

« ON THE ROAD » !

UN PEU DE ROADÉF
POUR LA ROUTE

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



 REPORTAGE

.....
SNCF Direction de la Recherche
(p. 2)

ROADÉF

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



▶▶▶
DÉCEMBRE
2024

ROADEF

ON THE ROAD

éditORial

par Nabil Absi



Une communauté en plein essor et des défis toujours plus stimulants

Chers membres de la communauté ROADEF,

L'année 2024 s'achève sur une dynamique forte pour notre communauté, qui ne cesse de croître. Le nombre d'adhérents et de participants à notre congrès annuel continue d'augmenter, preuve du dynamisme et de l'attractivité de notre discipline. Un grand merci à nos collègues d'Amiens pour leur accueil chaleureux et l'organisation réussie du congrès en 2024 ! Vous trouverez dans ce numéro un retour détaillé de cette édition présenté par Corinne Lucet.

Le bureau poursuit activement sa mission de promotion de la recherche opérationnelle en soutenant les événements scientifiques portés par nos membres et en mettant en œuvre des actions adaptées aux attentes de la communauté. L'année 2024 a ainsi vu l'aboutissement de plusieurs initiatives (négociation avec l'éditeur de 4OR, modernisation des outils et services numériques de l'association, etc.). Un rapport d'activité détaillant ces avancées sera adressé aux adhérents et présenté lors de notre assemblée générale ordinaire lors du prochain

congrès ROADEF à Marne-la-Vallée (le 27 février 2025 à 17h00), un moment clé d'échange et de partage auquel nous vous invitons chaleureusement à participer.

L'année écoulée a une fois de plus démontré l'importance de la recherche opérationnelle pour répondre aux défis contemporains. Que ce soit dans la planification ferroviaire, l'optimisation logistique ou la transition énergétique, nos outils et méthodologies sont au cœur des décisions stratégiques et permettent de mieux allouer les ressources disponibles.

Dans le secteur ferroviaire, la SNCF met en avant l'impact des outils d'optimisation sur l'exploitation des réseaux dans la rubrique « repORtage ». Les projets « ROC TRI », consacré à l'optimisation des triages de FRET SNCF, et « OPTIPLACE », portant sur l'affectation optimale des sièges dans les trains OUIGO, montrent comment la RO contribue à une gestion plus efficace et améliore l'expérience des voyageurs.

La transition énergétique est un autre axe fort de ce bulletin. Dans la rubrique « rADicalement ROAD », les entreprises Lhyfe et Persee partagent leurs travaux sur l'optimisation des infrastructures hydrogène, en particulier pour

la production, le stockage et la logistique. Ces recherches illustrent le rôle clé de la RO dans l'essor d'une filière énergétique plus durable.

Côté technologies émergentes, la rubrique « Hors-les-murs » explore le développement des jumeaux numériques, dont l'application en simulation et optimisation transforme déjà des secteurs comme l'industrie, les transports et la gestion des infrastructures.

Enfin, vous retrouverez dans les autres pages de ce bulletin toute l'actualité de la ROADEF : prix du Master, événements parrainés, mais aussi des nouvelles du GDR ROD, des JFRO et du Challenge ROADEF/EURO. Et comme toujours, une nouvelle énigme pour mettre à l'épreuve votre esprit logique !

Le bureau de la ROADEF remercie chaleureusement tous les contributeurs, reste à l'écoute de vos propositions et vous adresse ses meilleurs vœux pour une excellente année 2025.

Bonne lecture et au plaisir de vous retrouver à Marne-la-Vallée !



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

ou individuellement à

Nabil Absi, president@roadef.org

Frédéric Meunier, secretaire@roadef.org

Amélie Lambert, tresorier@roadef.org

Nawal Benabbou, vpresident1@roadef.org (bulletin)

Sohaib Afifi, vpresident2@roadef.org (site web)

Olivier Péton, vpresident3@roadef.org (relations extérieures)

Cécile Rottner, promotion_road@roadef.org (communication)

Nancy Perrot, nancy.perrot@orange.com (promotion de la RO/AD)

Maxime Ogier, maxime.ogier@centralelille.fr (Chargé des prix)

Sommaire

2 repORtage SNCF Direction de la Recherche p.2	17 Vie du GDR ROD Christian Artigues, Nadia Brauner et Pierre Fouilhoux p.17	25 ActuROAD Prix du Master 2023 p.23 Challenge ROADEF/EURO p.24 Derniers événements soutenus par la roadef p.24
6 rADicalement ROAD Lhyfe p.6 Persee p.9	20 Bilan Congrès de la ROADEF p.20	25 citROnnADe p.25
13 hORs-les-murs Les Jumeaux Numériques p.13	22 Compte-rendu des JFRO p.22	

repORtage

SNCF Direction de la Recherche

Par Rémy Chevrier, David de Almeida, Christelle Lérin, Juliette Pouzet, Valentina Pozzoli



Le groupe SNCF

Avec 283 000 collaborateurs dans plus de 60 pays, le groupe SNCF offre des solutions de mobilité bas carbone, de transport de voyageurs et de marchandises en France et à l'international. Pour ce faire, le groupe SNCF s'organise autour d'une société mère, SNCF SA (holding), de ses SA SNCF Voyageurs, SNCF Réseau, SNCF Gares & Connexions, Rail Logistics Europe et des sociétés Keolis et GEODIS. Présent ainsi dans 60 pays dans le monde, le groupe SNCF réalise un chiffre d'affaires de 41,8 milliards d'euros dont un tiers à l'international via les activités de ses filiales spécialisées dans trois métiers : le transport de voyageurs à grande vitesse (Eurostar, TGV Lyria, etc) ; le mass transit (Keolis) ; le transport de marchandises (Rail Logistics Europe, GEODIS). SNCF est ainsi leader de la grande vitesse en Europe, opérateur du deuxième réseau ferroviaire au monde et leader du mass transit.

En France, sur le réseau ferré national exploité par SNCF Réseau circulent quotidiennement 15 000 trains dont près de la moitié sur le réseau dense de l'Île-de-France. En volume de voyageurs, cela représente 4,5 millions de voyageurs transportés par SNCF Voyageurs (Transilien, TER, inOui, ouiGO, InterCités) chaque jour.

Relever ainsi ces défis tous les jours requiert une performance opérationnelle et une optimisation de tous les processus dans lesquels la Recherche Opérationnelle et l'Aide à la Décision jouent un rôle majeur.

La RO à la SNCF et ses enjeux

La Direction Technologies, Innovation et Projets Groupe

Au sein de SNCF SA, la Direction Technologies, Innovation et Projets Groupe a pour mission d'explorer les technologies émergentes et futures qui feront le train de demain plus attractif et plus compétitif et répondant aux grands enjeux environnementaux et de mobilité, avec notamment l'objectif de dou-

blement de la part modale du ferroviaire d'ici à 10 ans. Travaillant sur un panorama très large de disciplines scientifiques (IA, digital, robotique, matériaux, sciences comportementales, ...), les équipes du programme Research4Future dirigé par David de Almeida détectent les nouvelles technologies et connaissances, et préparent les compétences techniques pour leur passage en contexte opérationnel. Au sein de ce programme, l'équipe Modélisation et Optimisation de la Décision (MOD) a développé depuis de nombreuses années une expertise autour de l'optimisation mathématique appliquée à des problèmes d'exploitation ferroviaire. Assumant un double rôle consistant d'une part à répondre aux demandes du métier en prise avec des problèmes opérationnels complexes pour lesquels il faut améliorer les performances du système, et d'autre part à anticiper les technologies qui amélioreront ou révolutionneront l'optimisation comme le calcul quantique, l'équipe MOD travaille indifféremment avec les entités opérationnelles du groupe SNCF, en particulier Voyageurs, Réseau, FRET. Les sujets traités vont ainsi de la construction du plan de transport avec la planification des ressources (horaires, matériels roulants, agents) jusqu'à la gestion opérationnelle des circulations en temps réel.

Au sein du groupe SNCF, d'autres équipes travaillent sur des sujets d'optimisation et de RO, toutefois avec une visée applicative à plus court terme, tandis que l'équipe MOD travaille sur des sujets à plus long cours qui nécessitent un investissement en recherche, souvent effectué avec des équipes académiques autour de thèses de doctorat. Pour faciliter la mise en relation des experts de la RO et animer cette communauté, la responsable du groupe MOD pilote également le cluster Optimisation des Ressources de l'Entreprise (ORE) qui réunit l'ensemble des experts en RO et optimisation appliquées principalement à des problèmes d'exploitation ferroviaire mais aussi à des sujets plus larges de mobilités.

Les grands enjeux

Forts de ces compétences en RO et optimisation, les experts de SNCF contribuent aux grands enjeux de mobilité et de transport des voyageurs et des marchandises et à l'ambition du « faire fois 2 » pour le ferroviaire (avoir doublé la part modale du fret en

2030 et augmenté très fortement le volume de voyageurs transportés pour réussir à doubler la part des voyageurs en train durant la décennie 2030).

Une planification robuste et optimisée - Parvenir à faire circuler 15 000 trains quotidiens sur le réseau ferré en sécurité et en régularité¹ nécessite d'avoir au préalable construit un plan de transport robuste pour absorber les flux de voyageurs et de marchandises ainsi que les aléas potentiels. Il s'agit de programmer la circulation des trains sur les infrastructures ferroviaires (voies, gares, nœuds ferroviaires, gares de triage, ...) mais aussi de planifier l'ensemble des ressources qui concourent à la circulation des trains, des matériels roulants aux ressources humaines de conduite et d'accompagnement. Ce sont des processus complexes, très consommateurs de temps lorsqu'effectués manuellement, et qui se prêtent particulièrement bien aux algorithmes de recherche opérationnelle.

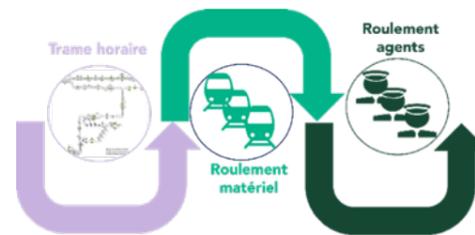


Figure 1 : La planification du plan de transport

L'équipe MOD réalise de nombreux travaux dans ce domaine, et un certain nombre de prototypes ont été industrialisés. Le projet ROC TRI réalisé pour Fret SNCF et décrit dans l'article en est l'un des exemples.

La planification à la SNCF touche bien sûr beaucoup d'autres domaines : conception des infrastructures, planification des travaux sur les voies, planification des opérations de maintenance du matériel roulant, ... sur lesquels les équipes de RO œuvrent également activement. Mais elle concerne aussi d'autres domaines connexes, comme par exemple l'attribution des sièges aux voyageurs, qui est illustrée par le deuxième projet présenté dans cet article (projet OPTIPLACE).

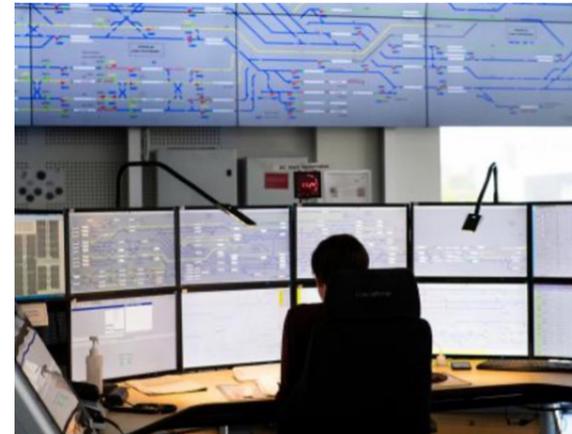


Figure 2 : Un centre opérationnel de gestion des circulations



Figure 3 : Véhicule rail-route Flexy

Aide à l'exploitation en temps réel - Même si les plans de transport sont conçus et optimisés en intégrant des marges de régularité, des incidents de circulation peuvent avoir des répercussions très fortes sur l'ensemble du trafic. Pour éviter cela ou à minima limiter les perturbations, l'équipe MOD travaille sur des prototypes d'outils d'aide à l'exploitation en temps réel, pour aider les agents SNCF à superviser la réalisation du plan de transport, l'adapter pour amoindrir les effets des perturbations et mieux informer les clients. En particulier, l'un de ces prototypes, basé sur un moteur de simulation macroscopique des circulations développé en interne, projette l'avancement des trains en tenant compte de leurs retards potentiels et des aléas qui surviennent, et prédit les horaires d'arrivée des trains à leurs dessertes futures. Après plusieurs expérimentations réussies, ce prototype fait à présent l'objet d'un projet d'industrialisation pour introduction de la fonction de prédiction des retards dans le système d'information existant.

Nouveaux systèmes de mobilité - En complément du train, SNCF conçoit de nouvelles offres de mobilités pour répondre à des besoins spécifiques de certains territoires en utilisant des matériels adaptés. Dans les zones peu denses, notamment à la campagne, SNCF prévoit de déployer un train léger, DRAISY, pour les petites lignes ferroviaires avec peu de flux voyageurs. Sur les petites lignes en voie d'abandon, SNCF propose d'exploiter FLEXY, un engin rail-route qui peut passer de la route au rail et inversement pour redonner vie à ces petites lignes. SNCF propose également des services innovants de transport à la demande routier (JYVAIS, MaCourse). Par ailleurs, sur les anciennes emprises ferroviaires reconverties, SNCF conçoit des services de navettes autonomes en site propre (MASIPRO). Ces différents systèmes de mobilité reposant sur des flottes de véhicules, il est nécessaire d'optimiser les parcours et les dessertes des véhicules tout en gérant la demande voyageurs. Pour aider à la définition et au dimensionnement des différents services de mobilité, l'équipe MOD conçoit les algorithmes de gestion de la demande et de pilotage de flottes de véhicules en lien avec ses partenaires académiques.

Services Express Régionaux Métropolitains - Les besoins croissants de mobilité dans les grandes métropoles ainsi qu'une volonté d'inciter au report modal vers des modes plus vertueux impliquent de repenser les schémas de mobilité pour proposer une offre multimodale à même de répondre aux besoins de mobilité des voyageurs. Pensés autour d'une structure ferroviaire qui constitue leur épine dorsale, les SERM articulent un ensemble de modes (train, métro, tramway, BHNS, modes doux, mobilités actives) pour faciliter les rabattements vers des pôles

d'échanges multimodaux. Avec de meilleures fréquences, une offre plus diversifiée et une meilleure couverture territoriale, les SERM participent pleinement à la stratégie nationale bas carbone, qui prévoit une augmentation de la part modale du ferroviaire et des transports en commun urbains pour décarboner les déplacements du quotidien. Ils fournissent aussi de nouveaux challenges passionnants aux équipes de RO de la SNCF, qui s'ouvrent à l'intermodalité en œuvrant sur des projets portant sur l'aide à la conception des SERM et la supervision multimodale.

L'optimisation quantique

La SNCF fait face à nombreux problèmes d'optimisation où les ordinateurs classiques présentent des limites : il est souvent difficile de conjuguer temps de calcul acceptables et solutions de qualité, voire impossible de résoudre certains problèmes complexes hautement combinatoires. Le calcul quantique promet de franchir ces barrières et d'améliorer les résolutions existantes, voire d'ouvrir la porte à de nouvelles applications.

