Leuven). Il considère un problème d'ordonnement malléable dans lequel une tâche peut être effectuée simultanément par plusieurs machines. Ainsi, le temps d'exécution d'une tâche est une fonction f dépendant du nombre de machines qui lui sont affectées. Dans le cas de fonctions $1/f$ fractionnellement subadditives, il montre que des affectations robustes aux retards et augmentant faiblement le makespan peuvent être obtenues. Lorsque des fonctions sous-modulaires ou des fonctions vérifiant la propriété de substitués bruts sont considérées, des résultats d'approximation ont été présentés.

La matinée s'est terminée par une présentation de Samuel Fiorini. Il s'intéresse aux problèmes de suppression de sommets d'un graphe. Un algorithme d'approximation est proposé et une étude polyédrique permettant d'obtenir des résultats sur les bornes de la relaxation linéaire est décrite.



L'après-midi a débuté par une présentation de Nadia Brauner traitant de l'aide à l'enseignement de la recherche opérationnelle, notamment en distanciel. Un outil permettant d'évaluer automatiquement la modélisation d'un programme linéaire implémenté sur la plateforme d'apprentissage caseine.org a été présenté.

L'avant-dernier exposé de la journée a été effectué par François Clautiaux (IMB Université de Bordeaux) autour de liens entre la programmation mixte en nombres entiers et la programmation dynamique. Des inégalités valides ont été utilisées pour améliorer un algorithme de programmation dynamique pour un problème de sac-à-dos. Puis, dans un problème de routage de véhicules, la programmation dynamique a été utilisée pour renforcer une formulation MIP.

Daniele Catanzaro a donné le dernier exposé de la journée sur le suivi de l'évolution du SARS-Cov2, durant la pandémie COVID19, grâce au problème d'évolution minimale équilibrée. Des caractéristiques fondamentales du polytope du problème considéré sont présentées et des inégalités en définissant des facettes sont identifiées, amenant à la définition d'un algorithme branch-and-cut massivement parallèle.



ActuROAD

ROADEF/EURO Challenge 2020

Grid operation-based outage maintenance planning

Quelques nouvelles du challenge ROADEF/EURO porté par RTE pour l'édition 2020.

Le challenge a été officiellement lancé en février 2020 lors de la conférence ROADEF à Montpellier. Une première étape (le sprint) a permis à 23 équipes de s'affronter sur des petites et moyennes instances fournies par RTE.

Pour l'étape suivante, ce sont finalement 74 équipes qui se sont inscrites, 31 juniors et 43 seniors et qui se sont affrontées pour la phase de qualification sur des instances plus difficiles. Le challenge renforce son positionnement international avec une grande diversité géographique des équipes en compétition : 27 pays différents dont 9 équipes indiennes et 3 équipes russes, première participation pour ces deux pays. À l'issue de cette phase de qualification, 22 équipes ont été retenues pour la phase finale. Celle-ci s'est déroulée en deux temps : une demi-finale qui a permis de sélectionner 13 équipes, les résultats ont été annoncés lors de la conférence ROADEF 2021 et une phase finale au cours de laquelle les finalistes se sont affrontés sur un nouveau jeu de données encore plus difficile. L'annonce des vainqueurs de la phase finale a été faite lors de la conférence EURO en juillet 2021 à Athènes.

Les vainqueurs de cette édition sont Mirsad Buljubasic et Michel Vasquez de l'IMT Mines Alès (France). Félicitations à eux !

Pour cette édition portée par RTE, une enveloppe de 60K€ a été offerte pour l'ensemble des prix dont 10K€ pour la meilleure équipe junior, 10K€ la meilleure équipe de la compétition et un bonus de 20K€ pour le prix open source.

Comme pour l'édition précédente, un prix scientifique est également lancé. Ce prix sera décerné sur la base d'une part, d'un arbitrage sur article et d'autre part, sur la qualité des solutions obtenues lors de la phase finale. Seuls les demi-finalistes de la compétition peuvent candidater. L'évaluation sera menée par un jury présidé par Christian Artigues. Toutes les modalités de participation sont fournies sur le site web du challenge. La date limite de soumission est fixée au 1^{er} novembre 2021. Le prix sera décerné lors la conférence ROADEF 2022 à Lyon. Un numéro spécial dédié au challenge dans la revue internationale *Journal of Heuristics* sera également proposé.

Tous les résultats et informations sont accessibles sur le site du challenge en suivant le lien : <http://challenge.roadef.org/2020/en>

L'équipe challenge ROADEF : Éric Bourreau (LIRMM), Safia Kedad-Sidhoum (CNAM), Éric Pinson (UCO) et David Savourey (HeuDiaSyC).

