

***Document de recherche***

**La gestion du risque de pandémie :  
Planification de mesures d'urgence et  
affectation de ressources**

**Xiaowei Chen, Wing Fung Chong,  
Runhuan Feng, Linfeng Zhang  
Université de l'Illinois**

**Août 2021**

Document rp221089

*This document is available in English*

© 2021 Institut canadien des actuaires

## Résumé

L'histoire répétée des pandémies, comme le SRAS, le H1N1, l'Ebola, la Zika et la COVID-19, a prouvé que le risque de pandémie est inévitable. Des pénuries extraordinaires de ressources médicales ont été observées dans de nombreuses régions du monde. Parmi les facteurs déterminants, mentionnons l'absence de réserves suffisantes et d'efforts coordonnés pour déployer les ressources existantes aux endroits où les besoins sont les plus criants.

Le présent document examine la planification de mesures d'urgence et l'affectation des ressources du point de vue de la gestion des risques, par opposition à la perspective de la chaîne d'approvisionnement en vigueur. L'idée fondamentale repose sur le fait que la concurrence pour l'obtention des ressources essentielles limitées est présente non seulement dans différentes régions, mais aussi à différents stades d'une pandémie. Le présent document s'appuie sur une analogie entre l'agrégation des risques et la répartition du capital entre les finances ainsi que la planification et l'affectation des ressources aux systèmes de soins de santé en cas de pandémie. La principale contribution consiste à proposer de nouvelles stratégies pour constituer des réserves optimales et leur distribution en équilibrant la concurrence spatio-temporelle pour l'offre et la demande de fournitures médicales.

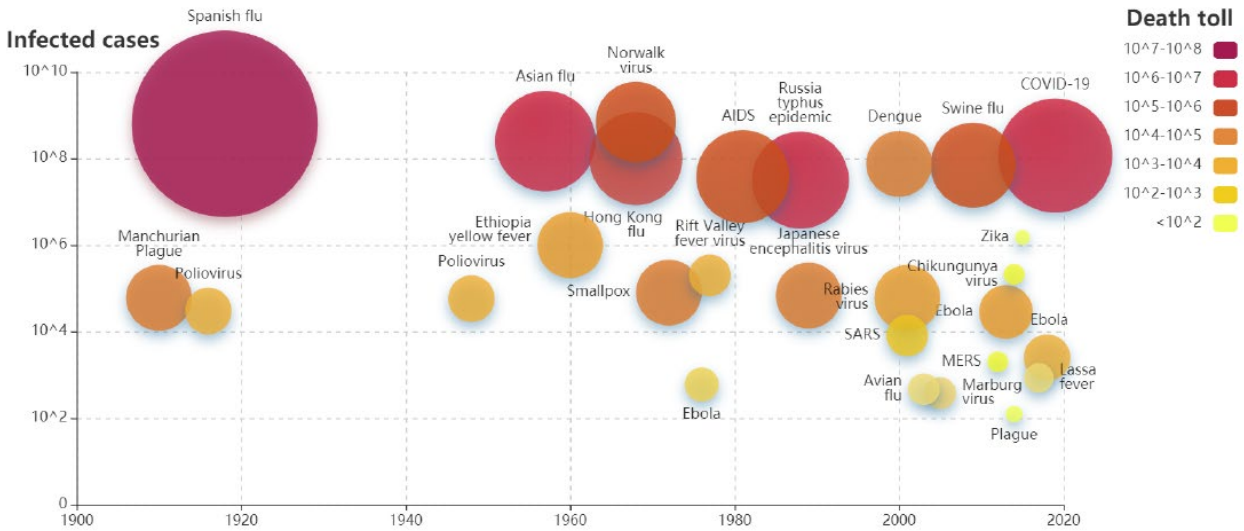
# 1. Introduction

## 1.1 Leçons tirées des pandémies récentes

Une épidémie représente l'éclosion d'une maladie qui se propage rapidement à une cohorte de personnes dans une vaste région. Selon la définition fournie par les Centers for Disease Control and Prevention (Centres pour le contrôle et la prévention des maladies) des États-Unis (2021), « une pandémie fait référence à une épidémie qui s'est propagée sur plusieurs pays ou continents, affectant généralement un grand nombre de personnes ». Comme les humains ont peu d'immunité face à cette nouvelle maladie, une pandémie peut émerger rapidement partout dans le monde. L'une des pandémies les plus dévastatrices de l'histoire récente est la pandémie de grippe de 1918, qui a infecté environ 500 millions de personnes et entraîné le décès de quelque 50 millions d'humains dans le monde, soit plus de décès que lors de la Première Guerre mondiale. Plus récemment, la nouvelle maladie à coronavirus de 2019 (COVID-19) est une maladie infectieuse causée par un nouveau virus qui n'a émergé qu'à la fin de 2019 et qui s'est depuis propagé dans presque tous les pays du monde. Selon les estimations du Fonds monétaire international (2021), l'économie mondiale s'est contractée de 3,5 % en 2020. Toutefois, l'impact considérable de la COVID-19 et les retombées économiques qui en découlent en raison de la perte de productivité n'ont pas encore été réalisés. Au 8 mai 2021, on avait recensé plus de 157 millions de cas d'infection dans le monde, le bilan atteignant plus de 3,2 millions de morts (voir par exemple Worldometer, 2021).

