



**Recherche Opérationnelle
pour l'aide à la décision
sur la gestion de crise sanitaire
et la logistique de santé**

Christian Artigues¹, Nadia Brauner¹, François Clautiaux², Pierre Fouilhoux¹,
Thierry Garaix^{1,3}, Yannick Kergosien^{1,3}

¹ GDR 3002 Recherche Opérationnelle

² ROADEF - Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision

³ Groupe de Travail « Recherche Opérationnelle et Santé »

Version 1.0 – 23 avril 2020

Table des matières

1	Introduction	4
2	Catégories de problèmes résolus par des approches de RO	5
3	Projets en lien avec la crise COVID19	7
3.1	SPF : un outil d'aide à la décision pour l'installation stratégique de ressources	7
3.2	APPRO : Planification des approvisionnements des matériels nécessaires aux soignants et aux patients dans le cadre de la lutte contre le covid-19 l	8
3.3	REAFLUX : Gestion des Approvisionnement en matériel médical	8
3.4	Planification et dimensionnement dans les centres d'appels d'urgence	9
3.5	Planification des interventions à domicile / des tests de dépistage	10
3.6	Gestion des lits d'aval des urgences	10
4	Mise à disposition de support et d'outil par les industriel de la RO	12
4.1	Atoptima	12
4.2	LocalSolver	12
4.3	Mapotempo	12
4.4	Air Liquide	12

Chapitre 1

Introduction

Beaucoup de chercheurs en Recherche Opérationnelle (RO) souhaiteraient mettre à disposition leurs compétences en modèles mathématiques et méthodes algorithmiques pour, d'une part, aider à court terme dans la mesure du possible à la résolution de problèmes de logistique, de planification, d'allocation de ressource rencontrés dans cette situation de crise par les institutions médicales et, d'autre part à plus long terme mener les recherches nécessaires à l'amélioration de la gestion de ces situations pour les crises futures.

La Recherche Opérationnelle ou science de l'Aide à la Décision est situé au confluent des Mathématiques Appliquées, de l'Informatique et de la science des données¹. C'est une discipline qui vise, à partir d'un problème de décision à formuler le problème sous forme mathématique et à concevoir des algorithmes (ou à sélectionner le bon algorithme parmi les algorithmes déjà disponibles pour les modèles mathématiques usuels) pour proposer des solutions/décisions qui respectent un ensemble de contraintes et visent à optimiser un ou plusieurs objectifs.

Le milieu de la santé présente de nombreux problèmes d'organisation, de planification, de dimensionnement, et surtout d'optimisation. Ces problèmes sont généralement liés à la gestion des ressources, comme par exemple les lits, les blocs opératoires, les véhicules (ambulances ou camions de logistique), les stocks de matières ou de produits ou encore les ressources humaines. Ils se posent souvent comme des problèmes d'aide à la décision et peuvent être résolus par des techniques scientifiques issues de la Recherche Opérationnelle (RO) afin de fournir des outils informatiques d'aide à la décision qui permettront une bonne gestion des ressources. En France, plusieurs équipes de recherche en RO se sont intéressées à des problèmes d'optimisation bien précis et complexes en raison du contexte (nombreuses contraintes métiers à prendre en compte, paramètres stochastiques des modèles, la nécessité d'obtenir des solutions robustes face aux aléas, etc.), y-compris dans des situations de crise.

Pour un objectif d'aide à la décision à court terme, si les besoins sont clairement exprimés et les données disponibles, il est possible de développer en quelques jours / semaines, certains outils pouvant être utiles dans ce domaine.