L'équipe challenge pour RTE : Manuel Ruiz, Pascal Tournebise et Patrick Panciatici.





31st European Conference
On **Operational Research**

Best Senior Team (10 000€)
+ OpenSource (20 000€) !!!

Best Sprint (5K€), Best Qualif (5K€), Best Semi-final (5K€)

S34
Michel Vasquez & Mirsad Buljubasic
IMT Mines Alès
France




Prix du Master 2020



Ce prix, organisé par la ROADEF chaque année depuis 2016, a pour but de mettre en valeur la recherche des étudiants de master consacrée aux questions de Recherche Opérationnelle (RO) et d'Aide à la Décision (AD). Il permet également de faire connaître les formations dans nos disciplines et de favoriser les liens entre la ROADEF, les masters de RO/AD et l'industrie.

L'édition 2020 concernait les mémoires de master réalisés au cours de l'année universitaire 2019-2020 par des étudiants inscrits dans un établissement français ou ayant réalisé leur stage en France. Le prix est attribué individuellement à l'étudiant auteur du mémoire de master.

Nous avons reçu 12 candidatures, parmi lesquelles 6 ont été sélectionnées comme finalistes.

Le prix a été attribué conjointement à deux co-lauréats :

Martin Durand, étudiant du master ANDROÏDE de Sorbonne Université, pour son mémoire intitulé « Étude de deux règles d'agrégation de préférences fondées sur les choix sur les sous-ensembles d'alternatives, du point de vue de la rationalité et de l'algorithmique », réalisé au sein du LIP6.

Quentin Jacquet, étudiant de l'ENSTA ParisTech et du master MPRO, pour son mémoire intitulé « Optimisation de la planification des maintenances dans les ouvrages hydrauliques », réalisé au sein de l'équipe OSIRIS d'EDF.

Le jury a été impressionné par la qualité du travail réalisé dans des conditions souvent compliquées à cause de la pandémie. Nous avons particulièrement apprécié le contenu scientifique du travail, la capacité à le présenter avec pédagogie et le degré de maîtrise du sujet qui est apparu dans les réponses aux questions.

Pour cette édition, le jury était constitué de :

- Lyes Benyoucef, Université Aix-Marseille,
- Diego Cattaruzza, Centrale Lille,
- Sophie Demasse, Mines ParisTech,
- Rosa Figueirido, Université d'Avignon,
- Céline Gicquel, Université Paris Saclay,
- Meltem Oztürk, Université Paris Dauphine,
- Alexandre Marié, Artelys,
- Quentin Viaud, Saint-Gobain.



Martin Durand



Quentin Jacquet

Toutes nos félicitations à ces deux étudiants !

La ROADEF remercie vivement le jury pour son implication et son aide précieuse dans le bon déroulement de la compétition.

Pour le bureau de la ROADEF,
Céline Gicquel

Toutes les infos sur www.roadef.org

Derniers et prochains événements soutenus et sponsorisés par la ROADEF

Dataquitaire, **Bordeaux** (Février 2021)

IEEE CASE 21, **Lyon** (Aout 2021)

EUROPT (du 7 au 9 juillet 2021)

Conférence NAIA.R 2021, **Bordeaux** (du 9 au 11 décembre 2021)

JFRO 42 (Septembre 2021)



citROnnADe Mots-cROisés



Par Bruno Escoffier

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														

VERTICALEMENT

- A. Difficile mais dans la classe. Provenant.
- B. Décida. Tchéco-Canadien célèbre aussi bien en graphes qu'en PL.
- C. Pourvoyeur d'ERC. Constituant d'un graphe, mais dans le désordre. Retranche.
- D. Ex-MCF en abrégé. Sujet qui nous rassemble. A valu à Arora le premier de ses deux prix Gödel.
- E. Note. Nombreux dans l'espace. Note.
- F. Astate ou triplet astéroïdien, selon les spécialités. Mesurai à l'envers.
- G. Paramètre anglais lié aux cycles. Souvent interdit chez Seymour et consorts.
- H. Partie de Séoul. Fabrique à glands.
- I. Evaluas. Voleuse.
- J. Pro de la puce. Père fondateur.
- K. Réfléchi. Moins contraint. Terminaison.
- L. Collines du côté du CRIL, à l'envers. École doctorale.
- M. Courant en optimisation stochastique. A un caractère complètement binaire de bas en haut.
- N. Pied de vigne. Une quinzaine dans le GDR-RO. Type anglais, de bas en haut.