L'histoire répétée des pandémies ces dernières décennies, comme le SRAS, la grippe porcine, l'Ebola, et tout récemment, la COVID-19, nous a appris que le risque de pandémie est inévitable. Des études récentes (voir, par exemple, Morse, 1995; Jones et coll., 2008) ont montré que la fréquence des pandémies a augmenté au cours du dernier siècle en raison d'une plus grande connectivité sociale, des déplacements sur de longues distances, de l'urbanisation, des changements au chapitre de l'utilisation des terres, du commerce et de la consommation d'animaux sauvages et de l'exploitation accrue de l'environnement naturel. Selon des données recueillies auprès de diverses sources (par exemple, les Centers for Disease Control and Prevention, 2018; l'Organisation mondiale de la Santé, 2018; l'Organisation mondiale de la Santé, 2019), le graphique 1 montre la fréquence et la gravité des pandémies bien reconnues et des urgences de santé publique d'envergure internationale déclarées par l'OMS depuis les années 1900. L'axe vertical représente le nombre d'infections documentées sur une échelle logarithmique. Tant la taille que l'échelle de couleur des cercles indiquent le nombre de décès résultant des pandémies et des urgences de santé publique. Le schéma alarmant de fréquence accrue montre clairement l'importance cruciale de la gestion du risque de pandémie.

**Graphique 1 : Fréquence et gravité des pandémies et des urgences de santé publique depuis les années 1900**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Les gouvernements du monde entier ont assumé le blâme pour leur incapacité de mettre rapidement en place des politiques pertinentes pour contenir la pandémie. De nombreux pays ont connu de graves pénuries de ressources. Ranney, Griffeth et Jha (2020) ont étudié le rôle crucial des ressources rares, comme les ventilateurs et l'équipement de protection individuelle (EPI), dans le développement de la COVID-19. Un tel défi sans précédent dévoile l'insuffisance des stratégies de planification d'urgence et d'affectation des ressources des systèmes de santé publics. Le manque de planification a poussé les décideurs à prendre des décisions impromptues concernant l'acquisition et l'affectation des ressources qui ont peut-être aggravé la pénurie extraordinaire.

Les États-Unis disposent de l'un des meilleurs systèmes de santé, avec un vaste réseau de professionnels de la santé, des établissements médicaux et des hôpitaux les mieux équipés ainsi que la technologie médicale la plus avancée. Pourtant, ils étaient sous-préparés en prévision de la COVID-19. Au début de la pandémie, on dénombrait de graves pénuries de fournitures médicales pour les diagnostics et la prévention, tant pour les fournisseurs de soins de santé que pour le grand public dans de nombreux États, ce qui a compliqué la tâche des autorités publiques. Selon un récent rapport publié par les anciens conseillers du président Obama en sciences et technologie (Holdren et coll., 2020), plusieurs facteurs ont contribué à la pénurie de ressources médicales :

- (1) *Les réserves nationales de fournitures médicales essentielles n'ont pas été suffisamment reconstituées avant la COVID-19.* Le Strategic National Stockpile (SNS) a été créé par le gouvernement américain en 2003 comme dépôt national de réserves de produits pharmaceutiques et de vaccins. Le SNS compte sur les crédits du Congrès américain. Une grande partie des réserves de masques a été épuisées lors de la pandémie de grippe H1N1 en 2009, et le Congrès n'a pas agi assez rapidement pour fournir les fonds

nécessaires à la reconstitution des réserves au niveau approprié prévu par de nombreuses études.

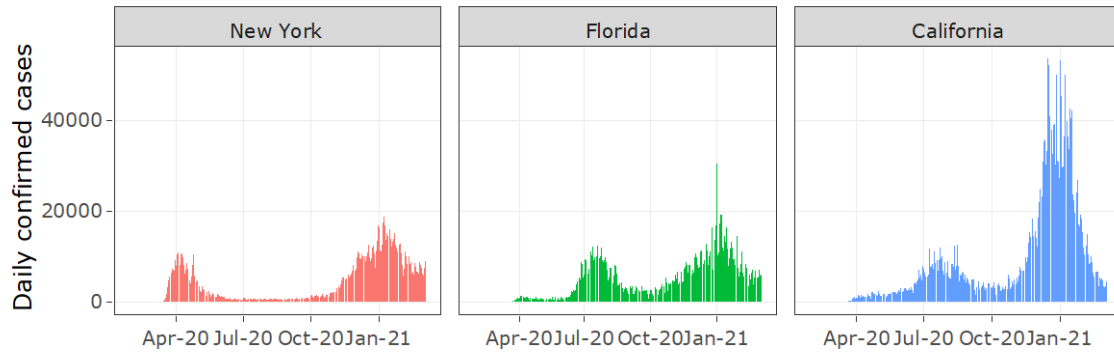
- (2) *Afin de réduire au minimum le coût des stocks et d'accroître l'efficacité, de nombreux fabricants et gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement en fournitures médicales sont passés à des systèmes d'inventaire juste-à-temps (JIT) avant la pandémie. Les fournitures ont été reçues juste à temps pour la production et la distribution. Le système JIT repose sur la capacité des fabricants de prévoir la demande avec précision. Les premières politiques publiques, comme les confinements, ont perturbé considérablement les chaînes d'approvisionnement dans le monde entier et les réserves étaient insuffisantes pour absorber la demande croissante.*
- (3) *Il y a eu manque de coordination entre le gouvernement fédéral et les États pour déployer les ressources existantes dans les régions les plus touchées du pays. Les professionnels de la santé s'exposent à un risque élevé lorsqu'ils traitent des patients sans EPI suffisant. Il était difficile de déceler et de contenir la propagation de la maladie sans tests adéquats. Plusieurs États des États-Unis ont agi de leur propre chef pour obtenir des fournitures auprès de fabricants étrangers et se sont lancés dans une guerre d'appel d'offres pour des fournitures limitées (Estes, 2020). Les ressources existantes n'étaient pas nécessairement réparties en fonction des besoins en santé (Tobin-Tyler, 2020). Parmi les États les plus durement touchés, plusieurs ont dû rationner les soins, tandis que d'autres ont peu utilisé leurs ressources.*

