



HAL
open science

Analyses de stratégies de dépistage dans la lutte contre la COVID-19

Guilhame Dageons, Andréa Cynthia Santos

► **To cite this version:**

Guilhame Dageons, Andréa Cynthia Santos. Analyses de stratégies de dépistage dans la lutte contre la COVID-19. Cahiers de la logistique, 2020, La logistique de crises sanitaires, 1, pp.1-12. hal-03155532

HAL Id: hal-03155532

<https://hal.science/hal-03155532v1>

Submitted on 1 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



La logistique de crises
sanitaires

**PÔLE INGÉNIEUR
LOGISTIQUE
LE HAVRE NORMANDIE**

**CAHIERS DE LA
LOGISTIQUE**



CAHIERS DE LA LOGISTIQUE

CL2020 – N° 01

LA LOGISTIQUE DE CRISES SANITAIRES

Novembre, 2020
Copyright © 2020, ISEL - SFLog



La présente publication est protégée par le code de la propriété intellectuelle et plus précisément ses articles relatifs au respect du droit d’auteur.

Les auteurs demeurent seuls responsables du contenu de leur œuvre. Ils garantissent disposer des autorisations nécessaires de la part des tierces parties titulaires de droits sur des œuvres partiellement ou globalement reproduites. Les droits moraux et patrimoniaux sur l’œuvre demeurent attachés à leurs auteurs. Afin de faciliter le partage et l’utilisation de leur création, les auteurs autorisent les utilisateurs à :

- Télécharger et imprimer une copie de la présente publication à des fins d’études, de recherche, de diffusion de la culture scientifique et de partage des connaissances ;
- Distribuer gratuitement et sans aucune contrepartie l’URL identifiant la publication.

La présente publication, et l’URL associée ne peuvent en aucun cas être distribuées ou utilisées dans le cadre d’une activité à but lucratif ou à des fins commerciales. Aucune modification du contenu de l’œuvre n’est autorisée.

PREFACE

Nous avons le plaisir d'éditer le premier volume indexé des « Cahiers de la logistique », antérieurement appelé de « Cahiers du campus de la logistique ». Ces publications sont une initiative conjointe de l'Institut Supérieur d'Etudes Logistiques (ISEL) et de la Structure Fédérative de recherche en Logistique (SFLOG) de l'Université Le Havre Normandie (ULHN), avec l'appui du Service Commun la Documentation (BU-SCD) d'ULHN. L'objectif majeur est de diffuser des réflexions, des avancés et des innovations autour de la logistique auprès des élèves, des acteurs du milieu socio-économique, des chercheurs et de toute personne intéressée par cette thématique.

Ce premier volume indexé est dédié à la logistique de crise sanitaire. En effet, depuis le début de la crise sanitaire liée à la COVID-19, divers pays ont été confrontés à des problèmes majeurs de logistique, tels que la gestion des stocks de matériel de protection (masques, blouses, lunettes, etc), des tests de dépistages, de la mobilité et de ses effets sur la propagation du virus, entre autres. Très vite, la logistique est apparue aux yeux de tous comme un pilier incontournable de la gestion de cette pandémie. Dans ce contexte, ce volume aborde deux problématiques logistiques liées à la crise de la COVID-19 :

- La première contribution, de M. Dageons et Pr. Santos, porte sur les stratégies de dépistages. L'objectif est d'analyser les impacts d'un dépistage en fonction de la dynamique de l'épidémie et en utilisant des indicateurs tels que le nombre total de patients non-testés, le nombre de jours de rupture, le nombre de patients symptomatiques non-testés et de patients issus de clusters non-testés.
- La deuxième contribution, de M. Le Galloudec, Pr. Bertelle et Pr. Aziz-Alaoui, est dédiée à la modélisation et l'extension d'un modèle épidémiologique, afin de prendre en compte plusieurs aspects importants d'une crise sanitaire, tels que le confinement et la capacité d'accueil dans les hôpitaux. Les auteurs considèrent également la mobilité entre régions ou départements et les impacts sur la propagation de la maladie.

Nous apportons dans ce volume une dimension logistique à la gestion de la crise sanitaire et espérons que ces contributions apporteront leur part de réflexions dans le cadre des crises sanitaires. Nous profitons pour remercier l'appui des services de la bibliothèque de l'ULHN dans le processus de publication et d'indexation des Cahiers de la logistique.

Andréa Cynthia Santos

Professeur des Universités
Directrice déléguée à la recherche
de l'ISEL

Vice-Présidente déléguée en
charge du numérique de l'ULHN

Thierry Derrey

Maître de Conférences
Directeur de l'ISEL

Cyrille Bertelle

Professeur des Universités
Directeur SFLOG

ANALYSES DE STRATÉGIES DE DEPISTAGE DANS LA LUTTE CONTRE LA COVID-19

Guillaume Dageons¹, Andréa Cynthia Santos²

¹ISEL, Université Le Havre Normandie
11 Quai Frissard, 76600, Le Havre
guillaume.dageons@etu.univ-lehavre.fr

²Université Le Havre Normandie, LITIS-RI2C, ISEL
15 rue Philippe Lebon, 76600, Le Havre
andrea-cynthia.duhamel@univ-lehavre.fr

RESUME

Dans cette étude, nous traitons le problème lié à la gestion des demandes de dépistage dans la lutte contre la COVID-19. En effet, dans une épidémie à capacité de tests limitée, les décisions doivent être prises de manière à endiguer la propagation du virus, et limiter les conséquences sur les populations, les secteurs économiques et industriels, entre autres. Ainsi, dans un contexte sanitaire difficile, ce qui est dû à la COVID-19, nous nous intéressons aux différentes stratégies de dépistage à partir de la définition de stratégies pour gérer les tests sérologiques et virologiques. Ces stratégies ont été testées et comparées sur différentes dynamiques d'évolution de l'épidémie, en utilisant des critères tels que : le nombre total de patients non-testés, de jours de rupture, de patients symptomatiques non-testés et de patients issus de clusters non-testés. Ceci nous permet d'identifier les meilleures stratégies en fonction de la dynamique d'évolution de l'épidémie.

