

## APPERCU SUR LA LOGISTIQUE DES VACCINS DE LA COVID- 19

*Par Ilboudo Yabyouré Damien, Zangre Noé Rigobert; Rakissaga Saïdou, Bonkougou Illiasse, Tonde Koudougou Oussené et Djimba Ali*

### **Resumé**

*Le suivi, le stockage et la distribution de millions de doses de vaccin COVID-19 sont une tâche colossale qui nécessite une variété de systèmes informatiques pour gérer et maintenir un fluide chaîne d'approvisionnement en vaccins.*

*Cet article propose une analyse d'optimisation-simulation en deux étapes pour améliorer les opérations logistiques de la chaîne du froid pour la distribution du vaccin COVID-19, et la méthode est mise en œuvre via un ensemble de simulation de pointe.*

*Cette recherche montre les impacts de différentes tailles de flotte, de la composition de la flotte, du type de véhicule ou drones (UAV) utilisé et des décisions d'acheminement sur le niveau de service, la rentabilité, la performance environnementale et l'équité d'un système logistique de vaccins de la chaîne du froid.*

*Cette recherche fournit quelques idées pour tester de nouvelles technologies, par exemple, UAV ou drones, dans la distribution du vaccin COVID-19 dans un environnement de simulation sans risque.*

**Mots clés :** Distribution de vaccins ; Vaccins contre le covid-19 ; Logistique de la chaîne du froid ; Chaîne d'approvisionnement en vaccins ; Simulation ; Logistique des vaccins ; Drones

### **Introduction**

L'effet catastrophique de la nouvelle maladie à coronavirus (COVID-19) a balayé le monde entier, ce qui a considérablement affecté les systèmes de santé mondiaux, les économies et de nombreuses industries. En mars 2021, la pandémie a causé plus de 100 millions de cas confirmés, et le taux de mortalité du COVID-19 a été mortel avec des décès associés de plus de 2,4 millions, selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) (OMS, 2021). Cette maladie infectieuse a été découverte pour la première fois à Wuhan, en Chine, en décembre 2019, et elle a été déclarée pandémie par l'OMS le 30 janvier 2020, provoquant un grand émoi dans le monde entier. Compte tenu de la gravité de cette pandémie, l'OMS, en collaboration avec plusieurs sociétés pharmaceutiques leaders de l'industrie, est pressée de trouver des moyens de freiner la propagation de cette maladie infectieuse. Alors que des mesures de contrôle sont mises en place, plusieurs études ont été menées pour développer des vaccins fiables pouvant prévenir la propagation de cette maladie infectieuse.

Selon l'historique du développement de vaccins, aucun vaccin contre les maladies infectieuses n'a jamais été développé en moins de temps que le COVID 19. Grâce aux efforts scientifiques habilitants et au soutien des gouvernements, peu de vaccins contre le COVID 19 ont été développés dans le monde.

Depuis décembre 2020, les vaccins de plusieurs fabricants, par exemple Pfizer/BioNTech, Moderna, etc., ont été approuvés pour la vaccination de masse afin de contrôler la pandémie de COVID-19, qui a causé plus de 100 millions d'infections et 2,4 millions de décès. Ces vaccins sont produits et transportés en grande quantité pour suffire aux besoins de plusieurs pays. Avant d'arriver chez les utilisateurs finaux, les vaccins doivent être stockés à des températures extrêmement basses et distribués via des réseaux logistiques fiables de la chaîne du froid. Ainsi, la distribution rapide et rentable des vaccins COVID-19 via la logistique de la chaîne du froid est devenue un défi opérationnel complexe.

Cependant, il reste encore un long chemin à parcourir pour faire vacciner les gens, ainsi que d'autres qui sont en route. En 2021 et au-delà, la logistique compliquée du contrôle de la chaîne du froid des vaccins, combinée au financement gouvernemental limité pour aider à la distribution, rendra difficile la vaccination de masse. Nous avons identifié divers défis et opportunités liés à la chaîne d'approvisionnement et à la logistique des vaccins COVID 19.