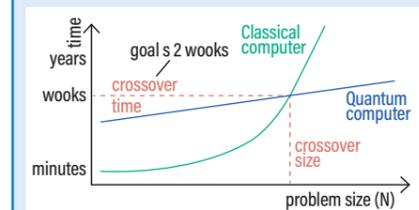


Figure 4 : Exemple d'évolution du temps de calcul pour un ordinateur classique et un ordinateur quantique en fonction de la taille du problème (source : Quantum 2042)

C'est pourquoi nous étudions depuis 4 ans les technologies quantiques et en particulier l'optimisation quantique. Bien qu'aujourd'hui les ordinateurs ne permettent pas de démontrer d'avantage quantique sur des instances industrielles, le potentiel disruptif de la technologie et les promesses d'amélioration des ordinateurs au cours des prochaines années justifient de s'y intéresser dès aujourd'hui. L'objectif est de préparer la SNCF à la technologie quantique, en répondant aux questions : pour quels problèmes ? À quelle échéance ? Avec quels types d'ordinateurs ?

Parmi les applications potentielles pour l'optimisation dans le domaine ferroviaire, nous avons par exemple identifié : l'optimisation de l'exploitation en temps réel, en prenant en compte des facteurs multiples (voyageurs, météo, etc.) ; l'optimisation du calcul de marche afin d'améliorer les performances énergétiques ; la résolution de problèmes intégrés (aujourd'hui traités séparément) comme la conception simultanée des acheminements et des roulements agents et matériels roulants.

Nos travaux se sont notamment centrés sur une thèse CIFRE en collaboration avec le LIRMM de l'Université de Montpellier. Nous avons étudié plusieurs reformulations d'un problème d'optimisation de la conception de plans de transport, et implémenté certaines de ces reformulations sur différents ordinateurs quantiques. Les méthodes heuristiques modélisées et testées retournent la bonne solution pour des instances de petites tailles, mais des instances de taille industrielle ne peuvent pas être traitées avec les machines qui sont à disposition aujourd'hui. À l'enjeu du choix de l'algorithme pour un problème donné s'ajoute le choix de la reformulation du problème en question, qui, selon nos analyses, peut influencer la qualité de la solution retournée et la taille de l'instance qu'il est possible de tester.

Les travaux menés nous ont procuré une vision claire de l'état actuel de la technologie, ainsi que des perspectives pour les prochaines années. La technologie évoluant rapidement, nous poursuivons nos actions pour préparer la SNCF aux premières applications industrielles.

¹ Au premier semestre 2024, 80% des trains sont arrivés à l'heure ou avec moins de 5mn de retard

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'exploitation ferroviaire est un champ majeur d'investigation et d'application pour la recherche opérationnelle, qui est ainsi un levier fort pour l'ambition de développement x2 de la part modale du ferroviaire. Le domaine de la planification, travaillé depuis de nombreuses années, a déjà pu donner lieu à des issues industrielles pour certains des prototypes développés, même si ce champ d'investigation est loin d'être clos. L'aide à l'exploitation temps réel reste un défi, et nous ouvre de nouveaux champs scientifiques d'exploration comme le couplage RO-IA, que nous travaillons aujourd'hui avec nos partenaires académiques dans le cadre d'un projet franco-allemand. C'est aussi l'un des terrains de jeu du programme de recherche européen Europe's Rail, où nous œuvrons aux côtés de nos partenaires européens et académiques au futur de la gestion opérationnelle du trafic.

Zooms sur 2 projets

ROC TRI : les modèles mathématiques au service des triages de FRET SNCF

Dans le fret ferroviaire, les gares de triage sont les nœuds par excellence par lesquels transitent les plus gros flux de marchandises. Elles permettent de réorganiser les trains de « wagons isolés » (i.e. groupes de wagons empruntant plusieurs trains successifs, mutualisés avec des wagons d'autres clients).

Chaque année et pour chaque gare, une dizaine d'experts se mobilisent pendant plusieurs semaines pour définir une semaine type décrivant les « tâches machines » à effectuer par les engins moteurs et le nombre de journées de service que cela implique en termes de « tâches humaines » à effectuer par les agents au sol. La semaine type construite annuellement est alors déployée sur l'année, et adaptée chaque semaine par les triagistes pour correspondre aux trains qui circulent chaque semaine.

Afin d'optimiser et d'automatiser la gestion des gares de triage, la Direction FRET SNCF a lancé en 2020 le projet ROC TRI (Recherche opérationnelle en conception pour les triages) avec la Direction Technologies Innovation & Projets Groupe.

Une gare de triage est décrite par trois chantiers (voir Figure 1) qui permettent d'effectuer les correspondances de chaque wagon. On distingue :

- Le Chantier Réception sur lequel les trains arrivent et où les wagons vont être séparés pour être poussés sur la Bosse (i.e. débranchés) par la « machine de débranchement »,

- Le Chantier Formation sur lequel les wagons vont tomber un à un avant d'être rapprochés et raccordés (i.e. formés) par la « machine de formation »,

- Le Chantier Départ sur lequel les trains vont être déplacés du Chantier Formation au Chantier Départ (i.e. dégarés) par la « machine de dégarage » pour ensuite être préparés et repartir.

Sur chacun des chantiers, des tâches humaines doivent être réalisées par des « roulements d'agents » (i.e. groupes d'agents ayant les mêmes compétences et cycles horaires). La complexité d'optimiser ces tâches machines et humaines réside dans les particularités suivantes :

Les tâches sont liées les unes aux autres par des liens de précedence et de parallélisation.

Pour chaque machine, une seule tâche peut être réalisée à la fois.

Les tâches humaines sont de durées courtes, allant jusqu'à la minute.

Certains agents peuvent se déplacer entre les chantiers avec un temps de repositionnement associé.

En raison de l'unicité de chaque type d'engin, les tâches machines deviennent de véritables goulots d'étranglement opérationnels. C'est pourquoi l'équipe MOD a proposé un outil d'optimisation sous forme de deux phases successives : la première pour les tâches machines et la seconde pour les tâches humaines.

La première phase a été modélisée par un PLNE dont l'objectif est de définir les horaires optimaux des tâches machines, en respectant les contraintes structurelles et

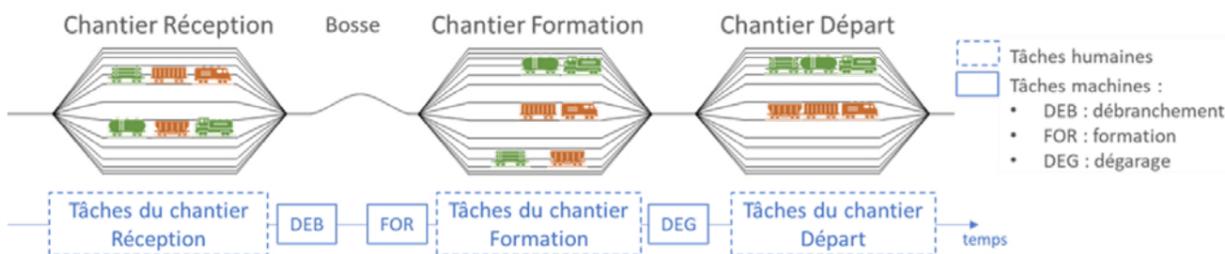


Figure 6 : Tâches machines et humaines en gare de triage

temporelles, notamment en prenant déjà en compte les cycles horaires des roulements d'agents.

La seconde phase est également modélisée par un PLNE dont l'objectif est de minimiser le nombre de journées de service en horarisant et en affectant les tâches humaines à des roulements d'agents. L'un des aspects les plus difficiles à prendre en compte sans trop complexifier le modèle est le repositionnement nécessaire lorsque deux tâches de chantiers différents sont à enchaîner. La modélisation a donc été revue plusieurs fois au cours du projet.

Le prototype ainsi développé permet de définir en quelques minutes les horaires de mouvements au sein d'un triage afin que toutes les correspondances des wagons soient assurées dans les temps requis. Une heuristique a été également ajoutée pour décrire l'occupation des voies pour optimiser l'exploitation.

Si ROC TRI apporte une aide précieuse aux planificateurs, en leur permettant d'économiser des mois de travail pour établir les semaines type des gares de triage, il permet également de dimensionner les infrastructures de triage aux niveaux de trafic attendus. Pour exemple, Fret SNCF s'est appuyé sur ROC TRI pour traduire en besoins d'infrastructures les hypothèses de développement des trafics sur le triage de Miramas. Ce dernier a pu bénéficier d'un investissement exceptionnel de la part de l'Etat, des collectivités et de SNCF Réseau pour faire peau neuve.

OPTIPLACE : la RO pour optimiser le remplissage des trains et le confort des voyageurs

Pour les trains à réservation obligatoire, le siège assigné à chaque voyageur peut avoir un impact sur la qualité du remplissage, avec des enjeux économiques, de satisfaction clients et opérationnels. En effet, le choix du siège a des conséquences sur le nombre et type de trajets restant disponibles à la vente, l'homogénéité du remplissage entre les voitures, la satisfaction des préférences opérationnelles (telles que la montée ou la descente à certaines voitures à certaines gares), le positionnement côte à côte des voyageurs ayant réservé ensemble.

OUIGO opère environ 50 trains à grande vitesse par jour, avec un taux d'occupation moyen de 90%. Dans le mode de réservation standard de OUIGO, le numéro de siège est communiqué aux clients quelques jours avant le départ du train, et non pas au moment de la réservation du billet : cela représente une opportunité pour affecter simultanément et de façon optimisée les voyageurs aux sièges.

La Direction de la Recherche a développé un algorithme d'optimisation multicritères pour l'affectation des voyageurs aux sièges. Cet algorithme permet de maximiser le nombre de trajets qui restent disponibles à la vente entre le moment où le numéro du siège est communiqué au voyageur et la date de départ du train, ainsi que d'homogénéiser les taux d'occupation des voitures et le nombre de montées et descentes par voiture à chaque gare, ce qui permet d'assurer le respect du temps de desserte. Il permet également de placer à côté les voyageurs au sein d'une même réservation, et en particulier les familles.

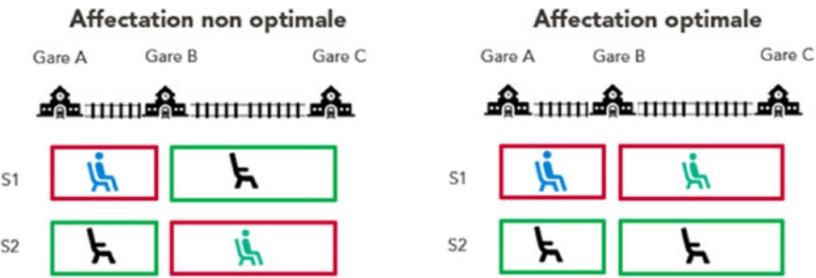
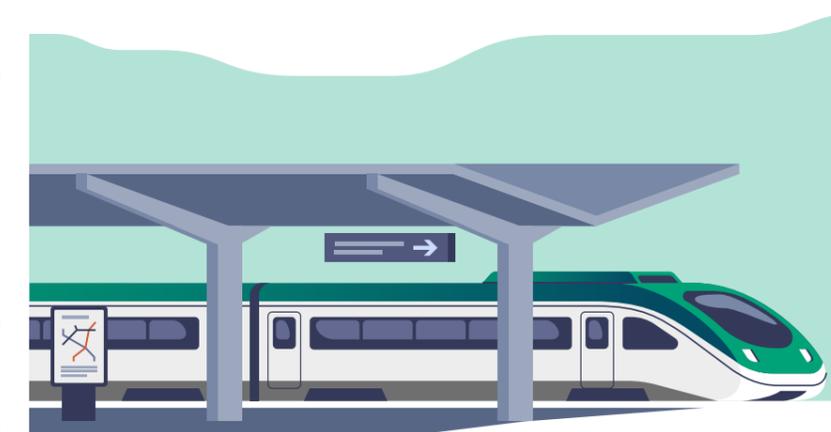


Figure 7 : illustration d'affectation de sièges non optimale vs optimale

Le problème a été formulé sous forme de Programme Linéaire en Nombre Entier. Le paramétrage des critères d'optimisation est différent selon le taux de remplissage du train au moment de la communication du numéro des sièges : si le train est très rempli, le critère de remplissage sera favorisé, afin de libérer un maximum de sièges ; si le train est moins rempli, les critères de confort et de préférences opérationnelles seront privilégiés. Un travail a été effectué afin de réduire le temps de calcul de l'algorithme, tout en se rapprochant le plus possible de la solution optimale.

Les gains procurés par l'algorithme sont très significatifs. L'algorithme permet de remettre en vente en moyenne 10 sièges par train par rapport à la solution d'affectation existante (solution du marché), tout en optimisant les autres critères objectifs. En particulier, sur aucun de nos cas de test l'algorithme n'a séparé des voyageurs avec enfants. Les autres critères ont bénéficié d'une amélioration entre 50% et 80%.

Après les phases de modélisation et de tests sur des données historiques puis une phase de marche à blanc, l'algorithme a été industrialisé et mis en production à l'été 2024. Et c'est un beau succès : les premiers retours d'expérience confirment et vont même au-delà des gains estimés pendant la phase recherche.



rADicalement ROAD

Lhyfe :

La recherche opérationnelle pour un industriel de l'hydrogène vert

Par Victor Spitzer et François Sanson

Lhyfe

LHYFE : ACTEUR D'UNE INDUSTRIE ENGAGÉE

Les rapports successifs du GIEC alarment sur l'implication des activités humaines dans les bouleversements actuels et futurs du climat : la combustion de sources d'énergie fossile doit être drastiquement réduite dans les années qui viennent afin de limiter l'emballement. En plus d'efforts de sobriété, des solutions alternatives aux énergies fossiles doivent être mises en place à grande échelle pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Parmi celles-ci l'utilisation d'hydrogène vert, un vecteur d'énergie produit à partir d'électricité verte, est identifiée comme une technologie prometteuse pour décarboner l'industrie et les transports. L'hydrogène est un composant incontournable dans certaines industries critiques telles que la sidérurgie ou la production d'ammoniac. Il a également un potentiel d'utilisation comme carburant propre émettant une quantité négligeable de CO2 lors de sa consommation, notamment pour la mobilité lourde. Celui-ci est aujourd'hui produit majoritairement à

partir d'énergies fossiles (gaz ou charbon) par des procédés fortement polluants. Il est toutefois possible de produire un hydrogène de manière décarbonée par électrolyse de l'eau, lorsque ce procédé est alimenté par des sources d'énergie propres. Il est anticipé que la production et l'usage de cet hydrogène vert s'accroissent durablement dans les années et décennies à venir, comme en témoigne la stratégie pour le développement d'une industrie de l'hydrogène décarboné mise en place à l'échelle nationale¹ et européenne². C'est dans ce contexte qu'a été créée en 2017 l'entreprise Lhyfe. Aujourd'hui forte d'environ 200 collaborateurs dans 12 pays, celle-ci déploie et opère des sites de production pour fournir à ses clients un hydrogène vert en quantités industrielles permettant la décarbonation de pans entiers de l'industrie et de la mobilité. Un premier site de production est en opération depuis 2021 et deux autres ont été inaugurés en 2023. D'autres encore sont aujourd'hui en construction ou en phase de projet avancé. L'entreprise souhaite passer à l'échelle au rythme du développement de la filière et se donne pour mission de décarboner les usages maintenant et autant que possible. L'innovation joue un rôle crucial dans ce secteur d'activité naissant. Ainsi depuis ses débuts, l'en-

treprise lui accorde des efforts sans réserve. Le site industriel de production d'hydrogène vert de Bouin fut une première européenne, et le premier au monde à être directement relié à une ferme éolienne (Figure 1). De même, le pilote de production d'hydrogène en mer Sealhyfe, déployé par l'entreprise en collaboration avec Centrale Nantes, est une première mondiale et une preuve par son succès de la possibilité d'une production *Offshore* (Figure 2). Cette culture de l'innovation se décline sous d'autres formes ; c'est par exemple le cas avec des partenariats de recherche sur la réoxygénation des océans, grâce à la coproduction d'oxygène issue de l'électrolyse en mer. C'est également le cas par le développement de solutions numériques novatrices pour l'analyse et l'amélioration des performances à chaque étape du déploiement et de l'opération des sites de production. Ces solutions sont d'une importance cruciale : pour des raisons de coûts bien sûr, mais aussi puisque l'écologie se place au cœur des enjeux. En raison de leur intermittence, le manque à produire à partir d'énergies renouvelables est significatif dans le cas d'une planification insuffisante. Plus généralement, minimiser les coûts de production contribue à rendre viable l'hydrogène décarboné comme alternative à des énergies polluantes.