MOTS CLES: épidémie, coronavirus, dépistage, logistique de crise sanitaire.

ABSTRACT

In this study, we address the problem of management the tests to detect the COVID-19 disease. Indeed, in an epidemic with limited tests' capacity, decisions are taken in order to stem the spread of the virus, and limit the consequences over populations, economic and industrial sectors, among others. Thus, in a difficult health context of COVID-19, we investigate different screening strategies to manage the serological and the virological tests. These strategies were tested and compared using different dynamics of the epidemic evolution, and evaluating by means of the following criteria: the total number of patients not tested, the number of days in rupture, the number of symptomatic patients not tested, and the number of untested patients belonging to clusters. This allows us to identify the best policies based on the evolution dynamics of the epidemic.

KEYWORDS: epidemic, coronavirus, screening, health crisis logistics.

1. Introduction

Au long de l'histoire, les crises sanitaires ont coûté la vie de nombreuses personnes et ont aussi fortement impacté nos modes de vie, l'économie, l'industrie, entre autres. L'épidémie de la COVID-19 a été déclarée état d'urgence de santé publique de portée internationale en janvier 2020 par l'Organisation mondiale de la santé, puis pandémie en mars 2020, depuis son apparition à Hubei en Chine en 2019. Les premiers effets de cette crise sanitaire se font sentir en France depuis mars 2020, ainsi que les faiblesses au niveau de la logistique, notamment dans la gestion des stocks de masques et de tests de dépistage.

Dans plusieurs pays, cette crise due à la COVID-19 a mis à rude épreuve les systèmes de santé, les modèles socio-économiques et logistiques. A titre d'exemple, à ce jour, plus de 1 million de décès ont été officiellement recensés à travers le monde, dont plus de 50 000 en France (Université Johns Hopkins, 2020). L'impact sur l'industrie est aussi très important. En France, les résultats économiques du premier trimestre de 2020 sont les pires depuis le choc pétrolier de 1974 et la crise de 2008 (Francetvinfo(a), 2020). Ainsi, les prévisions du PIB (Produit Intérieur Brut) sur l'année 2020 annoncent une baisse de 8,2% (Statista, 2020). Plusieurs secteurs et la population ont été durement touchés tels que le tourisme avec une perte estimée en dizaines de milliards d'euros, l'éducation nationale avec l'annulation des épreuves du baccalauréat, la santé publique où des nombreuses personnes ont arrêté leur soin de santé pendant le confinement, et plus globalement les impacts sociologiques et psychiques de cette période sur les populations ; conséquence du confinement et du déconfinement plus ou moins compliqué pour certaines tranches de la population; de la peur d'une crise économique, voire des taux de chômage élevés.

Les problèmes liés à la gestion de la crise ne sont pas à l'abri de se répéter car la production interne stratégique, la logistique et les organisations nécessitent un temps d'adaptation, des investissements pour trouver une réorganisation et des nouveaux équilibres structurels et économiques, afin de confronter ce type de crise. **Dans ce sens, cette étude apporte une contribution en rendant la gestion de certains flux de ressources critiques plus résilients, notamment la gestion des tests de dépistages sérologiques (capables d'identifier la présence d'anticorps) et virologiques (capables d'identifier si une personne est contaminée au temps t).** A l'actualité, deux pays dans le monde ciblent (ou plutôt « visent ») un dépistage massif de la population, la Chine pour la région de Wuhan et le Brésil après la découverte de l'hôpital Albert Einstein d'un test basé sur le séquençage de l'acide ribonucléique. Ceci est loin d'être la réalité dans d'autres pays du monde. Puis, un dépistage massif à l'instant t ne garantit pas une gestion stratégique efficace pour contrôler la maladie dans le temps.

Dans la littérature scientifique, plusieurs modèles épidémiologiques sont retrouvés depuis le modèle pionnier de Reed-Frost, 1929, jamais publié, mais analysé en (Abbey, 1952). Globalement, on distingue deux grands types de modèles, les modèles macroscopiques et les modèles microscopiques (Lejournal.crsn, 2020). Dans le premier cas, la modélisation est à l'échelle réelle des populations et considère des groupes (aussi appelés de compartiments). Ceci permet d'effectuer des analyses intéressantes de l'impact de certaines stratégies telles que le confinement ou encore la vaccination. Ces modèles sont en général déterministes et décrits à partir d'équations différentielles, équations aux dérivées partielles, etc. Un exemple de modèle de base est celui formé par trois groupes de personnes : Saines, Infectées et Rétablies (Hethcote, 1989), appelé SIR. Les modèles microscopiques sont à l'échelle des individus et distribués. De ce fait, il est possible d'intégrer par exemple, les comportements individuels, la mobilité, entre autres. Ils

sont donc plus intéressants pour une communauté plus petite. Le principe de ces modèles est de considérer la propagation d'une maladie infectieuse comme un processus aléatoire. C'est donc des modèles stochastiques (Britton, 2010) décrits, par exemple, sur des graphes aléatoires, des chaînes de Markov, etc. Les modèles épidémiologiques sont importants, malgré certaines limitations, aussi bien du point de vue pratique, car ils peuvent appuyer le processus décisionnel lors des crises comme celle de la COVID-19, que du point de vue scientifique. Le focus de notre travail n'est pas de définir un *i*^{ème} modèle épidémiologique, mais il est dédié à la logistique de dépistage en fonction de la dynamique et l'évolution d'une épidémie (ceci peut être estimé à partir de modèles épidémiologiques). **Les questions auxquelles nous souhaitons répondre sont : existe-t-il des stratégies de dépistages pour des tests sérologiques et virologiques plus intéressantes que d'autres ? Si oui, lesquelles et sur quels critères ? Quelle est la meilleure stratégie pour une dynamique spécifique d'une épidémie dans une période de temps ?**

Convaincus que la bonne stratégie est de réaliser une gestion dynamique et fine de tests de la population dans un horizon de temps glissant, nous proposons différentes stratégies pour le dépistage de la population, fondées sur la recherche opérationnelle et le numérique afin de répondre aux questions citées précédemment de façon innovante. Ces stratégies sont basées sur la priorisation de tests virologiques ou sérologiques selon l'état du patient et la dynamique de l'épidémie dans l'instant t , et du report de tests à un temps $t+\Delta$ lors d'une saturation pour certains types de tests. Des scénarios de tests sont utilisés pour comparer les différentes stratégies de dépistage en fonction de plusieurs critères, en considérant la situation de la demande (basse, medium, haute, critique) par rapport à la capacité de tests et l'évolution de l'épidémie (croissante, stable, décroissante).