La solution à ces défis jouerait un rôle crucial pour améliorer l'infrastructure de la qualité de la santé à travers le monde.

Même si des efforts importants ont été déployés dans les chaînes d'approvisionnement en vaccins et la logistique de la chaîne du froid, il existe encore trois lacunes identifiées comme suit :

La pandémie de COVID-19 a apporté de nouveaux défis pour une distribution efficace des vaccins, par exemple l'incertitude de l'approvisionnement, et ces défis ne peuvent pas être bien relevés par les méthodes existantes.

Moins d'efforts de recherche ont été consacrés à l'exploration des points forts de l'optimisation et de la simulation dans la distribution des vaccins.

Les interactions entre les différents facteurs influençant la distribution des vaccins, par exemple la taille du parc, le type de véhicule, etc., n'ont pas été étudiées en profondeur.

Ainsi, pour combler ces lacunes, une approche basée sur la simulation combinant à la fois l'optimisation des itinéraires et la simulation dynamique est proposée pour améliorer la distribution du vaccin COVID-19.

Pour assurer la viabilité des vaccins aux points d'administration, il est crucial de maintenir une logistique de la chaîne du froid efficace et efficiente. Une chaîne d'approvisionnement en vaccins est dite efficace si elle peut répondre à toutes les demandes en garantissant que le nombre de vaccins nécessaires pour la population cible est disponible dans des conditions efficaces et à un coût abordable (Brison et LeTallec, 2017). Par conséquent, la distribution efficace tout au long de la dernière étape de la chaîne

d'approvisionnement en vaccins est importante lorsqu'une large couverture vaccinale est attendue. À cet égard, plusieurs études ont été menées pour concevoir des chaînes d'approvisionnement d'urgence et des chaînes d'approvisionnement de lutte contre les épidémies (Yang et al., 2021b, Saif et Elhedhli, 2016, Leng et al., 2020b, Leng et al., 2020b). D'autres études sur la chaîne d'approvisionnement en vaccins abordent les défis associés (Privett et Gonsalvez, 2014, Yong et al., 2020, Dasaklis et al., 2012, Dwivedi et al., 2018) et le besoin de collaboration entre les acteurs d'un approvisionnement en vaccins chaîne (Duijzer et al., 2018, Dasaklis et al., 2012, Lee et Haidari, 2017). Duijzer et al. (2018) ont révélé la nécessité d'une intégration du système et ont suggéré que les décisions prises à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement en vaccins pourraient affecter les composants en aval.

Privett et Gonsalvez (2014) ont suggéré qu'avec l'augmentation du nombre de productions de vaccins, la chaîne d'approvisionnement en vaccins pourrait souffrir d'un manque de capacité. Pour relever ce défi, l'intégration de la logistique des vaccins aux chaînes d'approvisionnement d'autres produits pharmaceutiques est considérée comme une solution possible, qui peut réduire les coûts fixes et opérationnels associés au transport, à l'entreposage et à la distribution. Bien que cette intégration soit bénéfique pour les parties prenantes en amont, elle pourrait être inefficace dans la gestion de la variété des produits et des exigences des clients dans certains cas (Privett et Gonsalvez, 2014). Ainsi, les décisions d'intégrer la chaîne d'approvisionnement des vaccins avec d'autres produits médicaux doivent être prises avec prudence avec des produits sélectionnés à certaines étapes de la chaîne d'approvisionnement. Cette approche est plus efficace aux étapes en aval de la chaîne d'approvisionnement, c'est-à-dire l'entreposage et le transport (Privett et Gonsalvez, 2014).