¹ <https://presse.economie.gouv.fr/02022023-dossier-de-presse-acceler-le-deploiement-de-lhydrogene-cle-de-voute-de-la-decarbonation-de-lindustrie/>

² https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

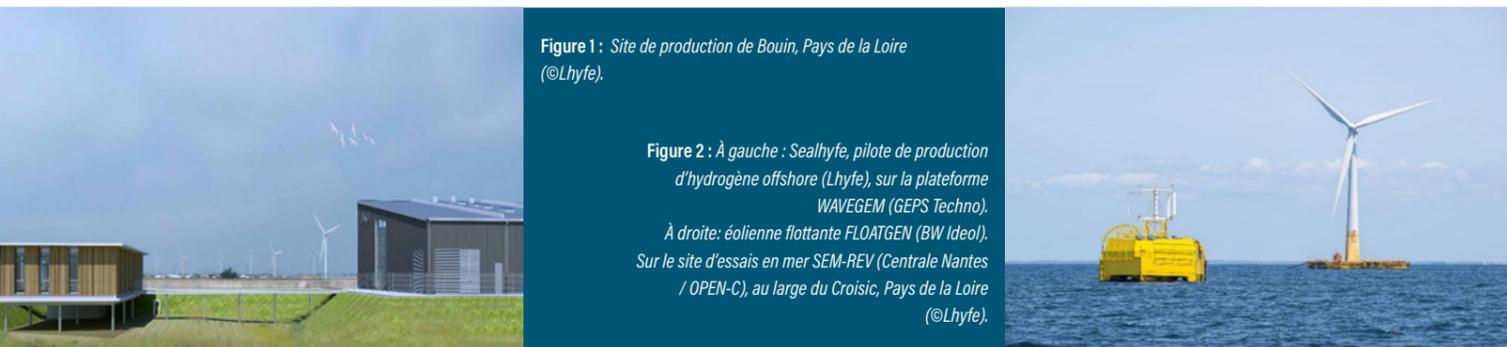


Figure 1 : Site de production de Bouin, Pays de la Loire (©Lhyfe).

Figure 2 : À gauche : Sealhyfe, pilote de production d'hydrogène offshore (Lhyfe), sur la plateforme WAVEGEM (GEPS Techno). À droite: éolienne flottante FLOATGEN (BW Ideol). Sur le site d'essais en mer SEM-REV (Centrale Nantes / OPEN-C), au large du Croisic, Pays de la Loire (©Lhyfe).

Chez Lhyfe, une équipe de cinq ingénieurs et chercheurs est dédiée aux problématiques de simulation, d'analyse de données et d'optimisation. Elle produit des études détaillées en appui aux décisions, et développe des outils à destination de nombreux acteurs internes : chefs de projet, opérateurs de site industriel, experts techniques, responsables logistiques... La variété et la complexité des sujets requiert une innovation stratégique et ambitieuse, y compris en optimisation.

DES ENJEUX MULTIPLES

Après des milliers d'heures de production industrielle depuis 2021, Lhyfe a identifié des problématiques incontournables. Celles-ci se situent à chaque étape de la chaîne de décision aboutissant à la production d'hydrogène vert, du développement de projets jusqu'à l'opération de sites industriels. Cela concerne :

- Le dimensionnement du site de production
- La planification de production
- L'organisation de la chaîne logistique

Un tel enchaînement représente une véritable cascade de décisions : à chaque nouvelle étape du développement puis de l'opération d'un site, l'horizon de planification se réduit et prend en considération les choix précédents. Cela donne lieu à une série de problèmes d'optimisation à différentes échelles de temps et dont le couplage, bien que bénéfique, est source de complexité. Les premières décisions prises lors du développement d'un projet correspondent au dimensionnement du site de production, en particulier le nombre d'électrolyseurs requis et le volume du stockage par rapport à la flexibilité de production qu'il est en mesure d'offrir. Les ressources renouvelables accessibles à proximité du site sont également à prendre en compte. Cette décision est prise en opposant les dépenses d'installation (CAPEX) aux dépenses en opération (OPEX), tout en considérant la demande a priori et les diverses contraintes opérationnelles.

Une fois le site en opération, il est possible d'exploiter la flexibilité offerte par les électrolyseurs et le stockage pour choisir intelligemment quand produire. L'objectif est de respecter un certain nombre de contraintes opérationnelles, tout en minimisant les coûts de production et en favorisant la production d'un hydrogène le plus décarboné possible. Un planning de production est régulièrement mis à jour, et celui-ci doit prendre en compte le coût de l'énergie, sa disponibilité, la demande, le stockage disponible, les maintenances, etc...

Il reste encore à livrer l'hydrogène produit. Celui-ci peut être acheminé au client par un conduit de gaz, auquel cas peu de planification est requise. Il peut également être chargé dans des containers emmenés ensuite à des clients dont l'approvisionnement doit être toujours garanti. Un tel fonctionnement requiert de planifier la gestion d'une flotte mobile de containers se déplaçant entre les sites de production, de stockage et de consommation. Cette logis-

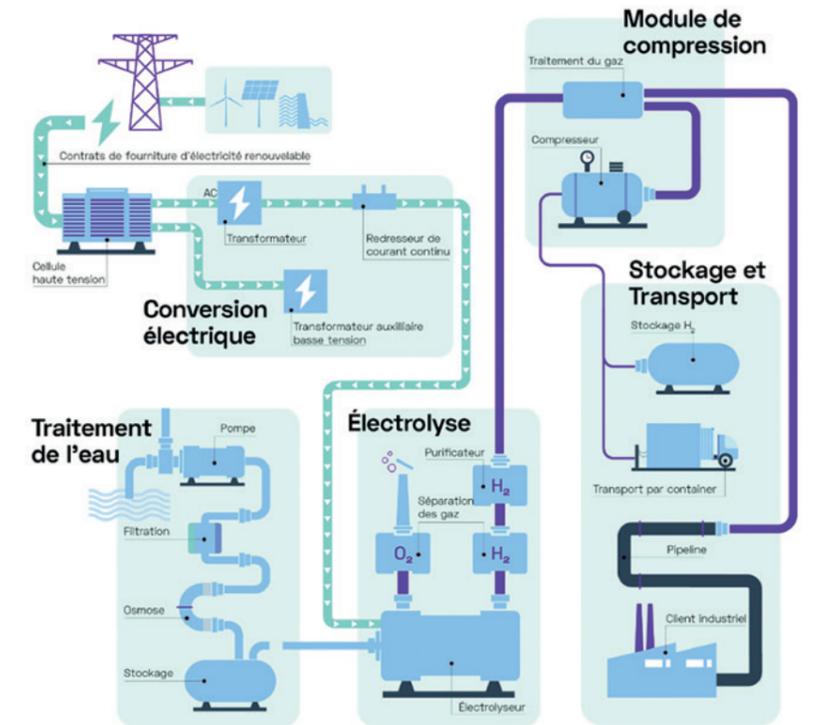


Figure 3 : Chaîne logistique de production et livraison d'hydrogène vert (©Lhyfe).

tique complexe nécessite de modéliser sur un large horizon de temps le fonctionnement de chaque site afin de déterminer entre chacun d'eux les déplacements nécessaires et optimaux des containers.

Chacune de ces décisions, prises individuellement, reposent sur des problématiques spécifiques pour des échelles de temps différentes : optimisation de dimensionnement, de production, de tournées à l'échelle d'années, de mois ou de semaines. L'optimisation se complexifie encore davantage lorsqu'on souhaite coupler ces tâches pour affiner la prise de décision, ou les démultiplier pour passer à l'échelle. Par ailleurs chaque modèle propose des décisions optimales uniquement selon les données qui lui sont renseignées : celles-ci doivent être connues et accessibles, et peuvent être erronées dans une certaine mesure. Des incertitudes impactent les modèles à tous les niveaux, par exemple sur la demande future, le coût de l'énergie et sa disponibilité, les maintenances des unités de production, etc... Malgré ces difficultés, l'optimisation présente des avantages considérables, autant économiques qu'écologiques.

UNE APPROCHE HOLISTIQUE

En raison de l'importance des enjeux, il existe un réel besoin de solutions numériques capable de résoudre des problèmes d'optimisation aux difficultés multiples :

- L'étude de modèles stochastiques en grande dimension.

- Les contraintes d'un contexte opérationnel pro-téiforme.
- La compréhension des résultats par l'utilisateur.

Tout algorithme d'optimisation employé par l'entreprise doit répondre à ce cahier des charges. Les aspects combinatoires et stochastiques requièrent de concevoir des algorithmes finement conçus pour répondre à des problématiques ciblées de dimension croissante. La spécificité de ces problèmes les éloigne des méthodes de résolution classique appartenant à un état de l'art bien établi. Cette spécificité est renforcée par la modélisation parfois complexe des contraintes opérationnelles. Leur qualité se mesure en pratique par leur influence sur la solution. Il existe donc de nombreuses manières de les modéliser, mais il est nécessaire de le faire sans remettre en question les approches de résolution préexistantes. Il faut donc, d'une part représenter un contexte industriel sans trop impacter l'algorithme, et d'autre part concevoir des algorithmes en mesure de supporter des changements de modèle sans trop impacter leurs performances.

Il est également nécessaire de justifier les décisions recommandées aux utilisateurs. Nos outils numériques sont tout autant destinés à l'aide à la décision qu'à un contrôle sans supervision. Leur rôle n'est pas seulement d'optimiser mais aussi d'informer l'utilisateur des opportunités et des infaisabilités afin que celui-ci prenne une décision éclairée. Souvent la seule connaissance d'une solution

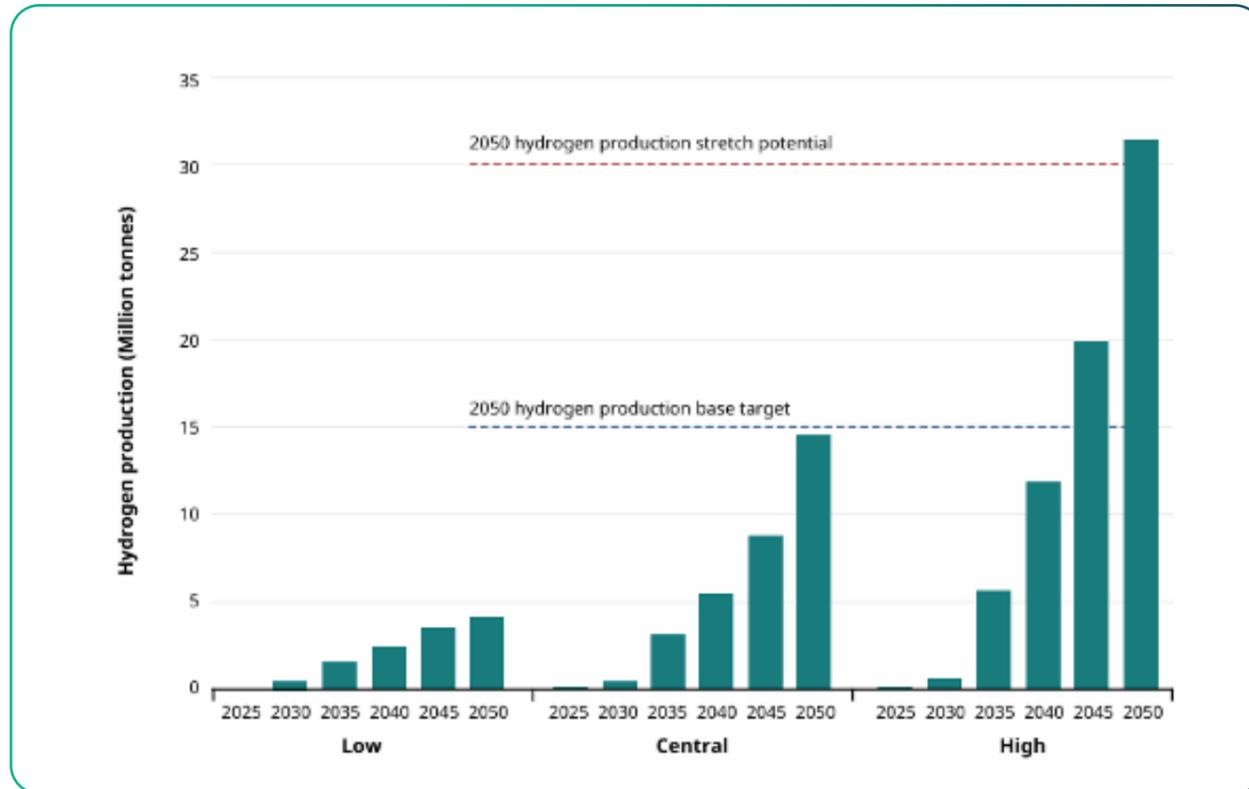


Figure 4 : Modélisation 2024 des scénarios de production et de consommation d'hydrogène en Australie par le CSIRO

Ces modèles d'optimisation catégorisés comme « stratégiques » aident à dessiner des trajectoires à long terme pour le déploiement de l'hydrogène, en évaluant différentes configurations possibles du système énergétique et en identifiant les solutions les plus efficaces pour atteindre les objectifs de décarbonation. Concrètement, voici l'une des réalisations récentes à partir de l'un d'entre eux :

L'exemple de l'Australie.

Présentant la trajectoire de production par incréments de 5 ans selon 3 scénarios considérés. Le cas *low* est basé sur le scénario «*Step Change*» de l'AEMO; le cas *Central* est également nourri par le scénario «*Step Change*» mais avec une prise en compte de la demande à l'exportation; le cas *High* est basé sur le scénario «*Green Energy Export*» de l'AEMO.