Ce document est organisé comme suit : dans la Section 2, le problème ainsi que les données utilisées dans ce travail sont définis. Puis, dans la Section 3, les stratégies de dépistage développées sont décrites. Après avoir testé expérimentalement nos différentes stratégies, les résultats numériques et les analyses sont fournis dans la Section 4. Les conclusions et les travaux futurs sont présentés dans la Section 5.

2. Définition du problème et des données pour le dépistage de patients

Les stratégies de dépistage diffèrent par rapport aux pays, entre stratégie de dépistage de masses et ciblés, comme cité précédemment. Nous abordons le dépistage ciblé pour une période de temps donnée, avec pour objectif premier la maximisation du nombre de patients pris en charge, en considérant un nombre limité de tests (capacité de tests) par jour et aussi une capacité globale sur toute la période de la simulation.

Le problème considère la planification du dépistage de patients dans un horizon de temps prédéfini. La période utilisée dans nos simulations est de 300 jours, soit environ 10 mois. Puis, selon la stratégie déployée, voir Section 3, décider l'action à prendre pour chaque patient (dépisté avec un test sérologique ou virologique, ou ne pas dépister) et à quel moment (immédiatement, le plus tôt possible, après un pas de temps, etc.).

Pour résoudre ce problème d'optimisation, nous avons construit des scénarii, définis par deux paramètres majeurs de l'épidémie : l'état de la demande (basse, medium, haute, critique) et de son évolution (croissante, stable, décroissante). Ainsi, **le scénario bas** a une demande comprise entre 50% et 66 % de la capacité globale de tests, **un scénario medium**, entre 66% et 90%, **un scénario haut**, entre 90% et 110%, et **un scénario critique**, entre 110% et 140%. L'évolution du scénario quant à elle correspond à la répartition des demandes sur la période de

temps, ce qui nous permet de tester nos stratégies de dépistage dans différentes situations, par exemple, proche d'un début d'une épidémie, de la fin ou encore après l'épidémie. On considère donc l'évolution **décroissante** si la demande diminue avec le temps, **stable** si elle reste homogène, ou **croissante** si la demande augmente dans le temps. Notons que l'état de la demande et les types d'évolutions combinés résultent en douze scénarii à traiter, à savoir, scénario bas-décroissant, bas-stable, bas-croissant, medium décroissant, medium-stable, medium-croissant, etc. Pour chaque type de scénario, 10 instances tests ont été générées, résultant en 120 études de cas, pour la réalisation de nos tests numériques.

Concernant les données du problème, deux autres paramètres sont importants, les patients et le type de tests. Pour les patients, quatre informations sont utilisées : l'identifiant du patient qui permet aussi d'avoir un ordre d'arrivée des patients sur la période globale, la date de sa demande de test, la présence de symptômes de l'épidémie, et le cas échéant, l'appartenance à un cluster de l'épidémie. Il y a donc quatre profils de patients dans nos simulations : (i) les patients symptomatiques n'appartenant pas à des clusters ; (ii) les patients symptomatiques appartenant à des clusters ; (iii) les patients asymptomatiques n'appartenant pas à des clusters ; et (iv) des patients asymptomatiques appartenant à des clusters. Nous avons défini la probabilité qu'un patient soit symptomatique correspond à 1 chance sur 5 tandis que celle d'appartenance à un cluster est de 1 chance sur 10. Les dates d'arrivées des patients ont été définies de façon aléatoire, mais en considérant le type d'évolution de l'épidémie ciblé.

Enfin, il est nécessaire de clarifier comment ont été générés les capacités de tests du type virologiques, ceux exécutés par voie nasale pour savoir si nous sommes actuellement atteints par le virus, et sérologiques qui détectent la présence d'anticorps après prélèvement sanguin. Nous avons analysé des données de plusieurs publications et bases de données en France et nous avons observé des données très variables en France sur le nombre de personnes pouvant être dépistées sur une période de temps (Cascoronavirus, 2020)(Francetvinfo(b), 2020)(Banque des territoires, 2020). En effet, les conditions initiales sont difficiles à observer, et le manque de dépistage rend la tâche plus compliquée. Ainsi, nous avons établi des chiffres qui sont dans la moyenne des chiffres trouvés pour chaque type de test dans les publications analysées. La capacité quotidienne a été fixée à 25 000 tests virologiques, et 2 500 tests sérologiques. Ce sont des capacités qui correspondraient aux premiers mois de l'épidémie en France. Les capacités quotidiennes, qui sont limitées par contraintes de temps ou d'approvisionnement des tests, diffèrent des capacités sur la période globale, qui correspondent à la capacité de production des tests. Ainsi, pour les capacités globales, nous avons déterminé 5 700 000 de tests virologiques, et 570 000 pour les tests sérologiques sur 300 jours. Les capacités sérologiques correspondent toutes les deux à un dixième de celles des virologiques, puisque les informations récoltées indiquent uniquement que les proportions de tests sérologiques sont très inférieures.

Il est pertinent de souligner que le paramétrage des données décrit dans cette Section peut être aisément modifier, afin de s'adapter à des situations spécifiques, et la simulation rejouée. L'important est que nous avons une problématique d'optimisation définie et qui a été testée en utilisant différentes stratégies de dépistage et nos 120 études de cas. Puis, les résultats sont analysés selon différents critères.