Bien que des enjeux liés aux politiques nécessitent l'intervention des décideurs, les universitaires peuvent permettre de mieux comprendre l'évolution de la pandémie et la dynamique de l'offre et de la demande qui en découle. Il est clairement nécessaire d'élaborer des bases scientifiques pour des stratégies d'adaptation visant à équilibrer l'offre et la demande et à rationner les ressources limitées. La planification d'urgence et l'affectation centralisée des ressources ont été préconisées comme deux stratégies cohérentes pour atténuer les conséquences économiques catastrophiques d'une pandémie; voir par exemple Jamison et coll. (2017). Ranney, Griffeth et Jha (2020) ont fait valoir que le gouvernement aurait dû suivre l'utilisation des ressources et la projection des besoins dans tous les départements et coordonner l'affectation des ressources pour réduire les pénuries entre les filiales et au fil du temps au cours d'une pandémie. À titre d'exemple comparable de planification centralisée, mentionnons la Federal Emergency Management Agency (FEMA), qui administre de nombreux programmes d'atténuation des risques précédant les catastrophes, comme l'assurance nationale contre les inondations, les subventions d'atténuation et les plans d'intervention après les catastrophes, y compris la constitution d'équipes de recherche et de sauvetage et d'équipes d'assistance médicale, et l'aide financière; pour plus de renseignements, voir Vanajakumari, Kumar et Gupta (2016), et Stauffer et Kumar (2021).

La planification centralisée et l'affectation des ressources sont des stratégies de gestion des risques appliquées depuis longtemps dans le secteur financier. Par exemple, les banques et les assureurs sont fortement réglementés par les gouvernements pour s'assurer qu'ils sont en mesure d'absorber de lourdes pertes financières et de soutenir des scénarios économiques défavorables (Segal, 2011). Selon l'hypothèse centrale du présent document, de nombreuses

techniques d'agrégation des risques et d'affectation du capital tirées de la littérature sur les finances et les assurances peuvent être élargies et appliquées à la planification et à l'affectation des ressources en cas de pandémie.

**Graphique 2 : Les États de New York, de la Floride et de la Californie connaissent différentes phases de la COVID-19, selon les données de *The Atlantic* (2020) au 12 septembre 2020**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

## 1.2 Étude de cas

Le graphique 2 illustre les cas quotidiens confirmés de COVID-19 dans les États de New York, de la Floride et de la Californie en 2020 et 2021. Plus précisément, la période des données utilisées dans le présent document va de mars 2020 à mars 2021. On pourrait constater que, parmi ces trois États, New York a d'abord été le plus durement touché par la pandémie en avril 2020, tandis que la Floride et la Californie ont toutes deux connu le premier pic de cas autour de juillet et août 2020; par ailleurs, même si New York et la Floride ont affiché un nombre comparativement moins élevé de cas en janvier 2021, la Californie a été affligée par la COVID-19 vers cette période.

Exécutons maintenant un exercice de réflexion. Imaginons que ces trois états avaient établi une alliance de mise en commun des ressources avant la pandémie. Ils auraient pu se compléter en fournissant les ressources excédentaires d'un état pour aider un autre état en déficit. Par exemple, en avril 2020, l'alliance aurait pu coordonner les efforts d'envoi de réserves initiales et d'augmentation de la production d'urgence pour soutenir New York; en juillet et août 2020, lorsque la Floride et la Californie ont été les plus durement touchées, des ressources inutilisées à New York auraient pu être mises à leur disposition; en janvier 2021, les ressources restantes, ainsi que la production supplémentaire, auraient dû être redirigées par New York et la Floride vers la Californie. Une telle coalition n'est pas inimaginable même dans un système politique décentralisé comme celui des États-Unis. En avril 2020, six états du nord-est (New York, Connecticut, New Jersey, Rhode Island, Pennsylvanie et Delaware) ont formé une coalition gouvernementale d'approvisionnement en équipement médical essentiel dans le but d'éviter une guerre de soumissions (Holveck, Racioppi et Shanes, 2020).

Le présent document vise à proposer un cadre global pour différentes régions afin d'optimiser la mise en commun et l'affectation des ressources à différentes étapes d'une pandémie, dans le but d'optimiser l'utilisation de ressources limitées. Bien que l'alliance des trois états susmentionnés soit utilisée à titre d'exemple tout au long du présent document, le cadre proposé peut également être mis en œuvre de façon coordonnée avec d'autres divisions administratives, comme les provinces et les territoires du Canada, ainsi qu'en collaboration internationale pour la production, l'approvisionnement, la distribution et la mise en commun des ressources.

### **1.3 Cadre de gestion des risques de pandémie et contribution**

De nombreux documents récents traitant de la COVID-19 portent sur la prédiction de la dynamique de transmission (p. ex. Fernández-Villaverde et Jones, 2020; Hortaçsu, Liu et Schweg, 2021), les cas d'infection (p. ex., Giordano et coll., 2020), l'impact économique (p. ex., Acemoglu et coll., 2020; Gregory, Menzio et Wiczer, 2020) et l'effet de l'intervention non pharmaceutique et d'autres politiques publiques (p. ex., Charpentier et coll., 2020). Cependant, à notre connaissance, les recherches universitaires sur les cadres quantitatifs pour la planification des mesures d'urgence et l'affectation des ressources en réponse au risque de pandémie sont rares. Bien que les secteurs des services bancaires et des assurances aient une longue et riche tradition de mise au point de technologies pour une gestion robuste des risques, l'accent a été mis en grande partie sur les risques financiers et assurables. Le présent document vise à tirer parti de la vaste littérature médicale sur la modélisation des épidémies et à appliquer à la gestion des risques de pandémie des concepts classiques tirés de la documentation sur la gestion des risques et l'assurance, comme l'établissement de réserves et l'affectation du capital.