Pourtant, les infrastructures hydrogène peinent à se développer du fait de leur absence de perspective économique sur les *business models* simples considérés de décarbonation des usages, appuyés par des subventions à l'investissement pour initier la transition. Il apparaît essentiel de pouvoir valoriser plus largement la contribution possible de l'hydrogène à la transition du système énergétique et ce, à travers de nouvelles règles du jeu. Ainsi, trois considérations majeures défient les modèles actuels.

1. Flexibilité et optimisation des réseaux énergétiques : l'hydrogène offre des solutions pour intégrer les sources d'énergie renouvelables et

intermittentes dans le mix électrique futur. Cette intermittence implique de la variabilité et de l'aléa sur des pas de temps très fins.

2. Autoconsommation d'énergies locales et transport d'énergie transnationale : l'hydrogène ouvre de nouvelles opportunités pour l'autoconsommation à l'échelle d'un bâtiment, d'un quartier ou d'un village, tout en permettant (grâce au *power to gas* et le transport par *pipe gas*) de déplacer de vastes volumes d'énergie de zones riches en énergie renouvelables vers des consommateurs. L'hydrogène intègre tous les échelons géographiques du très local au transnational.

3. Réglementations : de nouvelles réglementations et schémas d'aides, tels que *RED II* et ses actes délégués en Europe, ou l'Article 45 aux États-Unis, ont été mis en place pour pallier les limites des subventions à l'investissement et orienter les trajectoires de développement. Ces réglementations sont déjà appelées à évoluer au fur et à mesure de la réalisation des projets d'infrastructures, façonnant ainsi les investissements.

Ainsi, l'optimisation des chaînes logistiques de l'hydrogène devient plus complexe nécessitant une approche multidimensionnelle. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour couvrir l'ensemble des défis associés à une bonne planification tout en restant conscient de la complexité computationnelle que cela implique.

1. Délimitation spatio-temporelle du système énergétique étudié

La délimitation spatio-temporelle du système énergétique est cruciale pour comprendre l'interaction des technologies de l'hydrogène avec le réseau énergétique à différentes échelles géographiques et temporelles. Le choix des échelles dépend des technologies envisagées pour le transport et le stockage de l'hydrogène. Par exemple, modéliser la chaîne d'approvisionnement à l'échelle européenne permet d'évaluer les avantages d'un réseau interconnecté et les possibilités de stockage dans des cavités salines en Europe du Nord. Cependant, cette modélisation doit prendre en compte les échanges transfrontaliers d'électricité et d'hydrogène, ainsi que les infrastructures et réglementations propres à chaque pays.

La définition de l'horizon temporel et de la résolution temporelle est fondamentale pour garantir une optimisation efficace. Cela implique de fixer une période de planification claire, par exemple jusqu'en 2040, tout en adoptant des échelles temporelles variées selon les objectifs de l'étude. Les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles doivent être représentées par des échelles différentes, telles que l'annuel, le mensuel ou l'horaire. Par exemple, une résolution horaire est nécessaire pour modéliser les fluctuations de production d'énergie renouvelable, alors qu'une résolution annuelle suffit pour planifier des investissements. Toutefois, plus la résolution est fine, plus le modèle devient complexe

et gourmand en ressources de calcul, ce qui exige un compromis entre la précision souhaitée et la faisabilité pratique.

La délimitation spatiale du modèle est tout aussi essentielle. Il est crucial de spécifier les régions concernées, qu'il s'agisse de pays, régions ou villes, car cela conditionne directement le processus de prise de décision. Définir les frontières géographiques du modèle permet d'identifier les infrastructures, les ressources disponibles, les centres de consommation, ainsi que les sites potentiels de production et de stockage d'hydrogène. Comme pour les aspects temporels, des échelles spatiales multiples peuvent être nécessaires pour capturer les dynamiques locales, régionales et nationales.

2. Contexte réglementaire

Le cadre réglementaire est une dimension importante qui influe sur l'optimisation des chaînes logistiques de l'hydrogène. Les réglementations varient selon les niveaux administratifs, qu'ils soient européens, nationaux, régionaux ou locaux, et ont des répercussions directes sur les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles. Il est essentiel d'identifier et de caractériser toutes les réglementations pertinentes pour le modèle, en spécifiant leur portée, leur calendrier d'application, et leurs conditions de mise en œuvre. Par exemple, les normes d'émission pour les véhicules peuvent influencer le choix des modes de transport de l'hydrogène. Ces réglementations évoluent dans le temps, et il est important de prendre en compte non seulement celles en vigueur, mais aussi celles qui entreront en application pendant la période modélisée. Chaque réglementation doit être intégrée dans le modèle avec la résolution spatiale et temporelle appropriée afin de capturer pleinement ses effets sur le système énergétique.

Les dimensions spatiales, temporelles et réglementaires sont interdépendantes, et les décisions dans une dimension ont des répercussions sur les autres. Par exemple, un investissement stratégique dans des infrastructures de stockage d'hydrogène peut dépendre des prévisions de production d'énergie renouvelable, qui sont influencées par la dimension temporelle, et des subventions disponibles, qui relèvent de la dimension réglementaire. Compte tenu de la complexité de ces interactions, il est souvent impossible de représenter toutes les interactions dans un seul modèle sans dépasser les capacités de calcul disponibles. Il est donc nécessaire de faire des compromis et de simplifier certaines parties du modèle. La validité externe du modèle doit être clairement définie pour indiquer quelles interactions ont été incluses ou exclues et quelles sont les limites des conclusions qui peuvent en être tirées.

3. Aspects environnementaux

Les aspects environnementaux doivent également être intégrés dans le modèle pour garantir une tran-

sition énergétique durable. Les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de ressources et d'autres impacts environnementaux doivent être évalués de manière multicritère, incluant éventuellement des analyses de cycle de vie (ACV) des composants de la chaîne logistique de l'hydrogène. De plus, les réglementations environnementales influencent les choix technologiques et opérationnels, et doivent être intégrées pour garantir que les décisions prises sont conformes aux exigences en matière de durabilité.

4. Données et incertitudes

La qualité du modèle dépend également de la disponibilité et de la précision des données utilisées, notamment sur les coûts, les technologies, les demandes futures d'hydrogène et les potentiels de production d'énergie renouvelable. L'intégration de l'innovation technologique est essentielle, car les avancées peuvent modifier les paramètres du modèle. Il est donc crucial de prévoir des mécanismes permettant de prendre en compte ces innovations et d'estimer leurs impacts potentiels. La gestion des incertitudes est également un aspect fondamental, en particulier pour les prévisions à long terme. Des techniques comme l'analyse de sensibilité, les scénarios alternatifs ou les méthodes stochastiques peuvent être utilisées pour évaluer l'impact de ces incertitudes.

L'optimisation des chaînes logistiques de l'hydrogène nécessite donc une prise en compte équilibrée des dimensions temporelles, spatiales, réglementaires, technologiques, économiques et environnementales, ainsi que des incertitudes. La modélisation de ces chaînes constitue un défi complexe, mais essentiel pour appuyer la transition vers une économie de l'hydrogène durable.

Développement de l'outil TedHy par Persee

Conscient de ces enjeux, **Persee**, lauréat régional du concours national d'aide à la création d'entreprises innovantes en 2014, a développé entre 2014 et 2017 l'outil **TedHy** (*Techno-Economic Design of Hydrogen supply chains*) pour accompagner la planification des infrastructures hydrogène. Cet outil *web-based* combine simulation et optimisation à l'échelle territoriale (de l'urbain au régional) pour identifier les possibilités optimales d'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique, en fonction de la disponibilité en énergie et de la demande (mobilité, applications stationnaires, industrie) et de leurs évolutions. TedHy propose des schémas optimisés de déploiement à court et moyen termes, à partir d'une base de données de composants de la chaîne logistique couvrant les formes gazeuses, liquides et ammoniacées de l'hydrogène, composants disponibles ou en voie de l'être.

Présenté sous forme de scénarios, l'outil permet de quantifier les retombées environnementales et économiques, servant ainsi de support à la plani-

fication d'infrastructures, à l'aménagement du territoire et à la concertation entre acteurs publics et privés. TedHy est un outil et une méthodologie.

Limites de l'approche déterministe et nécessité d'une modélisation à haute résolution

Cependant, TedHy s'appuie sur une **optimisation déterministe**, ne prenant en compte les variations liées aux aléas que de manière annualisée et exogène. Cette approche peut s'avérer insuffisante pour capturer les dynamiques complexes et les incertitudes inhérentes aux systèmes énergétiques modernes, notamment en ce qui concerne la **variabilité temporelle** des sources d'énergie renouvelable et des usages de l'hydrogène.

Il devient donc nécessaire d'enrichir TedHy avec des capacités de dimensionnement d'infrastructures à plus haute résolution, intégrant la **variabilité horaire** des sources d'énergie et des usages. Cela permettrait d'améliorer la robustesse et l'efficacité des solutions proposées.

Avancées grâce au partenariat avec l'Ademe et le CERMICS

Avec le soutien de l'**Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)** et en partenariat avec le **Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques et Calcul Scientifique (CERMICS)**, Persee a entrepris de relever certains des défis préalablement mentionnés à l'échelle d'une usine (*Plant*) en :

- **intégrant la variabilité horaire ou journalière** des sources énergétiques renouvelables et des usages ;
- **prenant en compte l'existence de services systèmes**, tels que la participation au réglage de la fréquence ou à la gestion de la demande, pour calibrer le dimensionnement du stockage, de la production et des chaînes logistiques ;
- **explorant de nouvelles techniques mathématiques**, comme l'imbrication des échelons tactiques et opérationnels, pour améliorer la prise de décision à différents horizons temporels et niveaux de granularité.

Ces efforts visent à développer des modèles plus précis et adaptatifs, capables de fournir des solutions optimales malgré les incertitudes et les variabilités du système énergétique.

Projet GrHyFONDOR : une collaboration interdisciplinaire pour une optimisation avancée

En complément, Persee s'est associé au **Laboratoire de Génie Chimique (LGC)** de Toulouse, notamment avec **Catherine Azzaro-Pantel**, et à **Toulouse Business School (TBS)** dans le cadre du projet **Green Hydrogen-Flexible and Optimised Networks by interDisciplinary, multidimensional and methOlogical Research (GrHyFONDOR)**,

Méthodologie

TedHy vous aide à définir un **projet significatif et structuré** pour tirer le meilleur parti du potentiel de l'hydrogène en 5 étapes !

processus itératif développé et affiné par un **utilisateur administrateur Persee** pour soutenir la décision des **utilisateurs finaux**

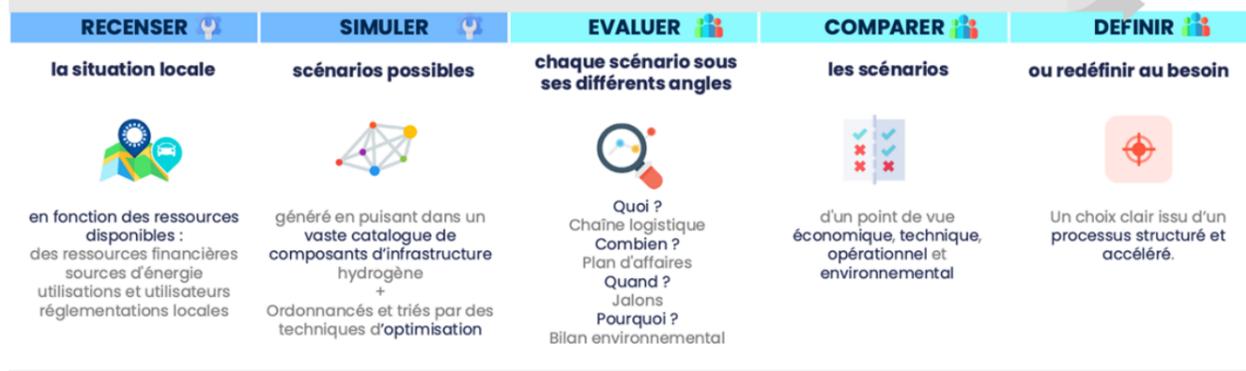


Figure 5 : Méthodologie TedHy associée à l'outil éponyme.

financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) sur la période 2022-2025.

Ce projet porte sur la **gestion dynamique des systèmes énergétiques décentralisés** intégrant l'hydrogène comme vecteur de transition énergétique. L'innovation réside dans la prise en compte des différents agents intervenant dans ces systèmes et dans la conciliation des décisions tactiques et stratégiques à différentes échelles.

Le cadre méthodologique développé est basé sur une approche de **modélisation systémique et intégrée**, alliant génie des procédés de l'énergie, mathématiques avancées et économie. L'objectif est de concevoir une nouvelle structure de gouvernance et des moyens de gestion dynamique de ces systèmes, valorisant les services variés que l'hydrogène peut fournir au système énergétique global et les interactions entre les différents acteurs.

Le projet GrHyFONDDOR a un double objectif.

- Développer de nouvelles connaissances sur les conditions microéconomiques** : cela inclut l'allocation optimale des ressources, la compréhension de la structure du marché de l'hydrogène et l'analyse des interactions au sein de la chaîne de valeur, afin de maximiser le potentiel de décarbonation de l'hydrogène dans le cadre d'une transition énergétique viable.
- Concevoir et élaborer de nouveaux outils scientifiques** : ces outils permettront de concevoir et d'exploiter de manière optimale les systèmes d'hydrogène vert dans des conditions microéconomiques données, en intégrant les avancées en modélisation mathématique, en optimisation et en analyse économique.

Défis futurs et perspectives d'évolution

Malgré les avancées réalisées, de nombreux défis subsistent pour élaborer une approche mathématique et un niveau de modélisation capables de répondre durablement au besoin de définir la place de l'hydrogène dans nos systèmes énergétiques. L'intégration précise des aspects temporels, spatiaux, technologiques et réglementaires demeure essentielle. Les modèles doivent également être capables de gérer l'incertitude et la variabilité inhérentes aux sources d'énergie renouvelable et aux demandes évolutives d'un marché émergent de l'hydrogène vert ou bas-carbone.

Les **avancées en optimisation mathématique**, notamment dans les domaines de la programmation stochastique et de l'optimisation robuste, joueront un rôle déterminant pour surmonter ces défis. De plus, le développement de modèles multi-agents et l'intégration de l'intelligence artificielle peuvent offrir de nouvelles perspectives pour la gestion dynamique et adaptative des systèmes énergétiques à base d'hydrogène.

La **collaboration interdisciplinaire** entre ingénieurs, mathématiciens, économistes et spécialistes des sciences sociales sera également cruciale pour développer des solutions intégrées et acceptables par l'ensemble des parties prenantes.

CONCLUSION

L'optimisation des chaînes logistiques de l'hydrogène est une tâche complexe qui nécessite une approche globale et multidimensionnelle. Les travaux de Persee, notamment avec le développement de l'outil TedHy et la participation au projet GrHyFONDDOR, illustrent les efforts en cours pour relever ces défis. En combinant des approches innovantes en modélisation, en optimisation et en gestion des systèmes énergétiques, il est possible de contribuer significativement à la transition vers une économie bas-carbone où l'hydrogène joue un rôle central.