3. Les stratégies de dépistage

On considère ici, une stratégie de dépistage comme un ensemble de règles utilisées pour planifier le dépistage d'un patient. Les stratégies de dépistage pour la COVID-19 dans ce travail

sont fondées sur la théorie de files d'attente, un domaine de recherche très ancien (Erlang, 1917), dont les premières applications sont dédiées aux systèmes de télécommunications. Toutes nos stratégies sont régies par la loi FIFO (de l'anglais First In, First Out), le premier arrivé sera le premier traité ; mais l'ordre de traitement du patient peut être bousculé par l'ensemble des règles d'une stratégie spécifique. Ceci peut être la priorisation systématique d'un certain profil de patients, le report d'un dépistage, la décision de ne pas dépister certains profils, entre autres. Puis, il y a des stratégies (1, 2 et 3) qui utilisent une file unique sans ou avec priorité sur des profils de patients et des files d'attente multiples (4 et 5).

Nous avons testé plusieurs stratégies de dépistage et retenu les cinq plus intéressantes selon les critères ciblés dans nos expérimentations. Pour toutes les stratégies, l'hypothèse suivante a été adoptée : des patients symptomatiques ne seront pas affectés à des tests sérologiques. Ceci parce que selon plusieurs sources (Vidal, 2020) (Francerein, 2020), les anticorps prennent un certain temps pour apparaître suite à une contamination à la COVID-19. Puis, pour ce type de patient, l'objectif est de détecter la présence du virus (test virologique) et puis l'isoler afin de réduire la transmission aux personnes saines.

Dans la première stratégie, les patients symptomatiques, indépendamment s'ils appartiennent à un cluster ou pas, sont affectés aux tests virologiques, mais pas les asymptomatiques. Les patients sont traités dans l'ordre d'arrivée sans aucune priorité. Les asymptomatiques sont donc affectés à des tests sérologiques. En cas de rupture de tests sérologiques et s'il y a des disponibilités de tests virologiques, le patient asymptomatique se verra affecter un test virologique dans la journée qu'il est arrivé. Sinon, il est considéré comme non-testé. **Cette stratégie de dépistage vise à réserver le stock de tests virologiques principalement pour les profils symptomatiques.**

La deuxième stratégie met en place un système de priorité. La priorité est donnée dans une journée aux profils symptomatiques et aux profils d'un cluster sans distinction entre ces profils. De ce fait, la différence majeure par rapport à la première stratégie est que l'ordre FIFO de traitement d'un patient sera bousculé par ces règles. Les asymptomatiques qui n'appartiennent pas à un cluster passent donc après les profils prioritaires. Concernant le type de test qui sera utilisé, les profils prioritaires vont être affectés à un test virologique. En cas de saturation de tests virologiques, les profils asymptomatiques d'un cluster seront testés avec des tests sérologiques. Si ces derniers sont aussi en rupture, ils seront considérés comme non-testés. En cas de saturation de tests virologiques, les profils prioritaires sont mis en file d'attente pour un dépistage le lendemain. De plus, ces patients sur une liste d'attente seront traités en priorité, ensuite le système prend les nouveaux patients arrivés dans la journée. Il est pertinent de souligner que la liste d'attente est journalière et seulement les patients symptomatiques sont maintenus, les autres sont considérés comme non-testés. **Cette stratégie favorise la mise en place de la traçabilité qui est intéressante lorsque le nombre de cas est encore maîtrisable.**

La troisième stratégie considère deux niveaux de priorité. Dans le premier niveau de priorité les profils symptomatiques sont traités dans une journée, indépendamment s'ils appartiennent à un cluster ou pas. Puis, dans le deuxième niveau de priorité se trouve les patients asymptomatiques appartenant à un cluster. De plus, dans cette stratégie, une liste d'attente, disponible tout au long de la simulation, stocke tous les jours, les patients, en considérant à la fois le niveau de priorité et l'ordre d'arrivée. Notons que cette liste d'attente est différente de la liste d'attente de la stratégie 2 car elle considère aussi les patients asymptomatiques qui n'appartiennent pas à un cluster. Les ajouts de nouveaux patients dans la liste d'attente sont réalisés à la fin de la liste, mais en respectant, pour la journée en question, les niveaux de priorité et l'ordre d'arrivée.

De ce fait, les patients symptomatiques d'un jour J+1 qui vont en liste d'attente, seront traités après les patients déjà présents dans la liste d'attente du jour J. Une conséquence de cette structure est que, si la liste est déjà saturée, il est possible que des patients symptomatiques ne soient pas aisément testés. De ce fait, lorsque nous atteignons un patient symptomatique sur la liste d'attente et seulement des tests sérologiques sont disponibles, il restera en tête de liste d'attente pour le lendemain afin d'être testé avec un test virologique. **La structure d'organisation de cette stratégie permet donc de tester un échantillon des différents types de profils des journées successives, notamment à cause de la structure de la file d'attente.**

Afin d'illustrer la gestion des files d'attentes, nous allons considérer la légende ci-dessous pour identifier les profils de patients :

- patient symptomatique hors cluster ; ○ patient asymptomatique hors cluster ;
- ⊗ patient symptomatique d'un cluster ; ⊗ patient asymptomatique d'un cluster ;

Pour tous les exemples des Figures 1, 2 et 3, nous considérons qu'il y a une rupture et qu'une liste d'attente commence à se former d'un jour à l'autre. Ceci afin de pouvoir illustrer comment sont gérées les listes d'attentes dans la 3^{ème}, la 4^{ème} et la 5^{ème} stratégie.

En considérant la priorité et l'ordre d'arrivée des patients, dans la stratégie 3, la liste sera construite comme indiquée dans l'exemple de la Figure 1. On observe notamment que les nouveaux arrivés en liste d'attente dans le jour J+1 sont ajoutés en fin de la liste. Ainsi, il est possible que des profils asymptomatiques (cluster ou non) du jour J soient traités avant les symptomatiques (cluster ou non) du jour J+1.