De nombreuses études soulignent le besoin de collaboration et l'importance de l'implication des parties prenantes dans la prise de décision. Lee et Haidari (2017) ont identifié les principales parties prenantes d'une chaîne d'approvisionnement en vaccins et les implications de leurs actions. Les résultats ont souligné la nécessité d'une meilleure communication entre les décideurs et les experts de la chaîne d'approvisionnement. De Boeck et al. (2019) ont souligné que, bien que des données réelles aient été utilisées dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement en vaccins, l'applicabilité des modèles était encore faible en raison du manque d'implication des parties prenantes. Brison et Le Tallec (2017) ont suggéré qu'une forte coordination entre les différentes parties prenantes dans un système logistique de la chaîne du froid améliorerait un accès équitable et rapide aux vaccins. L'un des principaux défis opérationnels d'une chaîne d'approvisionnement en vaccins est lié à l'interférence humaine. Ashok et al. (2017) ont développé un modèle de dépendance pour découvrir les défis auxquels est confrontée une chaîne d'approvisionnement mondiale en vaccins, qui a révélé que le facteur d'influence le plus important est la dépendance aux ressources humaines. Lloyd et Cheyne (2017) ont enquêté sur les problèmes actuels associés à l'exposition des vaccins à des températures inappropriées. Les résultats ont

montré qu'il y avait un manque de connaissances adéquates des agents de santé concernant l'effet des dommages causés par le gel sur les vaccins et la surveillance de la température. Ainsi, les acteurs clés de la logistique de la vaccination et de la chaîne du froid doivent être adéquatement formés.

### **Méthodes de planification et d'exploitation de la chaîne d'approvisionnement en vaccins**

L'optimisation et la simulation informatisée sont les outils les plus puissants d'aide à la décision pour la conception et les opérations de la chaîne d'approvisionnement en vaccins.

#### **Méthode d'optimisation**

La conception du réseau de la chaîne d'approvisionnement (SCND) consiste à prendre systématiquement des décisions clés aux niveaux stratégique et tactique, les modèles d'optimisation mathématique ont été largement utilisés pour SCND afin de réaliser des opérations hautement efficaces et efficientes. En optimisant la prise de décision de SCND, divers avantages, par exemple des coûts d'exploitation réduits, une expérience client améliorée, des impacts environnementaux améliorés, une production et une distribution efficaces, etc., peuvent être obtenus (Yu et Solvang, 2020). Le SCND pour les vaccins est généralement modélisé pour atteindre de faibles coûts d'exploitation, tout en étant simultanément capable de distribuer rapidement des vaccins aux utilisateurs finaux, en particulier pendant la pandémie. Les techniques de modélisation les plus largement utilisées sont la programmation linéaire (LP), la programmation mixte en nombres entiers (MIP) et la programmation multi-objectifs (MOP). Le modèle MIP se compose de deux types de variables, à savoir une variable entière et une variable continue, où les variables entières déterminent les emplacements des installations et les variables continues déterminent les allocations de la demande. Lorsque plusieurs facteurs d'influence, par exemple les coûts, la réactivité, etc., sont pris en compte, le MOP peut être utilisé pour modéliser et équilibrer le compromis entre ces facteurs conflictuels. Sur la base de ces techniques, plusieurs modèles d'optimisation ont été formulés en mettant l'accent sur la réduction des coûts totaux (Saif et Elhedhli, 2016, Song et al., 2020, Al Theeb et al., 2020b, Huai et al., 2019, Dou et al. al., 2020, Shahparvari et al., 2020, Yang et al., 2020), réduire les dommages à la cargaison (Leng et al., 2020a, Dou et al., 2020), minimiser les émissions de carbone (Al Theeb et al., 2020b, Zhang et al., 2019, Leng et al., 2020a, Leng et al., 2020b), et l'amélioration de la satisfaction client (Leng et al., 2020b, Yang et al., 2020).

Au niveau opérationnel, le problème d'acheminement des véhicules (VRP) est l'un des problèmes les plus importants affectant l'efficacité opérationnelle de la distribution des vaccins. Le VRP consiste à déterminer les itinéraires d'un ensemble de véhicules de transport à travers lesquels toutes les demandes des clients peuvent être satisfaites au moindre coût. Plusieurs algorithmes VRP ont été développés pour améliorer les opérations de la logistique de la chaîne du froid. Song et al. (2020) ont modélisé un VRP

canonique, où les fenêtres temporelles variées, les types de véhicules et les différents niveaux de consommation d'énergie ont été modélisés comme les principaux paramètres de contrôle. Al Theeb et al. (2020a) ont proposé un modèle générique d'optimisation d'entiers mixtes pour soutenir les décisions liées au VRP et aux problèmes d'allocation des stocks de la logistique de la chaîne du froid. Huai et al. (2019) ont formulé un modèle à objectifs multiples pour réduire les dommages du fret et les coûts de distribution d'un système logistique de la chaîne du froid.