La poursuite de ces efforts de recherche et développement est essentielle pour atteindre les objectifs ambitieux de décarbonation fixés par les accords internationaux et les politiques nationales. En développant des outils et des méthodes robustes, adaptés aux réalités opérationnelles et économiques, nous pourrions faciliter l'intégration de l'hydrogène vert dans le mix énergétique, renforçant ainsi la résilience et la durabilité de nos systèmes énergétiques.

hORs-les-murs

Les Jumeaux Numériques

Par Amal Benhamiche, Sébastien Bolle, Morgan Chopin, Thierry Coupaye et Nancy Perrot

Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?

Une définition courte, représentative, et très largement acceptée, est celle donnée par le Digital Twin Consortium en décembre 2020¹, ici traduite en français : « Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'entités et de processus du monde réel, synchronisée à une fréquence et une fidélité spécifiées². »

Si la perception des jumeaux numériques a pu également évoluer au cours du temps, on constate aujourd'hui une maturité et convergence certaines. L'acceptation des jumeaux numériques communément admise converge sur quelques caractéristiques essentielles³ dont le couplage numérique/physique : l'existence d'un jumeau numérique est intrinsèquement liée à l'existence d'un jumeau physique ; et la synchronisation numérique/physique : jumeaux physique et numérique sont liés, synchronisés, et s'alimentent l'un l'autre en continu.

Un jumeau numérique peut embarquer un, ou plusieurs, modèles de différentes natures, par exemple des modèles géométriques 2D ou 3D (e.g. « nuages de points », modèles vectoriels), des modèles topologiques, physiques, des équations mathématiques, des diagrammes d'états-transitions, etc. — mais **un modèle (ou ensemble de modèles), seul, n'est pas un jumeau numérique**. Pour être considéré comme tel, le modèle doit décrire une entité du monde physique et surtout être synchronisé avec cette entité physique. Pour les mêmes raisons, **une simulation (simulateur, émulateur), ou une maquette numérique, s'ils peuvent faire partie d'un jumeau numérique, ne sont pas, en soi, des jumeaux numériques**.

A quoi sert un jumeau numérique ?

Les utilisations typiques des jumeaux numériques vont des utilisations basiques telles que la numérisation et la visualisation (par exemple, 2D, 3D, réalité virtuelle/augmentée) jusqu'à des utilisations plus avancées telles que la simulation, l'orchestration/la gestion/le contrôle et la prédiction (par exemple, grâce à l'analyse basée sur l'IA sur des informations historiques).

Un jumeau numérique permet de maintenir à jour une représentation numérique d'entités d'intérêt du monde physique **dans leur environnement**, afin de **superviser, orchestrer, optimiser le comportement** de ces entités et des processus. Ils permettent une **compréhension globale** pour une **prise de décision optimale**. Ils visent à utiliser des données historisées et en temps réel pour **représenter le passé et le présent, simuler, voire prédire des futurs possibles**.

Jumeau numérique et jumeau physique ont un comportement typique en synergie, par lequel les données d'observation du système physique vont alimenter le jumeau numérique, qui va pouvoir analyser et utiliser ces données pour **simuler, tester, comparer, des scénarios en faisant varier des paramètres, choisir les scénarios optimaux, et pousser en retour ces configurations de paramètres vers le système physique**.

Quel est le champ d'application des jumeaux numériques ?

Le champ d'application est immense. Le concept de jumeau numérique est né dans l'**industrie manufacturière**, domaine dans lequel il continue à se développer. Le bâti-

ment, l'usine, la ville et les territoires intelligents sont parmi les domaines dans lesquels les jumeaux numériques se développent rapidement. Le sujet est étudié également dans le domaine de la **mobilité, les transports et la logistique** : réseaux routiers et, infrastructures portuaires et aéroportuaires, et dans le domaine de l'**énergie** (par exemple « *le réacteur numérique* » d'EDF). Le sujet existe également dans le domaine des **sciences** : santé, médecine, biologie, sciences de la terre, océanographie (par exemple le « jumeau numérique de l'océan » dans appel à projets européen). Le sujet se développe également fortement dans le secteur des **télécommunications** (« jumeaux numériques des réseaux », « network digital twins »).

Les graphes : le choix le plus expressif pour les jumeaux numériques ?

Le marché des plateformes de jumeaux numériques n'est pas encore complètement structuré. Le positionnement de la plupart des fournisseurs de technologies de jumeaux numériques est fortement corrélé à leur secteur d'origine, les jumeaux numériques étant souvent considérés comme une extension naturelle de leur activité. Les acteurs du **secteur industriel** se concentrent sur les **modèles 3D** de produits, machines, composants et systèmes issus de la CAO/FAO⁴ et de gestion du cycle de vie des produits (PLM⁵). Les acteurs du **secteur du bâtiment** se concentrent sur les **modèles d'information du bâtiment (BIM⁶)** qui sont essentiellement des plans numériques de bâtiments. Les acteurs issus des **systèmes d'information géographiques** ont naturellement tendance à construire des jumeaux numériques sur la base de **représentations cartographiques**

¹ Digital Twin Consortium Defines Digital Twin

² « Virtuel » est à prendre ici au sens de « numérique » (« digital » en anglais), terme qui sera privilégié par la suite ('virtuel' pouvant générer de la confusion avec « réalité virtuelle » par exemple).

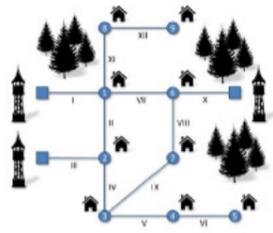
³ Voir analyse détaillée dans *A Digital Twin use cases classification and definition framework based on Industrial feedback* - ScienceDirect

⁴ Construction/Fabrication Assistée par Ordinateur

⁵ Product Lifecycle Management

⁶ Building Information Modeling ou Maquette Numérique du Bâtiment

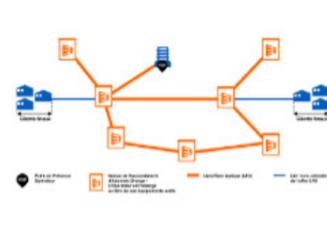
Réseau de distribution d'eau



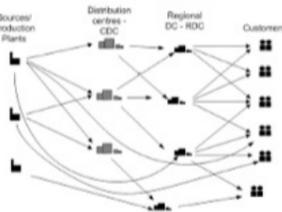
Réseau de Transport Public



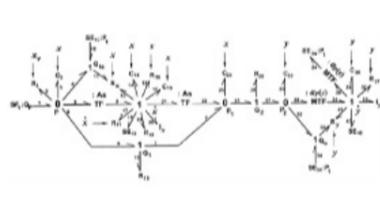
Réseau de Fibre Optique



Réseau de logistique



Réseau de flux d'énergie



Réseau de routeurs IP

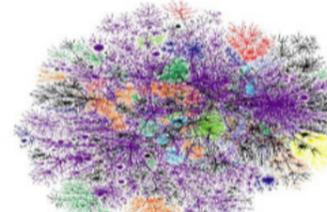


Figure 1 : Modèles graphe pour des réseaux physiques, quelques exemples parmi d'autres

du monde physique. Les acteurs de l'IT comme Microsoft et Amazon adoptent une approche plus neutre et généraliste, et voient les plateformes de jumeaux numériques comme une extension naturelle de leurs plateformes Cloud/IoT.

Les graphes pour une modélisation multi-niveaux des systèmes et réseaux

Les graphes ne sont pas forcément un choix évident, de prime abord, pour la modélisation des jumeaux numériques. Pourtant, ils ont une longue histoire et tradition en tant que modèles structurels et comportementaux pour toutes sortes de systèmes, et systèmes

de systèmes (cf. Figure 1). Les graphes constituent aujourd'hui la forme de modélisation des jumeaux numériques la plus adoptée dans le monde de l'IT (par exemple Microsoft, Amazon) et des télécommunications (par exemple la plateforme Thing'in d'Orange⁷).

Des graphes, mais quels graphes ?

Les graphes de connaissances (knowledge graphs), ou graphes RDF⁸ ont émergé dans la mouvance du 'linked open data' mais ils ne modélisent pas, à proprement parler, les systèmes physiques, cible des jumeaux numériques, en particulier car ils représentent simplement des informations faiblement

structurées sur ces systèmes, sous la forme de prédicats logiques.

Les graphes de propriétés (Property Graph) sont des multigraphes orientés qui permettent de représenter des entités (nœuds) reliées par des relations orientées (arêtes), avec possibilité d'associer des propriétés (ou attributs) aux nœuds et aux arêtes. Les propriétés sont de forme clé-valeur. Les valeurs de ces propriétés peuvent être plus que des littéraux RDF (i.e. des types structurés).

NGSI-LD, un standard pour les Jumeaux Numériques basés graphe

Le modèle d'information NGSI-LD⁹, tel que normalisé par le groupe CIM de l'ETSI, four-

nit une base formalisée pour les graphes de propriétés, avec des extensions visant son adoption par les systèmes de bases de données graphe du marché (e.g. ArangoDB).

Associer graphe structurel et graphe sémantique

Le modèle d'information NGSI-LD apporte « le meilleur de trois mondes » : un « squelette structurel » hérité de l'Entité-Association (Entity-Relationship¹⁰), des propriétés héritées de l'Entité-Attribut-Valeur (Entity-Attribute-Value¹¹) attachées à la fois aux entités et aux relations, et enfin et surtout, une base (web) sémantique qui permet de superposer un graphe NGSI-LD avec un graphe de connaissances RDF. Un graphe NGSI-LD prend en charge les propriétés des relations et les propriétés des propriétés, qui n'existent pas dans RDF. Il peut être converti en un graphe RDF, sérialisé et exporté sous forme d'ensemble de données liées, après application de la réification. Les graphes NGSI-LD sont le meilleur dénominateur commun pour les Jumeaux Numériques basés sur des graphes afin de modéliser finement à la fois leur structure et leur sémantique.

Illustration : Jumeau Numérique des réseaux

Pourquoi un jumeau numérique du réseau ?

La programmabilité et les techniques de virtualisation des fonctions réseaux apportent de la flexibilité dans la gestion des réseaux et des services. De plus en plus d'opérations réseaux sont, ou seront bientôt, automatisables grâce à l'implantation d'algorithmes d'Intelligence Artificielle et d'aide à la décision au cœur des réseaux. Cette évolution nécessite la collecte continue de données fiables, synchronisées en temps réel avec les différents équipements composant le réseau physique, ainsi que la simulation des algorithmes en environnement réel et dynamique. La mise en place d'un jumeau numérique du réseau apporte une réponse naturelle à l'ensemble de ces besoins.

Modéliser quoi et comment ?

En effet, un jumeau numérique construit et stocke des modèles graphes exploitables par des algorithmes d'IA, par exemple pour automatiser la supervision des réseaux (e.g. diagnostic et détection d'anomalies ou de défauts de sécurisation). Ils fournissent également l'ensemble des éléments nécessaires à la construction d'autres modèles graphes ad-hoc, sur lesquels il est possible de faire tourner tous les algorithmes classiques d'optimisation réseaux (typiquement pour la conception et le dimensionnement des réseaux, ainsi que pour le calcul des routages des flux de services). Grâce au jumeau numérique, les solutions de ces algorithmes peuvent être visualisées et évaluées en termes de faisabilité et d'impact sur le réseau, puis mises en œuvre dans le réseau physique.

Cas d'usage : optimiser la résilience des réseaux optiques

Au sein d'Orange, un cas d'utilisation des jumeaux numériques du réseau concerne la gestion des pannes du réseau de transport optique (e.g. fibres) grâce à une connaissance fine et temps réel de l'état de l'infrastructure réseau, et des services IP qui y transitent. On parle généralement de réseaux multi-couches IP (couche service) sur Optique (couche transport).

L'historisation des données de trafic et d'occurrence des pannes permet de nourrir des algorithmes d'apprentissage de modèles de prédiction de pannes. De plus, une librairie algorithmique d'optimisation des réseaux, networktools, développée à Orange, est interfacée avec le jumeau numérique. Cette librairie permet, d'une part, la simulation des demandes de trafic entre chaque paire de routeurs (origine / destination) d'un réseau IP et l'écoulement de ce trafic dans le réseau à l'aide d'un protocole de routage de type IS-IS. D'autre part, elle permet de mesurer l'impact d'une panne d'un lien IP ou optique sur la qualité de service, en particulier si le re-routage du trafic induit de la congestion sur les liens IP. Par la suite, la librairie permet, via l'appel à un algorithme d'optimisation, de calculer un ensemble de chemins de routage alternatifs permettant d'absorber la congestion induite par la panne. Ces nou-

veaux chemins sont déterminés à l'aide d'un recalcul des métriques IS-IS de la couche IP. En effet, les données qui transitent d'un point à un autre dans le réseau sont routées via le ou les plus courts chemins entre ces deux points au sens d'une métrique définie par les administrateurs réseau. La longueur d'un chemin étant égale à la somme des poids (ou métriques IS-IS) de ses arcs, il faut pouvoir déterminer un ensemble de métriques générant des chemins de routage qui permettent de minimiser la charge du réseau IP. Il s'agit d'un des nombreux problèmes d'optimisation combinatoire au cœur de l'ingénierie de trafic pour les réseaux IP^{12, 13, 14}.

La Figure 3 synthétise le fonctionnement du jumeau numérique dans ce contexte. La synchronisation entre la partie physique et le jumeau numérique est assurée par des requêtes périodiques sur une base de données. Cette dernière collecte l'ensemble des informations et statuts de tous les équipements du réseau (IP et optique) et stocke ces données sous un format IETF standardisé. Une fois ces données récupérées et intégrées dans la plateforme Thing'in, il est possible de superviser le réseau et de détecter d'éventuelles pannes de liens ou de routeurs. Le cas échéant, Thing'in envoie une requête vers la brique décisionnelle du jumeau afin que ce dernier évalue l'impact de la panne et propose une ou plusieurs solutions pour la résoudre. Celles-ci sont alors renvoyées vers Thing'in qui peut les historiser et les transformer en commandes interprétables par le réseau physique, grâce aux futures fonctions de programmabilité des réseaux optiques (e.g. Transport PCE15), afin de le reconfigurer.

Perspectives

Les interactions entre jumeaux numériques et recherche opérationnelle, bien que relativement récentes, suscitent un vif intérêt dans le domaine des télécommunications en raison de leur potentiel pour l'automatisation de la gestion, de la supervision et de l'optimisation des réseaux.