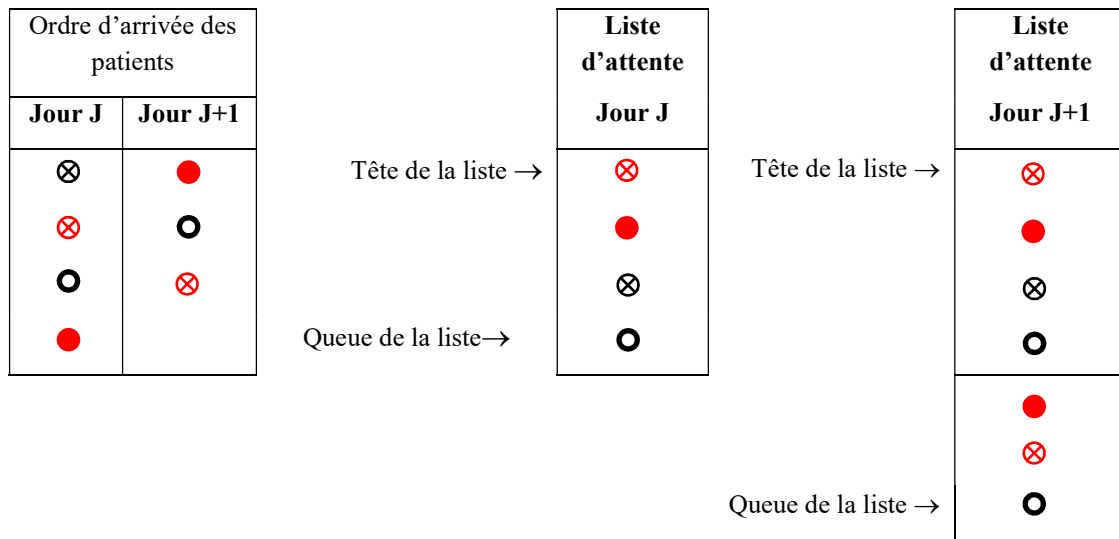


Figure 1: Exemple d'évolution de la liste d'attente pour la stratégie 3.

La quatrième stratégie dérive de la troisième et implémente de facto deux listes d'attentes : la première sera composée des patients symptomatiques, la seconde des patients asymptomatiques, sans prise en compte de l'appartenance à un cluster. La différence par rapport à la troisième stratégie est que les patients non traités symptomatiques et asymptomatiques d'un jour J+1 entreront à la fin de ces respectives listes d'attentes du jour J, s'elles existent. La liste d'attente des patients symptomatiques est prioritaire sur la seconde et sur les nouveaux arrivés. **Cette structure favorise clairement le dépistage des patients symptomatiques.** Un exemple est fourni dans la Figure 2.

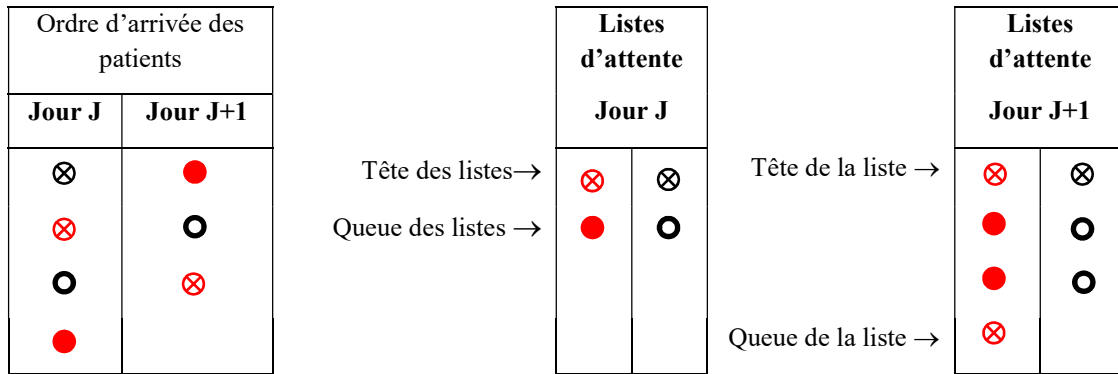


Figure 2 - exemple d'évolution des listes d'attentes pour la stratégie 4.

La cinquième stratégie utilise trois files d'attentes multiples et distinctes pour les profils suivants : une file d'attente pour les profils symptomatiques, une deuxième pour les asymptomatiques appartenant à un cluster et une troisième dédiée aux profils asymptomatiques n'appartenant pas à un cluster. **Cette stratégie facilite le traitement discriminant des différents types de patients, par exemple, pour l'affectation des types de tests, ainsi que pour le report de tests sur certains types de profils.**

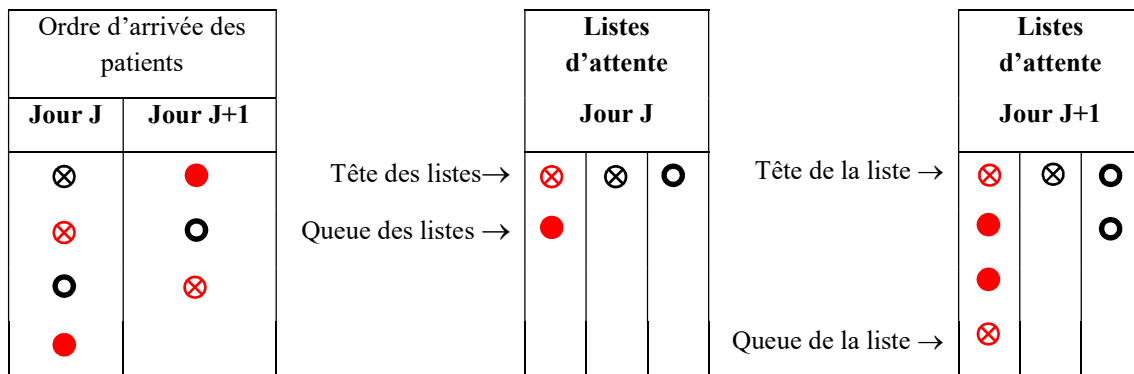


Figure 3 : évolution des listes d'attentes pour la stratégie 5.