Ce rapport présente les projets, outils et compétences liés à la Recherche Opérationnelle et en lien avec la crise sanitaire du COVID 19. Dans le chapitre 2, nous établissons une synthèse des catégories de problèmes

1. Voir le site du GDR Recherche Opérationnelle du CNRS <http://gdrro.lip6.fr> et celui de l'association ROADEF (Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision) <https://www.roadef.org/societe-francaise-recherche-operationnelle-aide-decision>

Chapitre 2

Catégories de problèmes résolus par des approches de RO

Parmi les études, RO et Santé, on retrouve des compétences et projets de recherche liés aux :

- **Problématiques de logistique** comme l’optimisation des transports de patients ou des transports de bien, ou encore de gestions des stocks et d’approvisionnements en médicament ou matériel médical, ou encore déploiement d’hôpitaux de campagne.

Techniques utilisées : Les techniques de RO utilisées relèvent de problèmes de flots dans les réseaux, de la programmation linéaire en nombres entiers, l’optimisation robuste pour faire face aux incertitudes sur le nombre de patients, des algorithmes exacts et approchés de tournées et de localisation.

Exemples de Projets et compétences : Un projet a été déposé à l’Appel de l’Agence de l’Innovation de Défense par Jean Charles Billaut (LIFAT, Tours) en collaboration avec le LAAS de Toulouse et le CHU de Tours sur la gestion des approvisionnements en matériel médical, notamment des masques, avec une problématique au niveau national (distribution du matériel aux ARS) et régional (distribution du matériel depuis les ARS / CHU et les centres locaux (officines, EHPAD...). Des compétences et des outils sont également opérationnels pour le déploiement d’hôpitaux de campagne de par la réalisation par d’Andrea Cynthia Santos (LITIS, Le Havre) d’algorithmes d’optimisation robuste pour l’aide au déploiement d’hôpitaux de campagnes pendant le tremblement de terre de Katmandou en 2015.

- **Problématiques dimensionnement et gestion des ressources humaines** comme le dimensionnement des équipes de soins, la planification des horaires et quart de travail du personnel de santé, ou encore l’affectation et le calcul des itinéraires des personnels pour les soins à domicile ou les tests de dépistage.

Techniques utilisées : On retrouve la programmation linéaire en nombres entiers, les algorithmes de tournées mais aussi la programmation par contraintes et les algorithmes issus de la coloration de graphes.

Exemples de Projets et compétences : Un projet est proposé par Frédéric Semet (CRISTAL, Lille) sur l’Optimisation de la logistique d’une flotte de centres de soins mobiles pour la pratique massive de tests covid-19. Un projet a été déposé en Espagne par Franco Peisheira, Supaéro, Toulouse, pour aider à planifier les horaires des médecins, infirmières et tout le personnel sanitaire en général

pour les hôpitaux en Espagne de façon à mieux utiliser les ressources humaines. Notamment la planification des astreintes et des temps de repos est une problématique critique.

- **Problématiques de production** comme la planification de la production de médicaments spécifiques et à la demande (ex. chimiothérapies) ou la planification des opérations de stérilisations de matériel médical.

Techniques utilisées : Programmation linéaire, programmation dynamique, algorithmes exacts et approchés d'ordonnancement, prise en compte des aléas, propositions de solutions robustes (résistantes aux aléas)

Exemples de projets et compétences : Un projet a été déposé au LIMOS, EMSE, Gardanne en collaboration avec l'ARS Auvergne-Rhône-Alpes, la Préfecture de la Loire et le CHU de Saint-Etienne pour l'intégration de la gestion des approvisionnements et de la gestion de production (masques, ...) avec localisation des besoins et des sites potentiels de production via un système existant de SIG.

- **Problématiques d'organisation de la gestion des patients**, des urgences ou encore des parcours de patients de manière générale.

Techniques utilisées : algorithmes exacts et approchés d'ordonnancement, programmation par contraintes, prise en compte des aléas, propositions de solutions robustes (résistantes aux aléas), réoptimisation, couplage de la théorie des files d'attente aux algorithmes d'affectation.