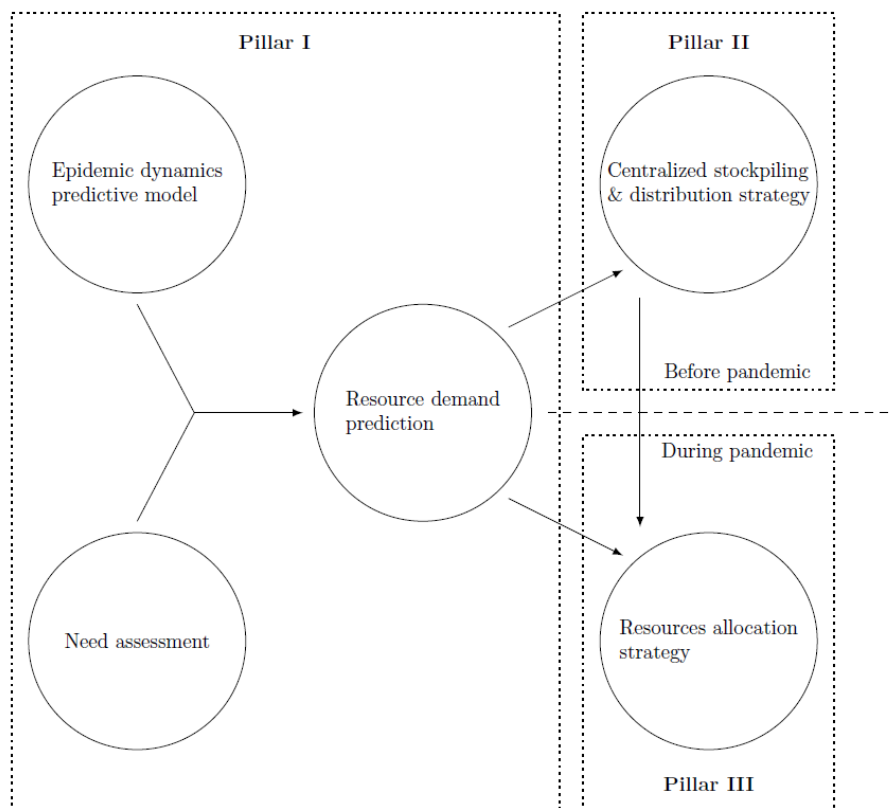
La planification stratégique en cas de pandémie exige une évaluation scientifique, plutôt que des décisions ponctuelles et des mesures disparates pour contrôler les dommages. Conformément aux pratiques actuelles découlant de stratégies nationales de préparation et de contrôle en cas de pandémie partout dans le monde, nous résumons et proposons un cadre à trois piliers pour la gestion quantitative du risque de pandémie :

- *Pilier I : Prévisions de l'offre et de la demande de ressources régionales et agrégées.* Tout plan de préparation avant une pandémie doit comprendre une évaluation de l'offre et de la demande et des prévisions. Le volet « offre » devrait comprendre des évaluations des stocks de ressources et de fournitures essentielles, de la capacité maximale des services et de la capacité d'acquisition et de production d'urgence. Pour ce qui est du volet « demande », il faut comprendre la dynamique d'une éventuelle pandémie dans toutes les régions et au-delà des frontières. Des données historiques et des modèles prédictifs peuvent être utilisés pour projeter l'évolution d'une pandémie et la hausse de la demande dans un système de santé.
- *Pilier II : Stockage et distribution centralisés.* Une autorité centrale coordonne les efforts visant à élaborer une stratégie nationale de préparation et à constituer des réserves de ressources essentielles, y compris des ressources préventives, diagnostiques et thérapeutiques. Un plan d'intervention est également nécessaire pour comprendre

comment l'autorité centrale peut fournir rapidement des ressources aux différentes régions afin de répondre à la hausse soudaine de la demande et d'équilibrer les priorités et les intérêts divergents.

- *Pilier III : Répartition des ressources entre le centre et les régions.* Un plan d'intervention en cas de pandémie est essentiel pour qu'une autorité centrale puisse contenir et contrôler la propagation d'une pandémie dans les régions relevant de sa compétence. Étant donné que la demande peut dépasser toute projection fondée sur les meilleurs efforts avant la pandémie, l'autorité doit concevoir des stratégies optimales qui utilisent le mieux possible les ressources existantes limitées et minimiser le coût économique du déséquilibre entre l'offre et la demande. Une stratégie de coordination doit être en place pour garantir des communications harmonieuses avec les autorités régionales. La stratégie de répartition doit reposer sur des méthodes scientifiquement solides, compte tenu des différences spatio-temporelles entre les régions pour assurer l'équité et l'impartialité.

**Graphique 3 : Cadre de gestion du risque de pandémie à trois piliers**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Il convient de souligner que même si le premier pilier ne fait pas l'objet du présent document, il joue un rôle essentiel pour assurer la pertinence et l'efficacité de la planification et des réponses des deuxième et troisième piliers.



Le cadre proposé s’applique peu importe les modèles prédictifs utilisée pour projeter les cas déclarés. La principale contribution technique du présent document réside dans les deuxième et troisième piliers, pour lesquels nous proposons des stratégies servant à centraliser le stockage, la distribution et l’affectation des ressources.