4. Résultats numériques

Les algorithmes de génération de scénarii et pour la gestion des stratégies de dépistages ont été développées en Python version 3.6, sur l'environnement Spyder. Pour analyser les résultats, quatre critères d'évaluation sont utilisés en considérant l'horizon de temps global de la simulation :

- Le pourcentage total de patients non testés ;
- Le pourcentage global de patients symptomatiques non testés, appartenant à un cluster ou pas ;
- Le pourcentage de patients non testés appartenant à un cluster, symptomatiques ou pas ;
- Le pourcentage de jours de rupture par rapport à l'horizon de temps de la simulation des deux types de tests (virologiques et sérologiques).

Notons que pour chacun de ces quatre critères, la meilleure stratégie est celle qui trouve la plus petite valeur. L'objectif d'optimisation est donc la minimisation du nombre de patients non testés (ceci correspond à la maximisation des patients testés), de patients symptomatiques non testés, de patients de clusters non testés et le nombre de jours de rupture.

Nous avons, comme dit précédemment, 12 scénarios de test, dont chacun a été représenté par 10 instances, résultant en 120 études de cas. Par souci de simplicité, nous présentons les résultats numériques sous forme de graphique radar. Les points affichés dans ces graphiques correspondent à une moyenne des pourcentages pour les 10 instances des scénarios et plus une stratégie est proche du centre du graphique, mieux c'est. De plus, nous nous concentrons sur les scénarios haut (croissant, décroissant, stable), respectivement dans les Figures 4, 5 et 6, et critiques (croissant, décroissant, stable), respectivement dans les Figures 7, 8 et 9, parce que les différences des stratégies sont notables en considérant les quatre critères ciblés pour ces scénarios.

On observe dans le scénario « Haut-Croissant » (voir Figure 4) que les méthodes 3, 4 et 5 donnent des résultats identiques et sont globalement les plus performantes stratégies, tandis que les méthodes 1 et 2 ont le plus grand nombre de patients non-testés. En revanche, la stratégie 2 est celle qui trouve les meilleurs résultats en considérant les profils symptomatiques. De plus, la méthode 1 présente les plus mauvais indicateurs pour le traitement de patients symptomatiques et appartenant à un cluster.

Les stratégies 3, 4 et 5 sont les plus performantes pour les scénarios « Haut-Décroissante » (voir Figure 5) et « Haut-Stable » (voir Figure 6). Elles présentent un comportement similaire pour les quatre critères. Puis, la stratégie 1 est celle qui présente les pires performances et la stratégie 2 présente des faiblesses dans le nombre total de patients testés. Ceci est dû au fait qu'il y a plus de patients asymptomatiques que de symptomatiques et cette stratégie écarte les asymptomatiques de la file d'attente.

Lorsqu'on observe le critère de rupture de tests, on remarque que ceci se produit dans les scénarios « Haut-Décroissant » et « Haut-Stable » dans les stratégies 3, 4 et 5. Les raisons de ces résultats sont différentes par rapport à la stratégie et aux scénarios considérés. Les stratégies 1 et 2 n'ont pas de rupture de tests. Ceci se produit car les patients asymptomatiques sont plus nombreux que les symptomatiques. Puis, la stratégie 1 n'a pas de file d'attente et dans la stratégie 2, seulement les profils symptomatiques sont maintenus dans la file d'attente. De ce fait, les stocks de tests sont maintenus jusqu'à la fin de l'horizon de temps des simulations réalisées. Les stratégies 3, 4 et 5, quant à elles, entrent en rupture à partir du jour 250 sur 300 et dans les scénarios « Haut-Décroissant » et « Haut-Stable ». La raison principale pour cela est que le nombre de patients en début de la simulation est plus important, ce qui épuise les stocks rapidement, alors que dans le scénario « Haut-Croissant », le nombre de patients en début de la simulation est petit et donc, les stocks sont maintenus. Puis, une deuxième explication est que globalement ces stratégies testent plus de patients tous profils confondus.

Concernant les scénarios « Critique-Croissant », « Critique-Décroissant » et « Critique-Stable », dont les résultats sont montrés dans les Figures 7, 8 et 9, respectivement, on note que la méthode 1 est celle qui présente les plus mauvais résultats pour trois critères, sauf la rupture. Ceci est une conséquence de l'absence de file d'attente et d'une décision de non-testés un grand nombre de profils. On remarque que les stratégies les plus performantes sont les 4 et 5, avec un léger avantage pour la stratégie 5, à cause du nombre de patients testés appartenant à un cluster. Ceci est une conséquence de la création d'une liste intermédiaire pour prioriser davantage les patients appartenant à un cluster.

L'interprétation des résultats numériques pour les scénarios critiques peut être nuancé en fonction du contexte de l'épidémie, incluant la capacité de tests, entre autres. Même si les stratégies 4 et 5 sortent gagnantes sur plusieurs critères, elles semblent plus adaptées dans un contexte de dépistage massif. Notons que la stratégie 2 perd juste sur un critère, le nombre de patients non-testés. Elle est donc aussi intéressante, mais pour un dépistage ciblé.