Nous avons illustré à travers le cas des réseaux optiques qu'il est possible de construire un jumeau numérique capable de modéliser les différents éléments d'un réseau, simuler les interactions entre ces éléments puis d'en optimiser les paramètres et le fonc-

¹⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Entity%E2%80%93relationship_model

¹¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Entity%E2%80%93attribute%E2%80%93value_model

¹² Chen Dang, Cristina Bazgan, Tristan Cazenave, Morgan Chopin, Pierre-Henri Wuillemin: Monte Carlo Search Algorithms for Network Traffic Engineering. ECML/PKDD (4) 2021: 486-501

¹³ Andreas Bley, Bernard Fortz, Éric Gourdin, Kaj Holmberg, Olivier Klopfenstein, Michal Pióro, Artur Tomaszewski, Hakan Ümit: Optimization of OSPF Routing in IP Networks. Graphs and Algorithms in Communication Networks 2010: 199-240

¹⁴ Aysegül Altin, Bernard Fortz, Mikkel Thorup, Hakan Ümit:

Intra-domain traffic engineering with shortest path routing protocols. Ann. Oper. Res. 204(1): 65-95 (2013)

¹⁵ <https://docs.opendaylight.org/en/latest/release-notes/projects/transportpce.html>

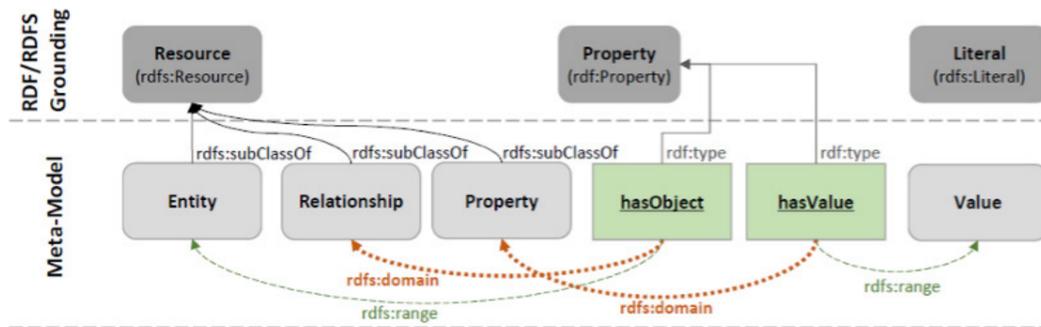


Figure 2 : Spécification formelle du métamodèle Graphe de Propriétés de NGSI-LD

Bien que défini sur la base des standards du web sémantique RDF/RDFS/OWL, le modèle de graphe NGSI-LD a une expressivité plus élevée que la logique de description (Description Logic) ou la logique du premier ordre (First Order Logic), ce qui le rapproche de la logique du second ordre.

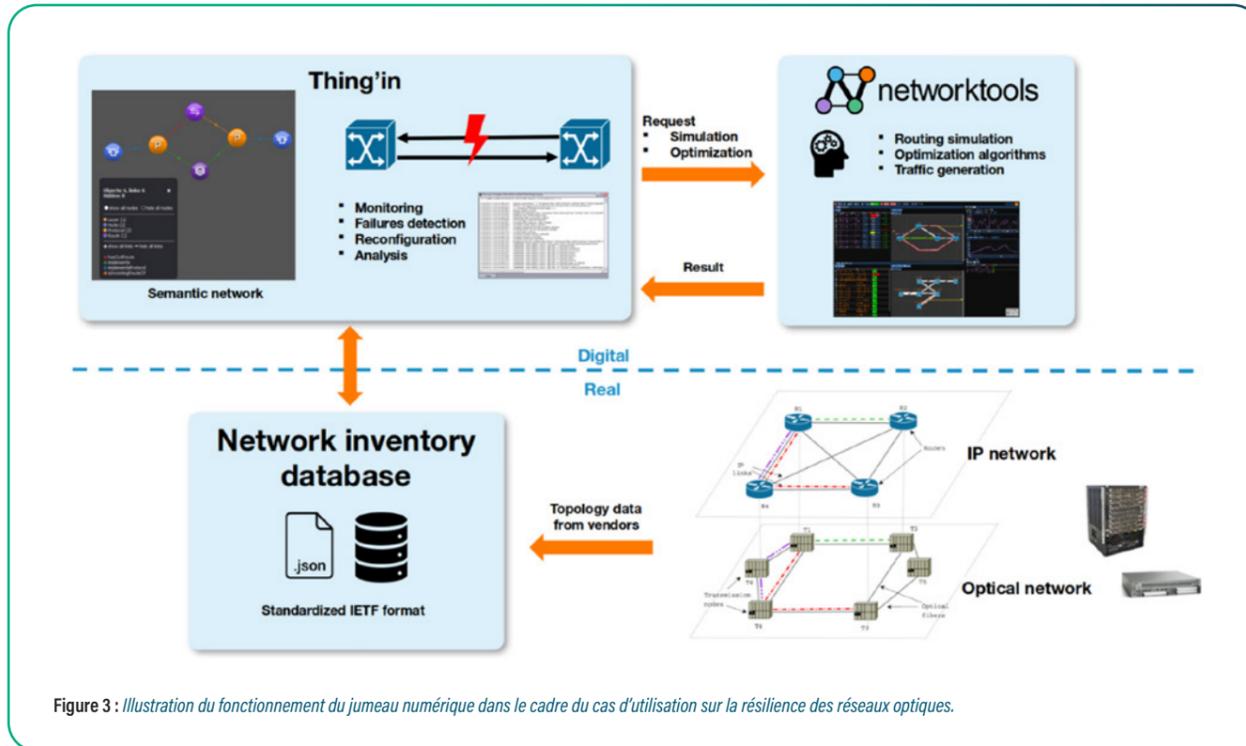


Figure 3 : Illustration du fonctionnement du jumeau numérique dans le cadre du cas d'utilisation sur la résilience des réseaux optiques.

tionnement grâce aux algorithmes de RO que nous développons, notamment pour le problème de configuration des poids IS-IS. Les capacités de synchronisation du jumeau numérique permettent d'assurer une modélisation « à jour » du réseau et du trafic qui transite sur ce réseau et ainsi de fournir un cadre de prise de décision en quasi-temps réel pour certains paramètres. Par ailleurs, l'historisation des données permet de simuler, voire prédire, les scénarios futurs et ainsi de pouvoir intégrer l'incertitude ou l'aléas dans la prise de décision. Les fonctionnalités de visualisation et d'évaluation du jumeau numérique devraient, à terme, permettre l'implémentation d'une solution retournée par un algorithme de RO directement dans le réseau physique, soit après intervention d'un opérateur humain ou de manière totalement automatisée.

Les jumeaux numériques peuvent être utiles pour de nombreuses autres applications liées aux réseaux de télécommunications ou à d'autres domaines (technicien augmenté, parcours patient dans un hôpital pour le domaine de la santé, etc.). L'intégration d'une brique décisionnelle basée sur la RO dans ces jumeaux est d'autant plus importante que les systèmes considérés peuvent être de très grande taille et leur gestion nécessite des mécanismes complexes. D'autre part, le jumeau constitue une porte d'entrée vers un important gisement de données qui peuvent être exploitées pour mettre en place des **approches hybrides IA / RO**. Les approches hybrides alliant IA et RO, encore

à un stade émergent, apparaissent comme une voie prometteuse pour développer des algorithmes à la fois rapides, adaptables et capables de garantir la qualité des solutions fournies.



Vie du GDR ROD

Par Christian Artigues, Nadia Brauner et Pierre Fouilhoux



1 - Évolution 2024

Le Groupement de Recherche Opérationnelle et Décision (GDR ROD) de l'institut CNRS Sciences Informatique n'a pas eu de changements de structure en 2024. Au sujet des évolutions de responsabilités : à la tête de l'action transverse Décision et Optimisation Robuste (DOR), Céline Gicquel a été remplacée par Vincent Leclère (CERMICS) ; Zacharie Alès (ENSTA) est venu renforcer l'équipe d'animation de l'action transverse Données, Apprentissage Automatique et Optimisation (DAAO).

Pour 2025, un **changement de direction** aura lieu : Christian Artigues quitte la direction du GDR, Nadia Brauner devient responsable du GDR (le mot directeur d'un GDR ayant disparu des dénominations), Pierre Fouilhoux reste responsable adjoint, Odile Bellenguez (LS2N) et Michaël Poss (LIRMM) deviennent responsables adjoints.

Une journée prospective a rassemblé un groupe de chercheurs et de chercheuses autour du conseil scientifique au CNAM à Paris en mai. Cette réunion a lancé l'élaboration d'un rapport de prospective actuellement en cours de rédaction.

2 - Activités d'animation

Le GDR ROD a (co-)organisé et/ou (co-)financé pas moins de **29 événements en 2024** que vous pouvez retrouver sur le site du GDR. Chaque axe et/ou Groupe de Travail (GT) ainsi que chaque action transverse ont organisé (sauf exception) un événement avec un auditoire en présentiel variant entre 25 et 80 personnes.

Comme d'habitude, la **journée nationale** du GDR ROD a eu lieu pendant la conférence ROADEF, cette année à Amiens (<https://roadef2024.sciences-conf.org/>) avec entre autres notre assemblée générale du GDR ROD. Sur la conférence, **38 sessions** ont été directement organisées par les GT et actions transverses du GDR. A cette occasion, le GDR a organisé **4 tutoriels** en direction des jeunes pour une présentation synthétique sur un domaine particulier : *On identification problems in graphs: About hypergraph representations and polyhedral methods to solve such problems* par Annegret Wagler, *Des puces à l'OR* - Alix Munier, Rémi Garcia Lilia Zaourar, *Préférences structurées en décision collective : algorithmes de reconnaissance et complexité* par Olivier Spanjaar et Multi-

flots et multicoups dans la conception de réseaux sous l'angle des travaux de Michel Minoux par Viet Hung Nguyen. Il est à noter que la parité a été respectée pour ces tutoriels. Nous avons également invité **4 retours d'expérience industrielle** avec Schneider Electric, Savoye, Alma Scop et SICARA.

Le GDR soutient l'organisation de **manifestations internationales ou nationales** liées à la ROD par la communauté : 15th Metaheuristics International Conference, organisé par le Lab-STICC (Marc Sevaux, co-animateur du GT ROQ) en collaboration avec le GT META à Lorient en juin ; 27th Euromicro Conference Series on Digital System Design (DSD) 2024 organisée à Sorbonne Université en août, le General Chair étant Lilia Zaourar co-animatrice du GT OSI ; 11th INFORMS Transportation Science and Logistics Society Workshop (TSL 2024) co-organisé par Olivier Peton du LS2N en lien avec l'axe REST en septembre ; Julia and Optimization Days 2024 co-organisé par les co-animatrices des axes PMNL et REST (Sonia Cafieri et Sandra U. Nogueve) en septembre.

3 - Écoles doctorales et actions jeunes

Le GDR a organisé cette année **3 écoles thématiques** : ACP Winter School 2024 en mars a été co-organisée par le GT Contraintes, l'Association for Constraint Programming et le GDR RADIA ; l'école de l'action transverse Décision et Optimisation Robuste en juin ; et l'école en Transport et Logistique (22-24/09) co-organisée par le GT2L et le projet ANR Labcom CRC Lab.

Outre les tutoriels et les écoles doctorales à la conférence ROADEF, le GDR a poursuivi en 2024 la mise en œuvre des instruments d'aide aux jeunes chercheuses et chercheurs. Un appel à **bourses d'Aide à la Mobilité** qui permettra à Paul Fleurance, doctorant (LS2N - IMT Atlantique) une mobilité à Polytechnique Montreal en 2025. Un forum de rencontre entre étudiant.e.s en thèse ou master et chercheuses et chercheurs académiques et industriels a eu lieu (online via l'outil gather.town) en décembre pour diffuser les stages/thèses et emplois dans l'industrie et la recherche académique. Le **prix de la meilleure thèse en Transport et Logistique 2025** est proposé par le groupe de travail GT2L. Nous envisageons de créer un **prix de thèse 2026 du GDR ROD**. Des discussions avec le CS sont en cours sur les modalités et la mise en œuvre de ce prix. Cette année, le GDR démarre une initiative d'aide aux permanentes et permanents nouvellement recrutés qui se traduit par deux actions. Une ses-

sion **Jeunes Recruté.e.s** aura lieu à la conférence ROADEF 2025. Elle propose une opportunité à ces collègues de se présenter à la communauté ainsi qu'à chacun.e l'autre. (Aucune restriction thématique n'est imposée). Une **aide à la mobilité pour les permanent.e.s** nouvellement recrutés qui n'ont peut-être pas accès à des budgets pour participer à une conférence sans y avoir de publication : Marius Roland, McF CRISTAL Lille (600€ - pour TRISTAN au Japon) ; Junkai He Ass, Prof. Kedge Business School Bordeaux (Mobilité Université d'Edinburgh) ; Yenny Paredes Astudillo, McF INSA Lyon (IN4PL au Portugal) ; Arwa Khannoussi, McF LabSTICC (ROADEF 2025) ; Mari Chaikovskaia, McF G-SCOP (ROADEF 2025) ; Alexis Robbes, McF UTT (Mobilité HEC-Liege).

4 - Quelques faits marquants en 2024

Le GDR s'investit dans certaines thématiques prioritaires comme l'informatique Eco-Responsable et l'éthique, ouvrant ainsi des **actions interdisciplinaires**, en particulier en collaboration avec le GDR RADIA (Raisonnement, Apprentissage, et Décision en Intelligence Artificielle). Une journée commune sur les **aspects computationnels de l'éthique** pour la décision individuelle ou collective et les jeux en janvier au LIP6 avec le GDR RADIA ; Une journée « Inventons de **nouveaux modèles pour la transition des systèmes alimentaires** : logistique, aide à la décision, relocalisation et coopération dans les territoires » en février à l'INSA de Lyon avec le GDR RADIA ; une journée **Optimisation et Energie** sous contraintes climatiques en novembre à l'INSA de Lyon avec le GDR RADIA ; une Journée consacrée aux **50 ans des travaux de Gilles Kahn** sur les modèles et langages de programmation parallèles en décembre à l'INRIA Paris avec le GDR SOC2.

En plus des journées interdisciplinaires présentées ci-dessus, le GDR ROD a participé à deux autres actions interdisciplinaires en relation avec la sobriété numérique : les Green Days 2024 en mars à Toulouse, événement co-organisé par les GDR GPL, IASIS, MADIS, ROD, RSD, SOC2 et ECOINFO ; ainsi que les journées de Recherche en Apprentissage Frugal (JRAF 2024) en novembre à Grenoble.

5 - Focus Optimisation CNRS Sciences Informatiques

L'année 2024 a été marquée par le focus thématique sur l'optimisation orchestré par CNRS Sciences Informatiques. Le GDR ROD a été en première ligne pour l'organisation et la participation aux événements programmés. Le groupe des organisatrices (***) ou groupe organisateur si on veut éviter le néologisme ***) , mené par Carola Doerr, membre du GDR ROD, comprenait également 3 autres membres du GDR dont Claudia d'Ambrosio, Jérôme Malick et Alantha Newman. Trois journées ont eu lieu en octobre. **La journée industrielle annuelle du GDR ROD** a été co-organisée par le GDR ROD (Aziz Moukrim et Claude Le Pape) et le Réseau Thématique Optimisation de CNRS Mathématiques avec des interventions de membres du GDR : Sourour Elloumi (Reformulation quadratique convexe), Jean-Charles Billaut (RO dans la logistique alimentaire de proximité). **Une deuxième journée « Tout public »** autour de l'Optimisation a vu aussi des interventions de membres du GDR : Nadia Brauner, Carola Doerr et Jérôme Malick (Panorama sur l'optimisation), Sandra Ulrich Nguveu (décomposition et linéarisation avec garanties d'optimalité), Axel Parmentier (Décarboner et optimiser les processus industriels). Enfin, **une journée scientifique** avec des échanges entre sous-disciplines de l'optimisation, des membres du GDR sont également intervenus : Jean-Bernard Lasserre (The moment-SOS hierarchy), Michaël Poss (le rôle de l'optimisation dans le GDR ROD).