**Tableau 1 : Comparaison entre la gestion du capital et du risque de pandémie**

Gestion du risque de capital	Gestion du risque de pandémie
Secteur d’activité et risque global	Demande de ressources régionales et agrégées
Capital fondé sur le risque	Stockage centralisé
Affectation du capital des secteurs d’activité	Distribution et répartition centralisées
Compromis entre l’excédent ou l’insuffisance et le coût du capital	Équilibre entre l’offre et la demande et le coût économique

Le document s’inspire de deux sources dans la littérature sur l’assurance et la gestion des risques :

1. Les applications d’assurance des modèles épidémiques. Les premières applications des modèles épidémiques par compartiments sont apparues dans Hua et Cox (2009), dans lesquels la tarification réelle des options est utilisée pour la gestion du risque opérationnel, et dans Feng et Garrido (2011), qui ont analysé la couverture d’assurance contre les épidémies. L’étude de l’assurance contre les épidémies a été largement appliquée dans un contexte stochastique dans Lefèvre, Picard et Simon (2017), Lefèvre et Picard (2018), ainsi que Lefèvre et Simon (2020), et plus récemment inclus dans une évaluation du cyberrisque par Hillairet et Lopez (2021). Tous ces modèles par compartiments peuvent être utilisés au pilier I.
2. L’affectation du capital. La question de la gestion du capital est bien étudiée dans les documents sur les assurances. Les applications de la constitution de réserves et d’affectation du capital sont à la base des piliers II et III proposés. Le tableau 1 montre comment notre cadre proposé met en lumière la gestion classique du risque de capital. Bien que l’équilibrage spatial de l’affectation soit bien connu dans le secteur bancaire et celui de l’assurance (voir, par exemple, Dhaene et coll., 2012; Chong, Feng et Jin, 2021), le présent document propose un *nouvel équilibrage spatio-temporel* de la distribution et de la répartition des ressources, qui, à notre connaissance, n’a jamais été abordé dans la littérature sur les finances ou la gestion.

Voici le plan du présent document. Chacune des trois sections qui suivent présente en détail l’un des trois piliers du cadre proposé de gestion des risques de pandémie, ainsi que les interprétations économiques des stratégies optimales qui en découlent. Des exemples numériques sont intégrés à la discussion pour plus de clarté. Nous concluons à la dernière section par des discussions sur les applications potentielles et les travaux futurs.

## 2. Pilier I : Prédiction de la demande de ressources régionales et agrégées

Avant une pandémie, une autorité centrale devrait d'abord modéliser la dynamique de transmission de la pandémie dans chaque région. Peu importe le choix des modèles épidémiologiques, cette autorité devrait calibrer le modèle dans chaque région en fonction de son état de préparation et d'autres mesures d'urgence. En effet, des modèles de prévision épidémique ont été utilisés pour l'élaboration de politiques sur les soins de santé et les communications publiques; voir, par exemple, Leung et coll. (2020) et Tian et coll. (2020). Dans le présent document, en accord avec CovidActNow (2020) et Hill et coll. (2020), la population de chaque région est divisée en sept compartiments mutuellement exclusifs, soit les personnes vulnérables ( $S$ ), les personnes exposées ( $E$ ), les personnes légèrement infectées ( $I_1$ ), les personnes infectées hospitalisées ( $I_2$ ), les personnes infectées aux soins intensifs ( $I_3$ ), les personnes rétablies ( $R$ ) et les personnes décédées ( $D$ ). La dynamique entre ces sept compartiments est régie par un ensemble d'équations différentielles ordinaires et le modèle est, en bref, appelé SEIRD.

Ce modèle SEIRD est caractérisé par un ensemble d'équations différentielles ordinaires qui décrivent les flux de population entre tous les compartiments susmentionnés :

$$\begin{aligned} dS(t) &= -(\beta_1 I_1(t) + \beta_2 I_2(t) + \beta_3 I_3(t))S(t) dt, \\ dE(t) &= [(\beta_1 I_1(t) + \beta_2 I_2(t) + \beta_3 I_3(t))S(t) - \gamma E(t)] dt, \\ dI_1(t) &= [\gamma E(t) - (\delta_1 + p_1)I_1(t)] dt, \\ dI_2(t) &= [p_1 I_1(t) - (\delta_2 + p_2)I_2(t)] dt, \\ dI_3(t) &= [p_2 I_2(t) - (\delta_3 + \mu)I_3(t)] dt, \\ dR(t) &= [\delta_1 I_1(t) + \delta_2 I_2(t) + \delta_3 I_3(t)] dt, \\ dD(t) &= \mu I_3(t) dt. \end{aligned}$$

Tous les paramètres de l'ensemble des équations ont une signification clinique;  $\beta_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  est le taux de transmission de la catégorie des personnes infectée  $I_{ij}$ ;  $1/\gamma$  est la période de latence moyenne;  $I_i$ ;  $1/\gamma = 1, 2, 3$  est la durée moyenne de l'infection dans la catégorie  $I_{ij}$  avant le rétablissement à la classe  $R$ ;  $p_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  représente le taux d'aggravation des conditions et de besoin de soins de santé au niveau de gravité suivant;  $\mu$  est le taux pour les cas les plus graves de la catégorie  $I_3$  qui passe à la catégorie des personnes décédées  $D$ .

Supposons que le nombre total de personnes dans l'ensemble de la population est  $N$ . Chacune des équations différentielles ordinaires représente une décomposition d'un changement instantané de la population d'un compartiment. Par exemple, la première équation montre que le taux instantané de réduction du nombre de personnes susceptibles,  $-dS(t)$ , correspond à la somme des taux d'infection dus aux contacts avec les personnes infectées de toutes les catégories,  $\beta_1 I_1(t)S(t) + \beta_2 I_2(t)S(t) + \beta_3 I_3(t)S(t)$ . Les produits sont dus à la loi de l'action de masse en biologie. Par exemple, le taux d'infection secondaire chez les personnes légèrement infectées  $(\beta_1 N)I_1(t)(S(t)/N)$  peut être interprété comme le nombre de contacts adéquats que

chaque personne infectée fait pour transmettre la maladie  $\beta_1 N$  multiplié par le nombre de personnes infectées  $I_1(t)$ , multiplié par le pourcentage de chaque contact avec une personne susceptible,  $S(t)/N$ . Toutes les autres équations peuvent être expliquées de façon similaire. Les estimations de ces paramètres du modèle sont bien étudiées dans la documentation sur la COVID-19 et d'autres pandémies; voir, par exemple, Wu et McGoogan (2020), P. Yang et coll. (2020), et X. Yang et coll. (2020).