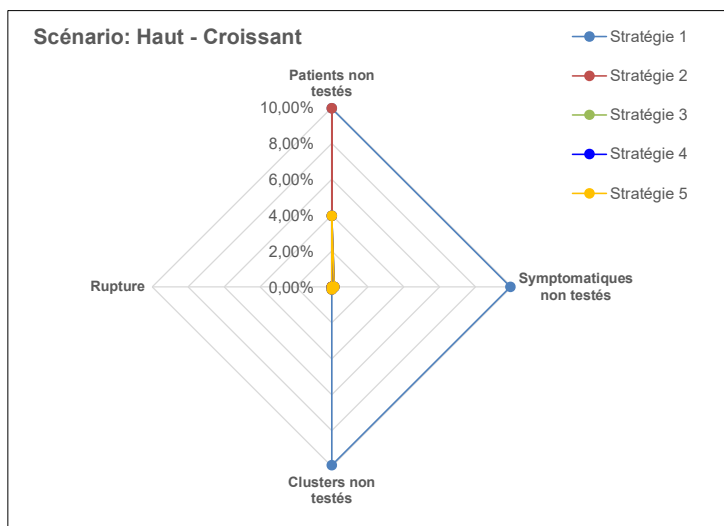


Figure 4 : Résultats pour le scénario « Haut – Croissant »

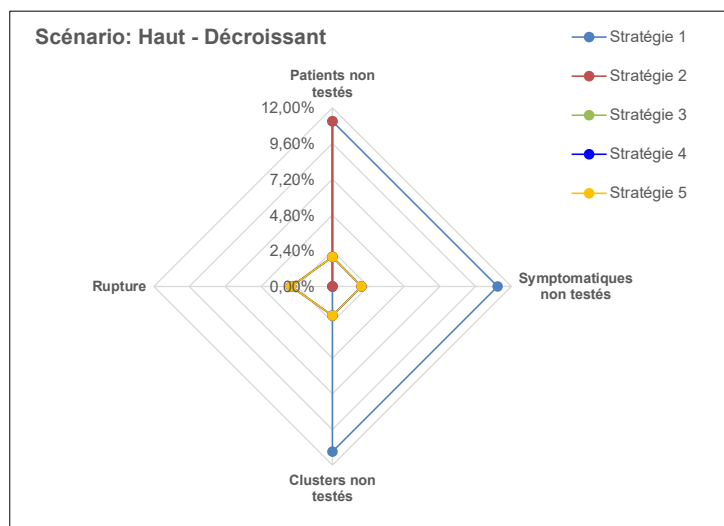


Figure 5 : Résultats pour le scénario « Haut – Décroissant »

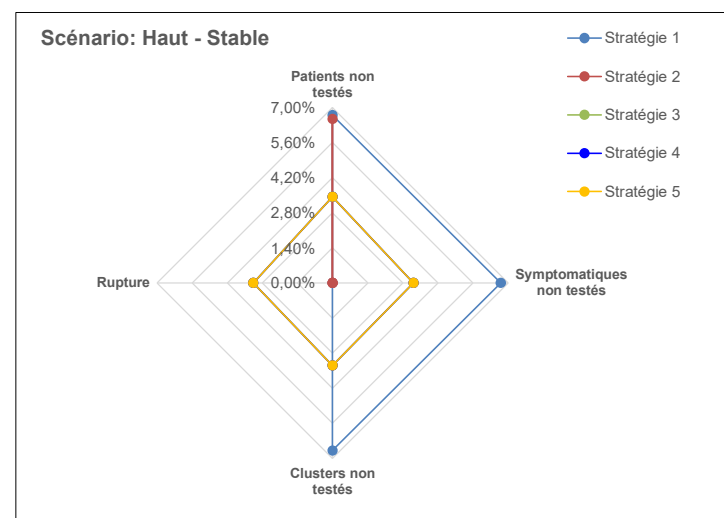


Figure 6 : Résultats pour le scénario « Haut – Stable »

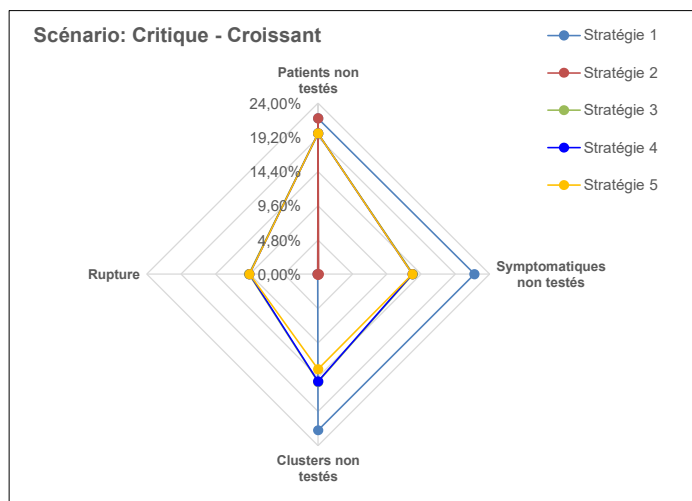


Figure 7 : Résultats pour le scénario « Critique – Croissant »

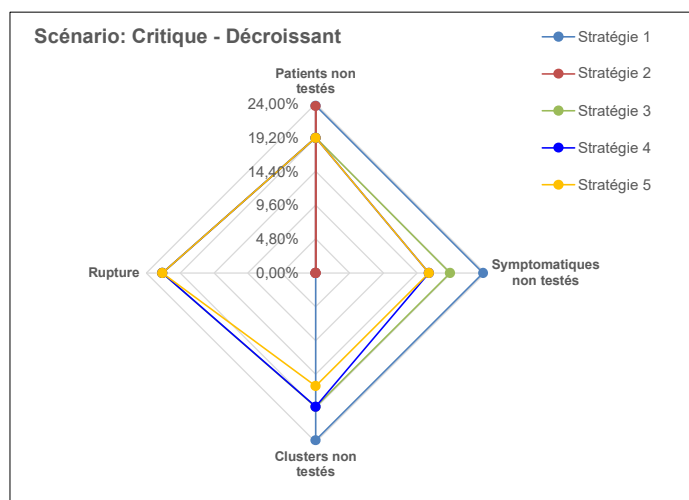


Figure 8 : Résultats pour le scénario « Critique – Décroissant »