Les problèmes combinés de localisation et d'acheminement ont récemment reçu beaucoup d'attention dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement en vaccins. Lim et al. (2019) ont développé un modèle MIP pour planifier un réseau de distribution de vaccins en utilisant des réseaux de distribution intermédiaires. Rastegar et al. (2021) ont étudié un nouveau MIP pour un problème d'inventaire de localisation afin d'assurer une répartition équitable des vaccins antigrippaux dans les pays en développement pendant la pandémie de COVID-19. Pg Petroianu (2020) a développé un outil d'optimisation convivial pour le VRP de la distribution des vaccins au Mozambique. Lin et al. (2020) ont présenté les impacts de différentes politiques de transport de la chaîne du froid dans une chaîne d'approvisionnement en vaccins. Yang et al. (2021) ont développé un modèle MIP pour améliorer les chaînes d'approvisionnement en vaccins dans les pays à faible revenu, et un nouvel algorithme de désagrégation et de fusion basé sur MIP a également été proposé pour améliorer l'efficacité des calculs. Li (2020) a proposé un modèle MOP pour localiser les postes de vaccination en tenant compte de l'équilibre entre l'accessibilité et les coûts.

### **Méthode de simulation**

Dans une chaîne d'approvisionnement internationale en vaccins, les vaccins provenant de sources étrangères arrivent dans un pays par voie aérienne ou maritime et sont stockés dans un entrepôt central avant d'être ensuite transportés vers le reste du pays via des centres de distribution intermédiaires (Lim et al., 2019). La distribution des vaccins au niveau national peut être décomposée en quatre étapes : (1) l'approvisionnement au niveau national ; (2) le stockage des vaccins ; (3) le transport entre différents niveaux et (4) l'administration de vaccins (De Boeck et al., 2018). Les décisions sur ces quatre étapes peuvent être analysées par des outils de simulation informatisés, par exemple HERMES, AnyLogic, etc. Avec l'aide d'HERMES, Lee (2016) a développé un modèle de simulation pour évaluer les faiblesses de la chaîne d'approvisionnement en vaccins, et plusieurs des suggestions ont été faites pour améliorer les opérations de la chaîne d'approvisionnement. Habituellement, les études utilisant le logiciel HERMES ont considéré l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement en vaccins (Lee, 2016, Lee et Haidari, 2017, Mueller, 2016). De plus, Shitu et al. (2016) ont abordé les problèmes liés aux

installations de stockage de vaccins, où un modèle de simulation a été appliqué pour analyser l'effet des fluctuations de l'approvisionnement et de la demande de vaccins sur les besoins en capacité de stockage.

Par conséquent, dans cet article, nous présentons une analyse basée sur la simulation pour améliorer les performances logistiques de la chaîne du froid pour une distribution efficace du vaccin COVID-19 à travers une étude de cas en Norvège. Plusieurs scénarios avec différentes configurations ont été testés avec un package de simulation d'optimisation professionnel, nommé anyLogistix. En fonction des demandes des clients, de la taille de la flotte et des types de véhicules, les itinéraires de transport et les affectations de véhicules sont d'abord optimisés, puis ces décisions sont ensuite évaluées dans un environnement de simulation dynamique et plus réaliste. Cette étude montre l'applicabilité d'un outil puissant pour les décideurs afin de mieux organiser la distribution des vaccins COVID-19. En outre, plusieurs implications managériales génériques sont obtenues sur la base des analyses de simulation, ce qui peut aider les responsables logistiques à mieux comprendre les interactions entre les principaux facteurs d'influence d'un système de distribution de vaccins dans la chaîne du froid.