Exemples de projets et compétences : Un projet lié au dégagement de ressources est proposé par Thierry Garaix (LIMS, EMSE, Gardanne) en collaboration avec le GHT Saône-Et-Loire Bresse Morvan sur la problématique de dégagement des ressources lors du redéploiement des ressources en fin d'épidémie : quels blocs opératoires réallouer en fonction des besoins urgents. Ce projet vise à coupler la théorie des files d'attente à des algorithmes d'affectation de ressources. D'autres besoins ont été identifiés, comme l'engorgement des centre d'appels du SAMU qui peuvent être abordés par différentes techniques. Des projets passés impliquent Elyes Lamine (Centre Jean Champollion, EM Albi) et différents SAMU.

- **Problématique de la gestion de crise (à plus long terme)** Réflexion moyen terme sur les décisions stratégiques en gestion de crise. Gestion des pénuries de produits essentiels, Prise de décision/planification dans l'incertain, Simulation de l'impact de décisions sur la diffusion des virus, Analyse du déconfinement, Proposition de solutions en cas de catastrophes climatiques/géologiques

Techniques utilisées : simulation objet, flots dans les réseaux, algorithmes de graphes, réseaux bayésiens

Exemples de projets et compétences (pour le moment hors domaines médicaux) : Diffusion de virus informatique, Diffusion d'algues sur la côte d'Azur David Hill LIMOS, Université de Clermont-Ferrand, Impact d'une décision d'ouverture/fermeture de voies urbaines (simulation objet Jean-Daniel Kant) LIP6, Sorbonne Université. Décisions en cas de catastrophes géologiques (Hande Yaman, Université de Louvain).

Chapitre 3

Projets en lien avec la crise COVID19

Ci-dessous une liste de projets de chercheurs en RO en lien avec la crise sanitaire est fournie.

3.1 SPF : un outil d'aide à la décision pour l'installation stratégique de ressources

Contexte

Outil opérationnel proposé par l'Université du Havre

Description

La logistique est un pilier important pour les interventions dans le cadre de crises, qui ne frappent pas une population d'une façon homogène. Dans ce contexte, avoir des outils d'optimisation et d'aide-à-la-décision permettant de bien positionner des ressources stratégiques est un atout majeur, notamment pour l'efficacité de l'aide humanitaire à apporter. Ceci prend encore plus de sens dans une crise sanitaire, où le rythme de propagation des maladies peut mettre à rude épreuve les systèmes de santé.

SPF (Strategical Positioning of Facilities) est un outil d'aide à la décision, opérationnel, qui fournit des solutions optimisées et adaptées à des crises sanitaires. Notamment, des installations pour appuyer la population et les cycles décisionnels lors de crises sanitaires, à savoir : (i) des installations stratégiques pendant la crise en utilisant des structures existantes pour le triage de patients (entre autres gymnases, ...) ou non (tentes médicalisées, emplacement de stocks stratégiques, ...); (ii) des installations stratégiques au moment de la sortie de la crise. Par exemple, SPF permet de calculer les meilleurs emplacements pour réaliser des tests massifs de dépistage qui peuvent être mis en place en considérant des structures existantes (postes de santé des universités, gymnases, ...) et non-existantes (tentes de dépistage, tentes type *drive*); (iii) un autre cas d'usage correspond à l'installation de centres de quatorzaine qui pourront héberger des personnes contaminées souhaitant rester éloignées de leur foyer, limitant ainsi la création de nouveaux clusters. SPF recherche, parmi les nombreuses solutions possibles, celles qui permettent l'atténuation des tensions engendrées par le manque d'accès aux soins, de favoriser l'accessibilité, de minimiser les déplacements de population et de minimiser le temps pour dépister toute la population, ou une partie (un échantillon représentatif) de la population. SPF fournit une solution pour chacun de ces critères séparément.

Contact

Andréa Cynthia Santos Duhamel – LITIS / ISEL – andrea-cynthia.duhamel@univ-lehavre.fr.