HORIZONTALEMENT

- 1. Stable chez Shapley. De rang A chez nos confrères du calcul algébrique.
- 2. Souvent associé à notre recherche.
- 3. Machine de Turing pour les intimes. À l'envers : 3/2-approché chez Christofides. Forme nos élites politiciennes.
- 4. Tel le biparti ou le cordal. Impossible à décider, de droite à gauche.
- 5. Cherchas une borne à l'envers.
- 6. Sont complémentaires. Bon à recycler. Tel un programme résolvant un problème NP-complet.
- 7. Ex conjecture. À l'envers : utile en programmation dynamique.
- 8. Cale de mécanicien. Ardu. Conjonction.
- 9. Sujet à la mode. Ajout à la fin. Venu au monde. Leur représentation peut être délicate.
- 10. On aimerait y aller plus souvent. Inutile pour Dieu selon Albert. Transcendant. Associé à chaque publication.
- 11. Schéma inversé. Mal conçue quand elle est à gaz. Club rhodanien.
- 12. Unité du processeur, désordonnée. Permet une recherche efficace quand il est équilibré. De droite à gauche : Oulipien amateur d'une certaine forme de perfection.

La solution de ce jeu sera disponible à partir du 03 janvier 2022, à l'adresse <http://www-desir.lip6.fr/~escoffier/bulletin/solution.pdf>

Solution Énigme des prisonniers (Bulletin OnTheROAD 42)

D'après Denis Cornaz

Repérons les cases de l'échiquier par un couple (i,j) d'entiers naturels, ainsi au départ les cases occupées par les prisonniers sont (0,0), (1,0) et (0,1). Attribuons le poids 2^{i+j} à la case (i,j) de l'échiquier, et disons que le poids d'une configuration est la somme des poids des cases occupées par un prisonnier. Ainsi le poids de la configuration de départ est 2, et le poids total

de l'échiquier est au-plus 4 (le poids de la première ligne est au-plus 2, celui de la seconde ligne est au-plus 1, celui de la troisième ligne est au-plus 1/2, etc.). Mais en fait le poids de toute configuration reste 2 et une configuration n'occupant pas les cases (0,0), (1,0) et (0,1) a un poids strictement inférieur à 2.

Devenir (ou rester) membre de la ROADEF

Vous **ADOREZ** la ROADEF
et souhaitez soutenir des actions ?

Rejoignez-nous !

ADhérents un jour, ADhérent toujours ? Êtes-vous à jour ?

Bénéficiez d'un tarif préférentiel pour assister au congrès annuel, recevez la lettre d'information et bien sûr, « On the ROAD », prenez part aux décisions via votre vote (en AG ou à tout autre moment démocratique de la ROADEF), abonnez-vous à 4'OR à un tarif avantageux...

Suivez toute l'actu ROAD en France et au-delà : faites vivre la ROADEF !

- ▶ Adhésion « étudiant » : **15 €/an**
- ▶ Adhésion « individuelle » : **30 €/an**
- ▶ Adhésion « partenaire » (nombre illimité de membres et affichage logo) : **800 €/an**

Retrouvez toutes les infORmations sur votre prochaine (ré)ADhésion sur www.roadef.org.

ROADEF : LE BULLETIN

Bulletin de la société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision
Association de loi 1901

Procédure technique de soumission : contacter Brice Mayag (vpresident1@roadef.org).

Comité de rédaction : R. Bocquillon, F. Clautiaux, C. Gicquel, B. Mayag, S. U. Ngueveu, A. Nguyen, C. Prodhon.

Production du Bulletin : B. Mayag.

Ce numéro a été tiré à 400 exemplaires. Les bulletins sont disponibles sur le site de la ROADEF.

ADDINSOFT | DATA SCIENCE MADE SIMPLE

 **Air Liquide**
creative oxygen

amanora
technologies

 **Artelys**
OPTIMIZATION SOLUTIONS

le **cnam**

 **DecisionBrain**
OPTIMIZATION FOR THE INTELLIGENT ENTERPRISE

 **edf**

 **EURODECISION**
ALGORITHMS FOR BUSINESS

 **G-SCOP**
SCIENCES POUR LA CONCEPTION, L'OPTIMISATION ET LA PRODUCTION

 **GUROBI**
OPTIMIZATION | PREMIER PARTNER

 **HUAWEI**

 **heudiasyc**

LAAS
CNRS

LAMSADE
UMR CNRS 7243
laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision

LIFA EA 63 00
LE LABORATOIRE D'INFORMATIQUE FONDAMENTALE ET APPLIQUÉE DE TROYES

LIMOS
0101010101010101

Lip6

 **LocalSolver**

 **orange™**

SIAPARTNERS

SNCF

 **TotalEnergies**

 **UNIVERSITÉ DE NANTES**

 **utt**
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE TROYES

Toute l'actualité de la ROADEF et de ses partenaires se trouve sur Facebook, Twitter et LinkedIn



ROADEF

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE ET D'AIDE À LA DÉCISION