6 - Projet 2025

Le nouveau bureau a pour mission en 2025 de proposer le renouvellement du GDR ROD auprès du CNRS Sciences Informatiques. Dans cet objectif, le document de prospective en cours de rédaction sera utilisé pour aménager la structuration des axes et des groupes. Des réunions du comité scientifique seront organisées sur ce sujet, avec une discussion au sein des axes et des groupes pour décider de cette structure. Nous espérons que le GDR ROD sera reconduit et sera toujours aussi actif et utile à la communauté ROD. Plusieurs actions nouvelles sont en chantier comme indiqué dans le bilan 2024 : un prix de thèse du GDR ROD, des actions envers les jeunes recrutés.e.s comme des formations aux concours, des recrutements et incitations aux dépôts de projets ANR, ERC... Et d'ailleurs, n'hésitez pas à interpeler le bureau pour toutes remarques, critiques, suggestions que vous jugerez utiles !

(INS2I) pour devenir "CNRS Sciences Informatiques". Ce changement crée à cette occasion le mot valise "Sciences Informatiques" que le CNRS désire mettre en avant pour représenter les aspects fondamentaux de l'informatique.

Après la création en 2022 des 3 axes transverses (RO, Environnement et société / RO et Ethique / RO Quantique), il n'y pas eu de changement structurel en 2023. Des changements de pilotage sont en cours avec des nouveaux responsables pour le groupe de travail GOTHA (Ordonnancement Théorique et Appliqué), qui sont maintenant Giorgio Lucarelli (LCOMS) et Hasan al Hassan (UCO) ; et aussi pour l'action transverse DOR (Décision et Optimisation Robustes) animée à présent par Vincent Leclere (CERMICS), Ayse Nur Arslan (IMB) et Michaël Poss (LIRMM).

7 - Activités d'animation en 2023

Le GDR a directement organisé ou co-organisé **34 événements** majoritairement en présentiel dans 10 villes différentes (Rennes, Troyes, Aussois, Paris, Clermont-Ferrand, Grenoble, Puteaux, Tours, Villeurbanne, Lyon, Toulouse) et il a également participé au financement de **2 événements internationaux** ayant lieu en France (CPAIOR 2023 à Nice et SESO 2023 à Champs-sur-Marne).

Parmi nos activités, on peut souligner la participation au congrès ROADEF à Rennes (et de ses **635 participants** !). Les axes, actions transverses et groupes de travail du GDR y ont organisé 34 streams d'au moins une session chacun. **L'assemblée générale** du GDR a été l'occasion de présenter les projets de l'année 2023. Le GDR a proposé **4 tutoriels** à destination de tous et en particuliers des jeunes chercheurs : *Questionnements éthiques en recherche opérationnelle* avec Odile Bellenguez (LSN de Nantes), *Reinforcement Learning and Markovian Bandits* avec Bruno Gaujal (LIG), *Tools for graph partitioning and clustering* avec Alantha Newman (G-SCOP), *Polyhedra hidden behind min-max theorems* avec Roland Grappe (LIPN). Nous avons invité **4 retours d'expérience industrielle** : Saint-Gobain, N-Side, Sanofi Digital, Pasam Mobilty. Comme chaque année, a eu lieu une journée industrielle, à Lyon cette année, permettant des rencontres entre académiques et industriels sur *la programmation mathématique : solveurs, applications et retours d'expérience*. Tous les axes, groupes de travail ou actions transverses ont effectué au moins une réunion en 2023 : des séminaires, des discussions sous la forme de tables rondes, sessions ouvertes... Tout est accessible sur notre site <http://gdrr.rod.fr/>.

8 - Écoles doctorales et actions jeunes

Quatre écoles doctorales ont été organisées en 2023 dont l'école annuelle du GDR ROD dans le centre du CNRS à Aussois en collaboration avec le GDR RADIA sur la *Responsabilité sociale des algorithmes* avec le groupe ROET. Et trois écoles organisées par des groupes : *Emerging optimization methods: from metaheuristics to quantum approaches* par le nouveau groupe RO quantique; *apprentissage pour l'optimisation combinatoire et l'optimisation combinatoire dans l'apprentissage* par le groupe POC; et *Automatic Algorithm Design* par le groupe ATOM.

Plusieurs groupes mettent en avant les exposés de doctorants lors de leurs journées, comme lors des journées JPOC du groupe POC, ou lors des journées communes OPA et REST. A cette occasion, une présentation sur les débouchés après thèse (concours CNRS, MCF...) a été effectuée par Yannick Kergosien.

Et comme chaque année, le GDR a organisé le forum virtuel (sous gathertown) de rencontres entre étudiants de Master ou de Doctorat et des académiques ou industriels en vue de la recherche de stage, de thèse, de post-doctorat; les aides à la mobilité pour le financement de déplacement de doctorants ou post-doctorants: deux jeunes chercheurs ont été financés (1500€ chacun) pour des mobilités au Chili et en Ecosse (Ruiwen Liao - Doctorante au LISN et Gael Guillot - Post-doctorant au CRISTAL); et le prix de la meilleure thèse en transport et logistique 2023 organisé par le groupe GT2L avec 3 lauréats : le premier prix ex aequo pour Dorian Dumez et Faical Touzout, et le deuxième prix à Pengfei He.

9 - Actions et perspectives scientifiques

Il est à noter que le GDR ROD a répondu à différentes sollicitations du CNRS Sciences Informatique ou du CNRS directement: journée des correspondantes et correspondants Europe (grâce à Marc Sevaux); journées du GDR CIS (Science, Internet et Société) (grâce à Odile Bellenguez et Alexis Tsoukias); journée des correspondants Communication (avec Ayse Nur Arslan); journées des directrices et directeurs d'unités; des tables rondes "Ecoresponsabilité du numérique" et "quantique" aux journées des GDR de l'INS2I; des ateliers organisés par l'INS2I autour de l'intégration des jeunes chercheurs et chercheuses, Valorisation (grâce à Aziz Moukrim), Animation et perspectives sur des sujets transverses. Le GDR intervient à différents moments sur les discussions aussi diverses que l'AAP générique de l'ANR 2023, l'identification d'équipes dans le domaine des sciences informatiques éco-responsables, le

montage de projets collaboratifs dans les filières Eau ou santé avec la Direction des Relations avec les Entreprises du CNRS. Notons également qu'au travers du groupe ROSA, le GDR participe au PEPR Santé numérique.

Le conseil scientifique du GDR RO du 26 juin a été consacré à la prospective scientifique, avec 25 participants qui ont fait un bilan par actions, axes et par groupes de travail. Un document de prospective issu de cette journée est en cours de rédaction et sera publié en 2024. Nous comptons sur toutes les bonnes volontés pour que ce document soit utile à tous pour réfléchir aux futurs scientifiques de notre domaine.

10 - Quelques faits marquants en 2023

Plusieurs journées organisées par le GDR ont eu en 2023 un point de vue sociétal. C'est le cas de l'école sur la responsabilité sociale des algorithmes avec également des interventions dans le domaine des sciences humaines et sociales, dont le Droit. Ce thème reflète une préoccupation majeure de la société et la RO peut apporter des éléments de réponse et en retour se nourrir des réflexions pluridisciplinaires sur le sujet. La Journée Transition des systèmes alimentaires qui devait avoir lieu en 2023 avec le groupe ROES (et qui aura lieu début 2024), ou la conférence "Meaningful, Useful and Legitimate Information in Decision Making" par le groupe ROET avec des exposés mêlant d'autres disciplines dont la Politique Publique, l'Epistémologie et la Philosophie.

Le **prix Jean-Jacques Moreau 2023** est décerné à **Jérôme Malick** (LJK, Lab. Jean Kunzmann, Grenoble) pour ses résultats fondamentaux en optimisation non-lisse, optimisation robuste, et leurs applications industrielles. Les travaux de Jérôme avaient été distingués par le premier prix Robert Faure de la Roadéf en 2009, soulignant le potentiel de cette recherche et la force de l'interaction théorie/applications. Jérôme est un membre actif du GDR ROD et il co-anime l'axe DAAO. Le CNRS Sciences Informatiques propose **Ivana Ljubic** (ESSEC Business School) pour la **médaille d'argent CNRS 2023**. Son domaine aborde l'optimisation combinatoire en prenant en compte l'incertitude des données et l'optimisation bi-niveau, sous l'angle de la résolution de problèmes par les outils de la programmation mathématique entière, linéaire et non-linéaire. Elle est impliquée dans l'axe OCPE et le groupe POC.



ANNONCE

Le GDR a lancé depuis octobre 2022 une action de recensement via l'outil mygdr (déjà utilisé pour d'autres GDR). La campagne de recensement est toujours en cours et 428 personnes, dont 318 permanents, sont inscrites au 21 novembre 2023. Merci à tous de vous recenser !

<https://mygdr.hosted.lip6.fr/accueilGDR/6/10>

Congrès de la ROADEF

Un bilan du 25^e congrès de la ROADEF du 4 au 7 mars 2024 à Amiens

..... Pour le comité d'organisation, Corinne Lucet



Bilan de la 25^e édition de la conférence ROADEF 2024 Université de Picardie Jules Verne

Du 4 au 7 mars 2024, Amiens a accueilli la 25^e édition du congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF), organisé par l'Université de Picardie Jules Verne (UPIJV) et le laboratoire Modélisation, Information & Systèmes (MIS - UR 4290). Cet événement prestigieux a rassemblé 626 participants venus de divers horizons académiques et industriels parmi lesquels 237 permanents, 214 étudiants et 175 représentants du monde industriel. Ces rencontres ont permis d'échanger sur les dernières avancées et applications de la recherche opérationnelle et de l'aide à la décision, sous le soleil chaleureux de la Picardie.

Un programme scientifique riche et multidisciplinaire

Ce 25^e congrès de la ROADEF nous a offert un programme riche et diversifié, comprenant plus de 320 présentations réparties sur 87 sessions parallèles couvrant une large gamme de sujets, des développements théoriques aux applications pratiques dans des domaines variés comme la logistique, l'énergie, la santé, et les transports.

Quatre conférences plénières ont rythmé l'événement, chacune mettant en lumière des thématiques clés et des problématiques actuelles. Olivier Aumont et Marie-Alice Foujols nous ont présenté le GDR Labos Ipoint5 qui vise à comprendre et réduire l'impact environnemental des activités de recherche scientifique, soulignant l'importance de la transition écologique dans le monde académique. Carola Doerr, directrice de recherche au CNRS, a captivé l'auditoire avec une présentation sur les algorithmes d'optimisation boîte noire, offrant une vision claire des progrès réalisés dans la conception d'approches dynamiques et auto-adaptatives. Nadia Brauner a, quant à elle, exploré les liens entre RO

et société, notamment la manière dont cette discipline peut contribuer à des solutions durables dans des secteurs critiques. Enfin, Sébastien Destercke a examiné les défis posés par l'incertitude et l'imprécision des données en intelligence artificielle, un sujet crucial à l'ère du big data et de l'apprentissage automatique.

Le GDR ROD a joué un rôle clé dans l'organisation de la ROADEF 2024, en structurant le programme scientifique à travers les sessions proposées par ses groupes de travail. En organisant également plusieurs tutoriels, animés par des experts, qui ont permis d'explorer des thématiques variées, telles que l'identification dans les graphes, l'optimisation des circuits ou encore la gestion des préférences en décision collective.

Synergies entre le monde académique et industriel

Fidèle à l'ADN de la société ROADEF, l'édition 2024 a une fois de plus démontré sa capacité à créer des passerelles fructueuses entre le monde académique et le secteur industriel. Trois retours d'expérience

ont illustré cette synergie : Claude Le Pape-Gardeux, représentant Schneider Electric, a présenté des applications innovantes de la recherche opérationnelle pour optimiser l'efficacité énergétique, un enjeu crucial dans un contexte de transition écologique. Marwane Bouznif, pour l'entreprise Savoye, a présenté des solutions avancées en logistique, soulignant l'impact de l'optimisation sur la compétitivité et la durabilité des chaînes d'approvisionnement. Luc Libralesso, pour Alma Scop, a illustré comment la recherche opérationnelle contribue de manière significative à améliorer les processus de planification, en apportant des solutions concrètes aux défis organisationnels complexes.

La conférence a également offert une tribune à de nombreux doctorants travaillant en étroite collaboration avec des entreprises. Ces jeunes chercheurs ont présenté des travaux novateurs réalisés dans le cadre de leurs thèses, montrant comment l'intégration de la recherche en milieu industriel enrichit à la fois la science et les pratiques professionnelles.

Des thématiques ancrées dans les enjeux sociétaux

Cette 25^e édition a également mis en lumière la manière dont la RO s'adapte aux défis contemporains. Plusieurs sessions ont abordé les questions environnementales, éthiques et sociales, illustrant la volonté de la communauté de contribuer à un développement plus durable. La logistique durable

a été un thème récurrent, avec des discussions sur l'optimisation des transports, de l'énergie, de l'ordonnancement de tâches, etc. L'optimisation quantique a également pris une place importante dans les débats. Ce domaine émergent, exploré à travers plusieurs sessions, promet de révolutionner la résolution de problèmes combinatoires complexes grâce aux avancées en calcul quantique. D'autres sujets novateurs, tels que l'hybridation entre métaheuristiques et apprentissage automatique ou encore l'intégration des enjeux de résilience dans les chaînes logistiques, ont témoigné du dynamisme de la recherche en RO.

Un cadre convivial pour stimuler les échanges

Le congrès n'a pas seulement été un moment d'échange scientifique, mais aussi un espace de rencontre et de convivialité dont l'organisation fut assurée par un comité soudé et enthousiaste, composé de 36 personnes, dont 16 étudiants (doctorants et Master). Dès le premier soir, un cocktail de bienvenue à l'UFR des Sciences a permis d'entamer des discussions informelles dans une ambiance chaleureuse. Le dîner de gala, organisé aux Granges de Bel Air au milieu de la campagne Picarde, a été un autre moment fort de la conférence avec la remise des prix du mémoire Master, du meilleur article étudiant et du Challenge ROADEF.

En termes d'infrastructure, le Pôle Universitaire Cathédrale a offert des installations modernes et adaptées aux besoins de la conférence. Les salles de conférences, équipées pour accueillir un grand nombre de participants, ont permis une gestion optimale des nombreuses sessions parallèles. La proximité des lieux d'hébergement et des commodités d'Amiens a également été appréciée.