3.2 APPRO : Planification des approvisionnements des matériels nécessaires aux soignants et aux patients dans le cadre de la lutte contre le covid-19 1

Contexte

Proposition de projet incluant LIFAT (Univ. Tours), LAAS-CNRS, CHU Tours

Description

La crise sanitaire inédite que nous vivons soulève des questions liées à la nature même du virus et à son traitement, abordées par les spécialistes en virologie et épidémiologie, mais elle soulève également des problèmes de nature organisationnelle. La logistique des approvisionnements est une thématique scientifique largement étudiée dans les domaines que sont l'informatique, les mathématiques ou les sciences de gestion et qui relève de la recherche opérationnelle. En période de conflit armé, les questions de la logistique des ravitaillements du front sont traitées par les régiments du Train de l'Armée de Terre. L'équipe SARO (Section d'Analyse et Recherche Opérationnelle de l'Etat-Major de l'Armée de Terre EMAT/SARO) est familiarisée avec ces problèmes et pourrait servir de relais pour la mise en œuvre opérationnelle de ce projet. Le projet consiste à développer une solution technologique pour aider à prendre les décisions liées à l'organisation des ravitaillements en matériels, au niveau national. S'il le fallait, si une coopération internationale pouvait se mettre en place, cet outil permettrait également d'aider à organiser les ravitaillements à une échelle internationale.

Contact

Jean Charles Billaut – LIFAT-ROOT / Univ. Tours – jean-charles.billaut@univ-tours.fr

3.3 REAFLUX : Gestion des Approvisionnement en matériel médical

Contexte

Proposition de Projet incluant LIMOS/EMSE, CHU de Saint-Etienne, hôpital de Chalon sur Saône, EOVI Santé et Services

Contenu

Les hôpitaux accueillant des patients atteints du COVID-19 ont mobilisé grâce au plan blanc un maximum de ressources en soins intensifs et hospitalisation. Notamment, des blocs chirurgicaux ont été affectés aux patients COVID pour bénéficier du matériel d'assistance respiratoire. Les patients vivent des parcours différents pouvant nécessiter plusieurs séjours en unité de soins critiques. A partir des taux d'évolution de l'état de santé des patients (rétablissement, guérison, complication ou décès) et des arrivées de patients contaminés, il est possible d'estimer l'occupation des lits dans chaque service. L'incertitude sur ces données est prise en compte dans un modèle de simulation à événements discrets qui prend en paramètres des distributions de probabilité construites à partir des données récoltées quotidiennement. Un intervalle de confiance sur les niveaux de charge calculés par unité sont aussi obtenus en fonction de la variance des données récoltées et du nombre de simulations effectuées. La force de ce modèle est de n'utiliser que peu de paramètres d'entrée (moyennes d'entrées journalières, moyennes de durées de séjours, moyennes de décès par jour,...) qui sont facilement récoltables à la fin de chaque journée. Les lois de distribution construites sur ces données s'affinent aussi au fil du temps. Un outil prototype (programme en langage C++) est déjà développé par l'Ecole des Mines de Saint-Etienne avec le CHU

de Saint-Etienne pour répondre à ces questions avec les premières données disponibles. Cet outil permet de projeter une libération des ressources en appliquant différents scénarios de flux d'arrivée de patients COVID-19. Notamment pour anticiper comment réaffecter les ressources à des patients NONCOVID quand l'afflux de patients contaminés commencera à réduire.

Contact

Thierry Garaix – LIMOS/EMSE – garaix@emse.fr

3.4 Planification et dimensionnement dans les centres d'appels d'urgence

Contexte

Deux projets sont concernés

[P1] Collaboration entre l'équipe de recherche Tropical (INRIA et CMAP, École polytechnique, IP Paris, - UMR CNRS 7641) et les SAMU de l'APHP (départements 75, 92, 93 et 94).