Selon ces paramètres, le ratio de reproduction de base  $R_0$  d'une pandémie est représenté par :

$$R_0 = \frac{N}{p_1 + \delta_1} \left( \beta_1 + \frac{p_1}{p_2 + \delta_2} \left( \beta_2 + \beta_3 \frac{p_2}{\mu + \delta_3} \right) \right).$$

Le ratio de reproduction de base  $R_0$  peut être estimé par des données empiriques et il est souvent utilisé pour calibrer d'autres paramètres. Dans ce qui suit, nous utiliserons une version discrétisée du modèle à compartiments. Par exemple, nous utilisons la notation  $I_{1,j} = I_1(j\Delta t)$  pour indiquer le nombre de cas légers projetés sur la  $j^{\text{e}}$  période, chacun avec la longueur  $\Delta t$ . Nous omettons parfois l'information sur  $\Delta t$ , car l'unité de temps peut varier selon la période de déclaration.

Il convient de souligner qu'en pratique il n'est pas facile d'estimer les paramètres du modèle SEIRD. L'exactitude des estimations est souvent limitée par la qualité des données. Par exemple, le nombre de cas positifs dans une région peut être modifié par sa capacité de test, ce qui nuit à la qualité des données sur la positivité. Toutefois, nous insistons sur le fait que le modèle SEIRD est largement accepté et qu'il devrait être exact pourvu que les paramètres du modèle soient estimés à l'aide de données exactes.

À partir de modèles prédictifs, comme les modèles régionaux du SEIRD susmentionnés, une autorité centrale pourrait prédire, avant une pandémie ou au début d'une pandémie, l'évolution de la demande au cours de la pandémie. Les ressources nécessitent différentes stratégies de stockage et d'affectation, selon leur durée de vie.

Dans le présent document, nous examinons deux types de ressources médicales : durables et à usage unique. Les ressources durables sont celles qui peuvent exécuter les fonctions requises pendant une longue période sans engager de dépenses importantes en entretien ou en réparation. Les ressources à usage unique sont celles qui sont conçues pour être utilisées une fois, puis éliminées. Les ventilateurs mécaniques et l'EPI sont des exemples représentatifs de ressources durables et à usage unique dans le présent document.

**Tableau 2 : Pourcentage de cas d'infection grave à l'unité de soins intensifs (USI) nécessitant un ventilateur**

	$\alpha \in [0, 1]$	Data source
China	< 20%	X. Yang et al. (2020)
Italy	[87%, 90%]	Grasselli et al. (2020)
Seattle	75%	Bhatraju et al. (2020)
Washington	71.4%	Arentz et al. (2020)

\*Ce tableau est seulement disponible en anglais.

## Ressources durables : Ventilateurs

Selon les constatations issues de la documentation médicale (renvoi au tableau 2), il existe des estimations du pourcentage  $\alpha$  des personnes infectées soumises à des soins intensifs qui nécessitent l'utilisation de ventilateurs mécaniques. Ces différences régionales peuvent être traitées dans des modèles régionaux distincts par compartiments.

Nous pouvons utiliser ces estimations pour projeter la demande de ventilateurs par  $X_j^{\text{VEN}(i)} = \alpha I_{3,j}^{(i)}$ , où  $i$  indique la  $i^{\text{e}}$  région de l'alliance et  $j$  indique  $j^{\text{e}}$  jour de la pandémie. Le modèle peut également être élargi pour inclure des pourcentages variables dans le temps de patients gravement atteints nécessitant un ventilateur. Les calculs du reste de l'étude se poursuivraient. Le graphique 4(a) ci-dessous montre la demande projetée de ventilateurs dans l'État de New York, en Floride et en Californie selon le modèle SEIRD proposé par CovidActNow (2020), qui est calibré en fonction des cas déclarés, publiquement disponibles au 5 mars 2021, et les paramètres d'évaluation de la demande à l'annexe B.

## Ressources à usage unique : Équipement de protection individuelle (EPI)

L'évaluation des besoins en EPI varie selon la catégorie des patients et la gravité de leur état de santé au chapitre des soins et la fonction des professionnels de la santé. Le tableau 3 présente un exemple d'évaluation des besoins exécuté par le Centre européen de prévention et de contrôle des maladies (2020). Compte tenu des estimations obtenues, nous pouvons projeter la demande régionale d'EPI selon

$$X_j^{\text{PPE}(i)} = \theta^E (S_{j-1}^{(i)} - S_j^{(i)}) + \theta^{I_2} I_{2,j}^{(i)} + \theta^{I_3} I_{3,j}^{(i)},$$

où  $\theta^E$  est le nombre d'ensembles d'EPI par cas exposé;  $\theta^{I_2}$  est le nombre d'ensembles d'EPI par jour par patient hospitalisé;  $\theta^{I_3}$  est le nombre d'ensembles d'EPI par jour par patient aux soins intensifs. Veuillez noter que  $S_{j-1} - S_j$  représente les cas exposés quotidiens alors que  $I_{2,j}$  et  $I_{3,j}$  assurent le suivi des cas d'infection existants qui nécessitent des soins médicaux. Le graphique 4(b) ci-dessous montre comment les exigences en matière de ventilateur et d'EPI devraient évoluer au fil du temps pour l'État de New York, la Floride et la Californie, selon le modèle de CovidActNow (2020) et l'évaluation des besoins en EPI à l'annexe B.