Remerciements

Nous adressons tous nos remerciements aux sponsors industriels pour l'intérêt qu'ils ont porté au congrès de la ROADEF 2024 et leur soutien financier : Artelys, Hexaly, Gurobi, RTE, TotalEnergies, DecisionBrain, Savoye, Huawei, ENGIE, Sanofi, FICO, SCNF, et Eurodecision. Leur présence témoigne de l'intérêt du secteur privé pour les outils et méthodes de la RO.

Nous remercions également l'Université de Picardie Jules Verne et le Laboratoire Modélisation, Information & Systèmes, pour leur soutien financier ainsi que leur aide précieuse dans la gestion administrative, financière et logistique du congrès. Nous remercions enfin Amiens Métropole pour son soutien financier.

Enfin, nous souhaitons un grand succès à la 26^e édition du congrès de la ROADEF !



Le congrès ROADEF 2025 à Champs Sur Marne : Soyez nombreux !

L'École nationale des ponts et chaussées organise la 26^e édition du congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision ROADEF 2025. Le comité d'organisation comprend des chercheurs du CERMICS et du LVMT.

Le congrès de la ROADEF est la plus grande manifestation francophone qui vise à réunir les chercheurs issus de divers laboratoires d'Optimisation Combinatoire, de Recherche Opérationnelle, de génie industriel. L'objectif est de favoriser les échanges et les collaborations entre chercheurs et industriels, mais aussi de participer à la formation des jeunes chercheurs qui sont fortement encouragés à présenter leurs travaux.

LE PROGRAMME SCIENTIFIQUE COMPREND :

- Sessions plénières et tutoriels
- Des sessions en parallèles
- Prix du Meilleur Article Étudiant
- Assemblée Générale de la ROADEF
- Réunion annuelle du GDR ROD

Nous serons très heureux de vous accueillir en présentiel les 26, 27 et 28 février 2025 sur le campus de l'École nationale des ponts et chaussées à Champs Sur Marne en région parisienne.



AU PLAISIR DE VOUS RENCONTRER À CHAMPS SUR MARNE !

Compte rendu de la première Journée Francilienne de Recherche Opérationnelle organisée en partenariat avec AIRO (Associazione Italiana di Ricerca Operativa)

Comité d'organisation :
Nawal BENABBOU, Diego DELLE DONNE,
Emiliano LANCINI, Alessandro MADDALONI



<https://www.roadef.org/jfro/index.php>

Cette édition des journées Franciliennes de Recherche Opérationnelle s'est déroulée le Vendredi 2 Février 2024. La journée s'est déroulée à l'Amphithéâtre Fabry Pérot, CNAM, 292 rue Saint-Martin 75003 Paris. Elle avait pour thème "Packing". Elle a accueilli 45 participants. 6 orateurs ont accepté de faire un exposé.

- François Clautiaux a réalisé un tutoriel rappelant les principaux résultats liés aux problèmes de bin packing, ses principales variantes et les algorithmes utilisés pour les résoudre, en se concentrant sur les techniques de programmation linéaire en nombres entiers. Il a présenté aussi les enjeux plus récents liés aux problèmes de bin packing, notamment l'intégration de contraintes pratiques, l'insertion dans des problèmes complexes, et la gestion de l'incertitude.

- Joseph Elang (Eurodecision) a présenté ses travaux sur le problème de bin packing en 3 dimensions appliqué au transport aérien de marchandises: il a montré plusieurs outils de modélisation des problèmes de bin packing (en particulier les différentes façons de regrouper les colis transportés), ainsi que des avancées récentes sur ces questions.

- L'après-midi a débuté par une présentation de André Rossi (Université Paris Dauphine - PSL) sur le bin-packing robuste, où les tailles sont incertaines. Il a décrit deux approches robustes basées sur le calcul du stability radius. Une décomposition de Dantzig-Wolfe est suggérée afin de fournir une reformulation de set-cover avec une relaxation linéaire plus forte. Il a présenté une méthode branch and price pour trouver des solutions entières et a examiné ses performances sur certains problèmes de la littérature.

- Liding Xu a discuté de submodular bin packing, où la fonction de capacité est sous-modulaire. Il a présenté un algorithme branch and price dont les sous-problèmes de price sont des problèmes de Knapsack sous-modulaires. Un algorithme exact de branch and cut adapté, basé sur une relaxation linéaire par morceaux, est utilisé pour les résoudre. Pour accélérer la génération de colonnes, une stratégie de pricing hybride est proposée. Les tests effectués montrent l'efficacité des méthodes (en réduisant les sauts de dualité).

- Florian Fontan a illustré d'abord le fonctionnement des méthodes de programmation non-linéaire à travers leurs applications aux problèmes de packing de formes irrégulières, à l'aide des solveurs FICO Xpress et ArtelysKnitro. L'accent a été mis sur les différences entre les approches locales et globales. Il a ensuite montré comment ces méthodes sont effectivement utilisées dans la littérature pour obtenir des résultats à l'état de l'art sur ces problèmes.

- Le dernier exposé par Spyros Angelopoulos portait sur le bin packing online avec prévisions. L'algorithme online est enrichi d'une prévision (potentiellement erronée) concernant la fréquence des tailles d'éléments dans la séquence. Il a analysé des algorithmes online qui présentent des compromis efficaces entre cohérence (competitive ratio en l'absence d'erreur de prévision) et robustesse (competitive ratio en cas d'erreur adverse). Il s'agit de la première étude théorique et expérimentale du bin packing online dans un contexte de prALedictions pouvant être apprises.

Les transparents des exposés de cette journée sont en ligne sur le site des JFRO.

ActuROAD Prix du Master 2023

..... Pour le bureau de la ROADEF, Olivier Péton

Comme chaque année, une session du congrès ROADEF 2024 a été dédiée aux présentations des finalistes du Prix de Mémoire de Master de la ROADEF, édition 2023. Cette distinction met en lumière le travail remarquable d'étudiants en deuxième année de master, dont les mémoires contribuent aux avancées des méthodes et applications en recherche opérationnelle et en aide à la décision. Le jury, composé d'experts issus du monde académique et industriel, a souligné l'excellente qualité des travaux soumis l'année dernière. Parmi 13 candidats, 5 ont été sélectionnés pour la phase finale.



Le premier prix a été décerné à **Seta Rakotomandimby** pour son mémoire intitulé «Perturbation-Duality Scheme in Combinatorial Optimization and Algorithms in Generalized Convexity». Le deuxième prix revient à **Mathis Azéma** pour son mémoire «Electric Vehicle Assignment Problem with Parking Constraints». Un grand bravo également aux autres finalistes : **Mathis Brichet**, **Abdellah Bulaich Mehamdi** et **Fares Chaouaki**, qui ont tous impressionné le jury par la qualité de leurs contributions. La ROADEF tient à remercier chaleureusement les membres du jury pour leur engagement : **Simon Belières**, **Alexandre Marié**, **Juliette Pouzet**, **Margaux Nattaf**, **Olivier Péton**, **Anna Robert**, **Marie-Claude Portmann**

et **Manuel Ruiz**. Leur travail permet à cette compétition de valoriser l'excellence et la créativité des jeunes talents en recherche opérationnelle. L'édition 2024, présidée par **Murat Afsar**, s'annonce prometteuse, avec 16 candidats en lice.

À noter une évolution dans le règlement cette année : pour ouvrir davantage le prix, deux catégories seront désormais récompensées, l'une pour les contributions théoriques et l'autre pour les applications en recherche opérationnelle et aide à la décision. Rendez-vous au congrès 2025 pour découvrir les lauréats !

Challenge ROADEF/EURO

..... Par Eric Bourreau, Safia Kedad-Sidhoum et David Savourey

Problème de chargement de camions - Renault Group

Petit retour sur le challenge ROADEF/EURO 2022-2024 qui a été lancé le 2 juillet 2022 lors de la conférence internationale EURO 2022 qui s'est déroulée à Espoo (Finlande) et qui s'est achevé par la remise du prix scientifique en mars 2024 lors de la conférence ROADEF 2024 à Amiens !

Le porteur industriel pour cette édition est le constructeur automobile **Renault Group**. Le problème portait sur l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement de Renault. Celui-ci vise l'optimisation du taux de remplissage des camions livrant des pièces, des fournisseurs aux clients, pour minimiser les coûts logistiques de transport et de stockage. Ce problème s'apparente à un problème de packing en recherche opérationnelle. Ce dernier est à trois dimensions et intègre de nombreuses contraintes additionnelles, de nature temporelle ou liées au placement des produits dans les camions. La chronologie et les résultats des principales étapes de la compétition sont présentés ci-dessous.

Le sujet a été dévoilé à la conférence EURO 2022 ainsi que les règles de fonctionnement de la compétition. Un premier jeu d'instances a été mis à disposition ainsi qu'un vérificateur de solutions et un outil permettant de les visualiser.

Le premier jalon de cette compétition a été marqué par la fin de la phase de sprint le 15 octobre 2022. Les résultats ont été annoncés le 30 octobre 2022. Les vainqueurs de cette phase sont Guillaume Crognier et Victor Kani. Ils ont reçu un prix de 2500 euros qui leur a été remis lors du congrès ROADEF 2023 qui a eu lieu à Rennes en février 2023.

Le point d'étape suivant de la compétition est la fin de la phase de qualification fixée au 31 janvier 2023. Les vainqueurs de cette phase sont Florian Fontan et Luc Libralesso, une des équipes françaises senior de la compétition. Ils ont reçu un prix de 5000 euros lors du congrès ROADEF 2023 à Rennes.

A l'issue de cette phase de qualification, 51 équipes (20 juniors, 31 seniors) représentant 116 participants issus de 21 pays différents (dont des nouveaux, comme l'Australie, l'Inde ou la Kosovo) étaient inscrites. L'équipe organisatrice en a retenue 15 pour poursuivre la compétition en phase finale.

L'annonce des équipes finalistes a également été faite lors du congrès ROADEF 2023 à Rennes. A l'issue de la phase de qualification,

Le point d'orgue de la compétition est la phase finale qui s'est achevée le 15 juin 2023. Les résultats de cette phase ont été annoncés à la conférence IFORS 2023, Florian Fontan et Luc Libralesso se sont hissés à la première place du classement final toutes catégories confondues (prix 10000 euros) et Rick Willemsen, Bart van Rossum (équipe des Pays-Bas) ont remporté le prix junior de la compétition (prix 5000 euros).

La dernière étape du challenge est le prix scientifique. Celui-ci est ouvert à toute équipe ayant été inscrite à la compétition. Le comité, présidé par Michele Monaci, évalue des articles (d'au-plus 12 pages) soumis par les équipes participantes. Ces derniers doivent contenir tous les éléments nécessaires pour évaluer la qualité et l'originalité de la méthode proposée pour résoudre le problème posé. Le lauréat du prix scientifique a été dévoilé lors de la conférence ROADEF 2024 à Amiens. Il s'agit de l'équipe junior de Jakob Schulte et Daniel Wetzel (Allemagne).

A la suite du challenge, l'équipe Renault a organisé au siège du Plessis Robinson (92) un séminaire avec les quatre premières équipes senior Fontan/Libralesso, Cainiao (en distanciel), Ortec, Kani/Crognier. Les échanges ont été riches et transparents avec la présentation par chaque équipe de sa méthode de résolution et la présentation par Renault de son outil interne, opérationnel depuis 2020 pour la résolution du problème proposé dans le cadre du challenge.

Toutes les équipes ont adopté une approche en deux phases, une première pour affecter les demandes de livraison aux camions en respectant uniquement la charge utile et le volume du camion, une seconde pour calculer précisément le plan de chargement 3D de chaque camion. La première phase est généralement réalisée avec un programme linéaire en nombres entiers, la deuxième phase avec une méta-heuristique. L'équipe RO de Renault s'est inspirée de cette approche en deux phases pour implémenter des évolutions de son outil interne, ce travail est toujours en cours. Par ailleurs, l'équipe Renault a présenté un retour d'expérience du challenge 2022-2024 (ainsi que de deux autres challenges organisés précédemment) en interne et auprès des entreprises du club des industriels de la RO. Renault adopte en effet une démarche consistant à organiser des challenges pour évaluer ses outils internes, aboutissant à chaque fois à des améliorations des outils opérationnels.

Toutes les informations relatives à cette édition sont en ligne sur le site dédié à la compétition (<http://challenge.roadef.org>).

L'équipe Challenge ROADEF: Eric Bourreau (LIRMM/UM), Safia Kedad-Sidhoum (CEDRIC/CNAM) et David Savourey (HEUDIASYC/UTC).
L'équipe Challenge Renault Group: Alain Nguyen, Mohamed-Amine Khatouf et Christian Serrano.

Derniers évènements soutenus par la ROADEF

- École d'hiver Internationale en Programmation Par Contraintes 2024,
- Dataquitaine 2024,
- JFRO,
- Euromicro 2024,
- Journée scientifique du GT-Origin,
- Journée scientifique du GT-OR



Sprint



Qualif



Post challenge

citROnnADe Énigme



..... Par Denis Cornaz

Sur un cercle de diamètre $d=2r$, on considère deux points, A et B , diamétralement opposés, et un troisième point C tel que la distance $BC=6$ est supérieure à $r\sqrt{2}$ (et inférieure à d). On note C' le projeté orthogonal de C sur le segment $[AB]$. On note C'' et B'' les points formant un rectangle $BB''C'C''$ tel que la droite $(B''C'')$ est tangente au cercle, et tel que C'' appartient au segment $[C'C]$.



Solution Énigme

(Bulletin OnTheROAD n°45)



D'après Denis Cornaz

1,1,2,2,3,4,5,7,9,12,16,21,28,37,49,65,86,114...

La fameuse suite de Picoucci, l'ancêtre italien de Picou !

Quand on a x dollars, on peut faire expertiser le plus gros tas qu'il est possible de certifier avec $x-600$ dollars, et s'il ne contient pas la fausse pépite, on certifie le tas restant s'il n'est pas plus grand que le plus gros tas qu'il est possible de certifier avec $x-400$ dollars. Ainsi le plus gros tas possible a $g(x) = g(x-600) + g(x-400)$ pépites, avec $g(x)=1$ pour $x < 600$. Ou encore, $g(200n) = g(200(n-3)) + g(200(n-2))$ pour les sommes de $x=200n$ dollars. La suite $u(n)$ de Picoucci est justement définie récursivement par $u(n) = u(n-2) + u(n-3)$ avec $u(0)=u(1)=u(2)=1$. Puisque $u(17)=86$ et $u(18)=114$, pour faire certifier un tas de 100 pépites il faut 3600 dollars.

amanora
technologies

Artelys
SOLUTIONS EN OPTIMISATION

Cédric
le cnam

DecisionBrain™
Smarter Decisions. Better Results.

DGA

edf

EURODECISION
ALGORITHMS FOR BUSINESS

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

heudiasyc

LAAS
CNRS

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

LARIS

LIFAT EA 63 00
LABORATOIRE D'INFORMATIQUE FONDAMENTALE ET APPLIQUÉE DE TOURS

LIMOS

Lip6

LS2N
LABORATOIRE DES SCIENCES
DU NUMÉRIQUE
DE NANTES

orange™

hexaly

Rte
Le réseau
de transport
d'électricité

SIAPARTNERS

TotalEnergies

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



YouTube

ROADEF

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