[P2] Collaboration entre Dpt Génie Industriel de l'IMT Mines d'Albi et les SAMU 31 ;12 ;81 et 44, 35,56

Description

Une des difficultés rencontrés par les services d'urgence dans la crise actuelle est l'engorgement de gestion des appels au SAMU notamment la priorisation des demandes en fonction de l'urgence de l'appel, il s'agit de résoudre en temps réel des problèmes d'ordonnancement et d'allocation de ressources avec de fortes composantes stochastiques.

Les deux projets recensés utilisent différentes techniques de simulation pour d'une part étudier les phénomènes d'engorgement et d'autre part déterminer les allocations de ressources humaines permettant d'éviter ces engorgements.

- Pour le projet P1, l'équipe Tropical développe, depuis Janvier 2019, une collaboration avec les SAMU de l'AP-HP (départements 75, 92, 93 et 94). Cette collaboration répond à des besoins de métrologie des CRRA (Centres de réception et de régulation des appels), c'est-à-dire des centres qui décrochent le 15. Elle a permis de réaliser des outils d'aide au dimensionnement. Ce travail s'est intensifié depuis le 13 Mars 2020, dans le cadre de la crise Covid-19. Des études de dimensionnement adaptées à ce contexte ont été rendues. Des indicateurs précoces d'évolution de l'épidémie ont aussi été élaborés, en collaboration avec les médecins de ces quatre SAMU et de leur coordination. Le travail de dimensionnement repose sur des modèles des réseaux de Petri, et s'appuie sur la géométrie tropicale. Celle-ci permet de calculer analytiquement un diagramme de phase, et ainsi d'anticiper la charge du centre en cas de pic d'appels. Elle permet aussi de comparer les bénéfices de différentes organisations proposées par les médecins. Un premier compte rendu de ce travail est donné dans l'article : "Piecewise Affine Dynamical Models of Timed Petri Nets – Application to Emergency Call Centers", Xavier Allamigeon, Marin Boyet, et Stéphane Gaubert, à paraître dans les actes de la conférence Petri Nets (Paris, Juin 2020), voir <https://arxiv.org/abs/2004.09483>. Signalons aussi que ce travail avec les SAMU a bénéficié de l'expérience acquise au cours d'un travail mené depuis 2014 avec la direction de programme de la plate forme d'appels d'urgences – PFAU (17-112-18) de la Préfecture de Police, en lien avec la BSPP et la DSPAP. Voir notamment "Dynamics of a two-level system with priorities and application to an emergency call center", Vianney Boeuf, thèse de l'École polytechnique, Décembre 2017.
- Le projet P2 se base sur la simulation à événements discrets et étudie l'impact des compétences multiples des opérateurs sur le temps et la qualité de la réponse. Les techniques utilisent du

Process Mining, du Data Mining, de l'Ingénierie dirigée par les modèles et de la Simulation à événements discrets¹

Contacts

[P1] Stéphane Gaubert Inria Saclay CNRS UMR 7641 – Stephane.Gaubert@inria.fr

[P2] Elyes Lamine et Franck Fonatnili – IMT Mines d'Albi – elyes.lamine@univ-jfc.fr, franck.fontanili@mines-albi.fr

3.5 Planification des interventions à domicile / des tests de dépistage

Contexte

Deux projets ont été recensés pour le contexte des interventions à domicile ou des tests mobiles de dépistage.

- Outil développé par le département de Génie Industriel de l'IMT mines d'Albi avec un partenaire industriel spécialisé dans les secteurs de la santé et du médico-social (société Berger Levrault)
- Projet du CRISTAL sur l'optimisation de la logistique d'une flotte de centre de soins mobiles

Description

La coordination des interventions à domicile s'avère être une problématique d'actualité. Il y a un vrai besoin d'optimisation et de sécurisation des tournées des soignants à domicile et voire même des ambulanciers, avec des prises de décisions quasiment en temps réel et sous incertitude (projet P1). Les techniques utilisées sont