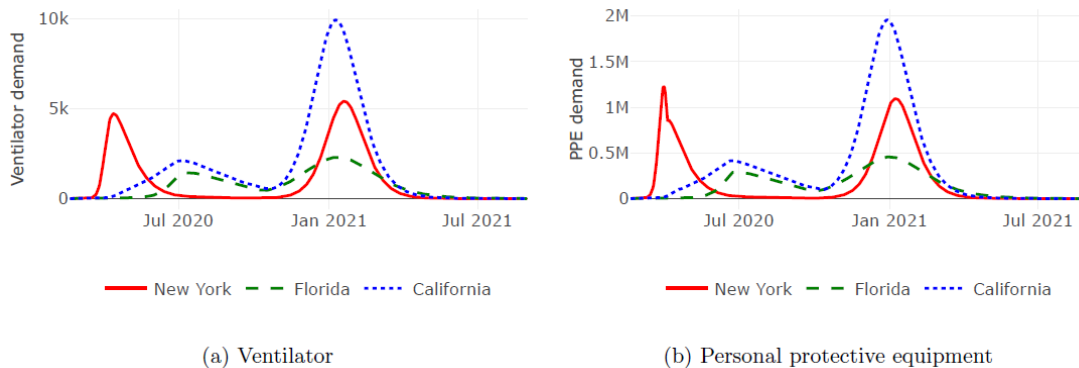
Dans le premier pilier, l'autorité centrale doit collaborer avec les autorités régionales et les professionnels de la santé pour prévoir la dynamique des demandes régionales. Toutes les données régionales sont ensuite compilées et agrégées pour former la base des prévisions de la demande en ressources à l'échelle du système. Supposons qu'il y a au total  $n$  régions dans un système de soins de santé ou une alliance de ressources médicales. Par exemple, la demande globale de ventilateurs peut être déterminée par  $X_j^{\text{VEN}} = \sum_{i=1}^n X_j^{\text{VEN}(i)}$ , tandis que la demande globale d'EPI peut être représentée par  $X_j^{\text{PPE}} = \sum_{i=1}^n X_j^{\text{PPE}(i)}$ .

Le graphique 5 ci-dessous montre comment la prévision de la demande globale de ventilateurs et d'EPI pour la pandémie de COVID-19 aurait pu être établie dans l'exemple hypothétique d'une alliance de mise en commun des ressources dans trois États.

**Tableau 3 : Quantité minimale d'ensembles d'EPI pour différents scénarios**

	Soupçonné	Cas de personnes infectées hospitalisées	Cas de personnes infectées aux soins intensifs
Personnel de la santé	Nombre d'ensembles par cas $\theta_E$	Nombre d'ensembles par jour par patient	
		$\theta_{I_h}$	$\theta_{I_s}$
Soins infirmiers	1 à 2	6	6 à 12
Soins médicaux	1	2 à 3	3 à 6
Entretien	1	3	3
Soins infirmiers auxiliaires et autres services	0 à 2	3	3
Total	3 à 6	14 à 15	15 à 24

**Graphique 4 : Prédiction de la demande régionale de ventilateurs et d'EPI  
Alliance entre l'État de New York, la Floride et la Californie**



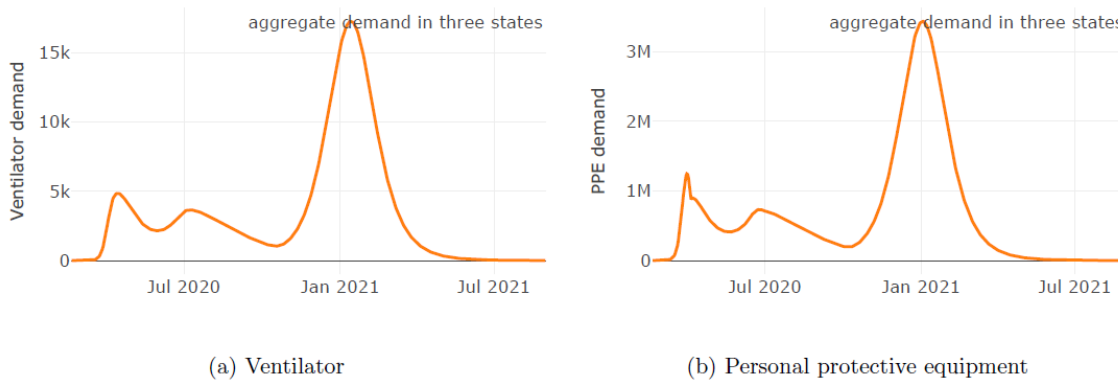
\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Mentionnons que les projections pour les ventilateurs et les ensembles d'EPI présentent des tendances très semblables, car elles relèvent du même modèle SEIRD. Les pics de demande pour les ventilateurs sont retardés par rapport à ceux des ensembles d'EPI au graphique 5 en raison du fait qu'il peut s'écouler quelques jours avant que les patients nouvellement diagnostiqués présentent des symptômes qui nécessitent une intervention en ventilation. La projection de la demande régionale et globale permet aux autorités sanitaires de bien comprendre la *concurrence temporelle* pour des ressources essentielles.

Il convient de souligner que les modèles prédictifs du pilier I, comme le modèle SEIRD dont il est question dans la présente section, sont utilisés à de multiples fins, comme le montre le

graphique 3. Tout d’abord, ils doivent être élaborés avant une pandémie à l’aide de données historiques pour servir de base aux prévisions de la demande pour la planification d’urgence du pilier II. Ensuite, à mesure que pointe une pandémie, les modèles prédictifs doivent également être recalibrés et mis à jour en fonction des connaissances médicales les plus récentes et des cas déclarés. De nouvelles prévisions seraient ensuite intégrées aux modèles pour déterminer les stratégies d’affectation optimales du pilier III. À mesure que les connaissances médicales sur la maladie virale évoluent et que les modèles prédictifs s’améliorent au fil du temps, les piliers I et III pourraient être revus d’une période à l’autre. Lorsqu’un calendrier de distribution des ressources doit être mis à jour, nous pouvons revenir au pilier II, de sorte que le cadre à trois piliers puisse être utilisé de façon circulaire tel que les piliers I, II, III, I, III, I, III, I, II, III, etc. Ce point sera approfondi à la fin du présent document.