Les progrès récents de la science informatique et de ses applications ont provoqué une augmentation de l'application hybride des méthodes de simulation et d'optimisation, appelée SIM-OPT. Les avantages des deux méthodes peuvent être combinés pour fournir une meilleure analyse et une meilleure solution aux problèmes complexes de prise de décision dans les chaînes d'approvisionnement en vaccins. Par exemple, Dillon et Colton (2014) ont développé une approche basée sur SIM-OPT pour déterminer la conception rentable des entrepôts de vaccins dans les pays en développement. Les résultats de leurs expériences ont indiqué que la méthode proposée non seulement donne une analyse plus précise, mais rend également le problème moins coûteux en termes de calcul.

### **Implications managériales**

Sur la base des analyses basées sur la simulation, cinq implications managériales génériques liées aux opérations d'un système logistique de la chaîne du froid pour une distribution efficace du vaccin COVID-19 sont obtenues comme suit :

- Les performances globales du système en termes de coûts de transport, de délais, de niveaux de service, d'émissions de CO2 et d'équité de service sont affectées par la taille de la flotte, la composition de la flotte, les types de véhicules de réfrigération utilisés et l'optimisation des itinéraires.
- Généralement, une plus grande taille de flotte conduit à un niveau de service plus élevé et à une plus grande équité de la distribution de vaccins en raison de sa plus grande flexibilité pour mieux gérer les fluctuations de la demande. Cependant, compte tenu des impacts des différents véhicules et de la planification des transports, l'expansion de la flotte ne garantit pas toujours un niveau de service amélioré.

- Pour améliorer la réactivité, la rentabilité, les impacts environnementaux et l'équité des services d'un système logistique de la chaîne du froid pour la distribution des vaccins COVID-19, la configuration de la flotte et les décisions d'acheminement et de planification de chaque véhicule doivent être optimisées.
- L'utilisation d'UAV ou drones à courte portée, si elle est bien planifiée, peut améliorer le niveau de service, les impacts environnementaux et la rentabilité de la distribution du vaccin COVID-19.

## **Conclusion**

Avec un grand nombre d'infections et de décès, la pandémie de COVID-19 a eu des effets catastrophiques sur les systèmes de santé et l'économie mondiaux, et le bien-être et les modes de vie de la population ont été considérablement modifiés en raison de diverses mesures de contrôle des infections mises en œuvre, par exemple, le verrouillage de la ville, restrictions de voyage, éducation en ligne, etc. En outre, la pandémie a également causé des défis importants aux systèmes logistiques et aux chaînes d'approvisionnement mondiales (Sarkis, 2020, Yu et al., 2020, De Boeck et al., 2019). La vaccination de masse est considérée comme le moyen le plus prometteur de contrôler la propagation de la maladie et de rétablir une vie normale. Cependant, la planification d'une distribution réactive et rentable des vaccins COVID-19 est un problème complexe en raison de plusieurs facteurs d'influence, à savoir l'incertitude liée à l'approvisionnement en vaccins, les exigences strictes en matière de température pour le stockage et le transport, le changement des politiques de distribution des vaccins. et la limitation des ressources. Il est donc important de soutenir la planification des transports de manière opportune et fiable. Les résultats expérimentaux fournissent plusieurs implications managériales génériques, qui peuvent aider les décideurs à mieux planifier le transport de la distribution du vaccin COVID-19.

## **Bibliographie**

1. Al Theeb et al., 2020b N. Al Theeb, HJ Smadi, TH. Al-Hawari, M.H. Aljarrah
2. Optimisation du routage des véhicules avec des problèmes d'allocation des stocks dans la logistique de la chaîne d'approvisionnement du froid  
A. Ashok, M. Brison, Y. LeTallec, Improving cold chain systems: challenges and solutions  
*Vaccine*, 35 (17) (2017), pp. 2217-2223
3. Brison et Le Tallec, 2017 M. Brison, Y. Le Tallec Transformer les performances et la gestion de la chaîne du froid dans les pays à faible revenu , *Vaccin*, 35 (17) (2017), p. 2107-2109