- L'ingénierie dirigée par les modèles pour transformer un plan de soins (vue patient qui est spécifiée par un DSL) en un plan d'intervention (vue intervenant qui est formulée en OPL)
- Recherche opérationnelle (Programmation linéaire + Méta-heuristique)
- Simulation (pour étudier la robustesse des solutions face à certains aléas)

On se reportera à <https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-02525862v1> et <https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-02415431v1> Par ailleurs le projet P2 considère l'optimisation de la logistique d'une flotte de centres de soins mobiles pour la pratique massive de tests covid-19 (sur le modèle des camions des EFS pour le don du sang, mais en version massive).

Contact

[P1] Elyes Lamine, Franck Fonatnili – IMT Mines d'Albi – elyes.lamine@univ-jfc.fr, franck.fontanili@mines-albi.fr

[P2] Frédéric Semet – CRISTAL/ECL – frederic.semet@centralelille.fr

3.6 Gestion des lits d'aval des urgences

Contexte

Collaboration entre Dpt Génie Industriel de l'IMT Mines d'Albi et la DGOS et CH Perpignan (site pilote)

1. <https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-01945328>

Description

Connaître la disponibilité et la localisation des lits dans les services à l'échelle d'un GHT afin de minimiser les temps d'attente des patients et de minimiser le temps passé par les personnels à chercher/négocier des lits. Le projet consiste à la mise en place d'un Double Numérique pour piloter d'une part les flux de patients en temps réel et pour prédire et anticiper le besoin en lits en fonction des admissions effectives et de l'évolution du parcours des patients lors de leur prise en charge et d'autre part pour notifier et guider les soignants (via smartphone ou tablette) vers leurs patients quel que soit le service d'hospitalisation. ref : <https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-02292836>

Contact

Franck Fonatnili – IMT Mines d'Albi franck.fontanili@mines-albi.fr

Chapitre 4

Mise à disposition de support et d'outil par les industriels de la RO

Certains éditeurs de logiciels mettent gracieusement leurs outils d'optimisation et un support à tous ceux qui souhaitent aider les autorités gouvernementales et hospitalières pour faire face à la crise sanitaire. D'autres entreprises participent à la lutte contre le Covid 19 en mettant leurs compétences à disposition. Nous avons recensé ci-dessous quelques unes de ces entreprises et la nature de leur participation.

4.1 Atoptima

Atoptima (<https://www.atoptima.com>) apporte gracieusement son expertise en optimisation des tournées et planification des opérations pour mettre en œuvre son outil logiciel d'organisation du transport sanitaire auprès des acteurs de la crise du Covid-19.

(voir https://www.dropbox.com/s/0ijo0e0yt713ctl/CP_Atoptima_Solidarite_Coronavirus.pdf?dl=0)

Contact

François Vanderbeck – fv@atoptima.com

4.2 LocalSolver

LocalSolver (<https://www.localsolver.com/>), société éditrice du solveur du même nom offre des licences et du support utilisateur.

Contact

Frédéric Gardi – fgardi@localsolver.com

4.3 Mapotempo

Dans le cadre de la crise sanitaire du Covid-19, Mapotempo éditeur de logiciels de planification de tournées (<https://www.mapotempo.com>) souhaite apporter sa contribution et met gratuitement à disposition sa solution d'optimisation de tournées :

- pour les associations effectuant des tournées de livraison à domicile pour les plus fragiles (portage de repas, courses...),
- les organisations qui effectuent des tournées de soin à domicile.

Il est possible de réaliser cette demande sur cette page : <https://bit.ly/3a8vqM0>

Contact

Gwénaél Rault – gwenael.rault@mapotempo.com

4.4 Air Liquide

Air Liquide utilise de la RO pour lutter contre le Covid notamment pour la prédiction des consommations d'oxygène dans les hôpitaux

Contact

Jean André – jean.andre@air-liquide.com