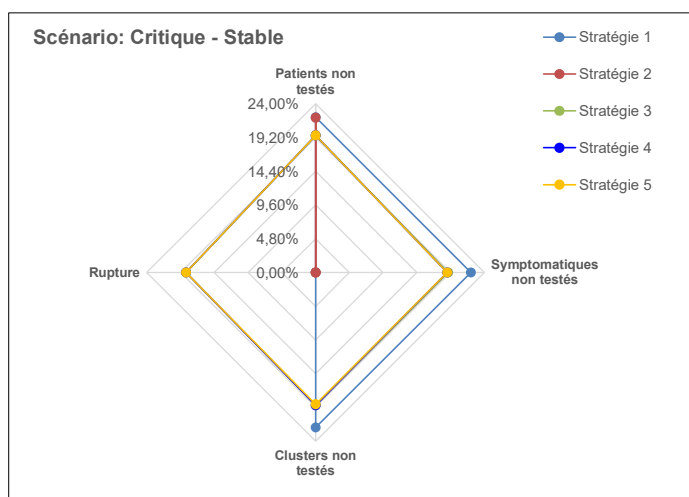


Figure 9 : Résultats pour le scénario « Critique – Stable »

5. Conclusions

Dans cette contribution, après un travail de recherche de données, sur des bases de données publiques françaises, nous avons construit des scénarios de test pour le dépistage d'une population suite à une épidémie comme celle de la COVID-19. Puis, nous avons développé plusieurs stratégies de dépistages fondées sur la théorie des files d'attente. Ensuite, afin d'analyser les études de cas sur des stratégies développées, on a défini quatre critères de minimisation pour l'évaluation ces stratégies : le nombre de patients non-testés, le nombre de profils symptomatiques non-testés, le nombre de jours de rupture et le nombre de patients issus de clusters non-testés.

Bien que notre contribution reste dans le domaine purement numérique (pas médicale), nous avons pu observer les variations dans les résultats selon les types de scénarios et la stratégie adoptée. Tout ceci dans un moment où plusieurs pays passent pour des difficultés au niveau de la stratégie de dépistage à adopter. Clairement, nos résultats indiquent que la façon dont les files d'attente sont organisées, ou bien l'absence de file d'attente impactent fortement les résultats en bout de chaîne. Certaines stratégies comme la 4 et 5 s'inviterait dans une approche de dépistage à grande échelle, alors que la stratégie 2 serait plus intéressante pour un dépistage ciblé. Pour les travaux futurs, on avancera sur les équilibres des différentes stratégies proposés dans cette étude, d'autres critères d'évaluation des stratégies et des modèles et méthodes probabilistes.

6. Références bibliographiques

Abbey H., An examination of the Reed-Frost theory of epidemics. *Human Biology*, 3:201, 1952.

Banque des territoires, <https://www.banquedesterritoires.fr/requisition-les-laboratoiresdepartementaux-enfin-autorises-pratiquer-les-tests-covid-19>, consulté le 24 juin 2020.

Britton T., Stochastic epidemic models: A survey, *Mathematical Biosciences*, 225 (1), 24-35, 2010.

Cascoronavirus, <https://www.cascoronavirus.fr/>, consulté le 24 juin 2020.

Erlang, A.K. Solution of some problems in the theory of probabilities of significance in automatic telephone exchanges. *Post Office Electrical Engineer's Journal*, 10, 189-197, 1917.

Francereinfo, <https://www.francerein.org/region/auvergne/actualite/3-utilisation-des-testsserologiques-de-depistage-du-covid19>, consulté le 11 septembre 2020.

Francetvinfo(a), https://www.francetvinfo.fr/sante/maladie/coronavirus/crise-economique-limpact-sur-l-industrie-risque-d-etre-historique_4023225.html, consulté le 11 août 2020.

Francetvinfo(b), <https://www.francetvinfo.fr/>, consulté le 24 juin 2020.

Futura sciences, <https://www.futura-sciences.com/>, consulté le 25 juin 2020.

Hethcote H. W., Three Basic Epidemiological Models, *Applied Mathematical Ecology*, Editors

Lejournal.cnrs, <https://lejournal.cnrs.fr/articles/covid-19-comment-sont-concus-les-modelesdes-epidemies>, consulté le 21 août 2020.

Levin S. A., Hallam T. G. and Gross L. J., 119-144, 1989.

Sciences et avenir, <https://www.sciencesetavenir.fr/>, consulté le 25 juin 2020.

Statista, <https://fr.statista.com/statistiques/1103533/glisement-annuel-pib-coronavirus-france/>, consulté le 11 août 2020.

Université Johns Hopkins, <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>, consulté le 01 septembre 2020.

Vidal,

https://www.vidal.fr/actualites/25280/tests_serologiques_de_la_covid_19_une_interpretation_ui_n_est_pas_si_simple/, consulté le 11 septembre 2020.

Biographie des auteurs



Guillaume Dageons est un étudiant de l'Institut Supérieur d'Études Logistiques, en seconde année de cycle ingénieur pour l'année 2020-2021. Il effectue cette contribution dans le cadre d'un stage ingénieur, financé par la SFLog.



Andréa Cynthia Santos est Professeur des Universités à Normandie Université et Directrice Déléguée à la Recherche de l'ISEL (Institut Supérieur d'Études Logistiques). Elle réalise ses travaux de recherche au LITIS-RI2C (Laboratoire d'informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes-Réseaux d'Interaction et Intelligence Collective). Andréa a soutenu sa thèse de doctorat ès Sciences Informatiques en 2006 à PUC-Rio au Brésil et son HDR (Habilitation à diriger des recherches) en 2016 à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC). Ses travaux de recherche entrent dans le cadre de la Recherche Opérationnelle appliquée

à des problèmes d'optimisation dans le cadre de crises majeures (catastrophe naturelles et industrielles, crises sanitaires) et ville durable, incluant des aspects pluridisciplinaires pour résoudre des problématiques sociotechniques réelles et à l'échelle des villes. Andréa a porté 9 projets de recherche et industriels, la plupart pluridisciplinaire et avec des retombées sur les systèmes existants. Ces projets ont eu une reconnaissance nationale et internationale. Elle a réalisé 33 publications dans des revues internationales, participé à 89 conférences nationales et internationales et a édité 2 volumes spéciaux dans des revues internationales.