**Graphique 5 : Prévion de la demande globale de ventilateurs et d’EPI dans l’État de New York, en Floride et en Californie**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

### 3. Pilier II : Réserves et distribution centralisés

Au fil de la pandémie, de nombreux hôpitaux et établissements de santé pourraient manquer de produits pharmaceutiques et d'autres ressources essentielles avant que la production d'urgence comble l'écart et que des fournitures supplémentaires deviennent disponibles. Pour relever le défi d'une flambée de la demande au début d'une pandémie, de nombreux pays maintiennent des dépôts nationaux d'antibiotiques, de vaccins, d'antidotes chimiques, d'antitoxines et d'autres fournitures médicales essentielles. Une *stratégie centralisée de réserves* vise à fournir une mesure provisoire pour répondre à la flambée de la demande de ressources aux premières étapes de la pandémie. Il existe de la littérature bien établie sur les stratégies de réserves rattachées à des pandémies de grippe; voir, par exemple, Greer et Schanzer (2013) et Siddiqui et Edmunds (2008).

Il convient de se rappeler qu'une stratégie pratique de réserves est souvent un *équilibre entre l'offre adéquate et le coût économique*. D'une part, la conservation de réserves moindres représente une situation courante puisque les ressources et leur entreposage peuvent entraîner des coûts élevés, et que la demande réelle pendant la phase d'éclosion pourrait s'écarter de la projection; par exemple, Ellison (2020) a soutenu que jusqu'à 20 États américains prévoyaient des pénuries de lits dans les USI lorsque les cas de COVID-19 ont atteint leur pic. D'autre part, des réserves excessives à long terme pourraient entraîner des pertes inutiles, en particulier pour les ressources jetables et périssables; par exemple, Facher (2020) a indiqué qu'en mars 2020, pendant la pandémie de COVID-19, le SNS aux États-Unis a stocké 13 millions de masques N95, dont cinq millions ont dépassé le délai d'utilisation, ce qui a contribué en partie à la pénurie nationale de masques.

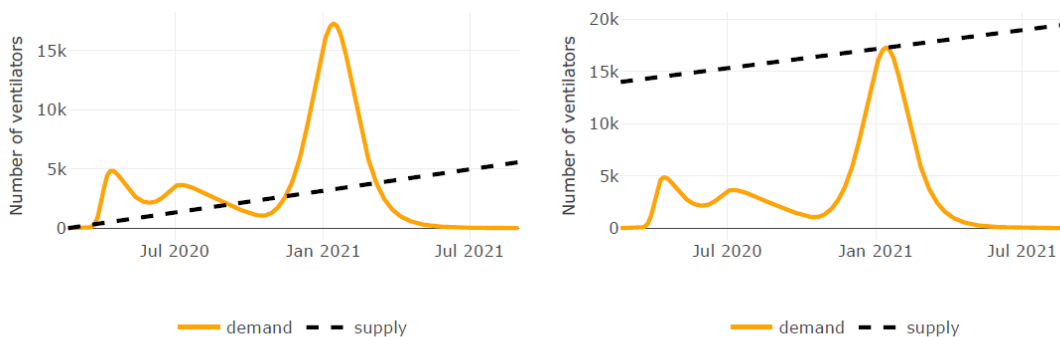
En vertu du deuxième pilier du cadre proposé et d'après l'estimation de la demande en ressources agrégées, l'autorité centrale a pu ensuite élaborer des stratégies de stockage et de distribution en temps avant une pandémie. Il convient de noter que les ressources durables comme les ventilateurs, peuvent être réutilisées pendant toute la pandémie, tandis que les ressources à usage unique, comme les ensembles d'EPI, doivent être éliminées après une seule utilisation. Nous devons donc les traiter séparément pour optimiser les stratégies centralisées de stockage et de distribution.

#### 3.1 Ressources durables : Ventilateurs

Habituellement, une autorité centrale doit déterminer une réserve initiale optimale  $K_0$  de ressources à maintenir dans un endroit centralisé. De plus, pour répondre aux hausses soudaines de la demande, l'autorité peut devoir conclure des ententes contractuelles avec des fournisseurs pour les commandes urgentes, lesquelles peuvent être limitées par le taux de production maximal de  $a$  unités par jour pendant une pandémie. Comme les ventilateurs sont des biens durables, leurs réserves ne diminuent pas au fil du temps en raison de leur utilisation. Nous supposons qu'ils peuvent être installés dans différentes régions à un coût négligeable. Par conséquent, le nombre total de ventilateurs disponibles dans toute l'alliance est représenté par  $K_j = K_0 + aj$ , le  $j^{\text{e}}$  jour depuis le début de la pandémie. Par conséquent, la seule variable de décision de l'autorité centrale dans le cas des ventilateurs est la taille initiale de la réserve  $K_0$ . Comme les ventilateurs sont des biens durables, il y aura une importante réserve inutilisée, qui

pourra être réaffectée une fois la pandémie terminée. Le présent document porte plus particulièrement sur la gestion des ressources pendant la pandémie; la réaffectation n'est donc pas envisagée ici.

**Graphique 6 : Deux scénarios extrêmes de réserve initiale  $K_0$  de ventilateurs**



(a) Extreme understocking

(b) Extreme oversupply

\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Pour mieux expliquer la nécessité d'une réserve initiale optimale  $K_0$ , supposons deux cas extrêmes aux graphiques 6a et 6b pour l'alliance des trois États. À une extrémité, l'autorité centrale peut décider de ne pas constituer de réserve initiale, mais simplement s'en remettre à la limite maximale de production d'urgence pendant la pandémie; le graphique 6a montre clairement de graves pénuries à tous les sommets de la demande globale de ventilateurs, vers janvier 2021. À l'autre extrémité, supposons que l'autorité centrale décide de constituer une extraordinaire réserve initiale de ventilateurs afin de répondre à la plus forte demande globale de ventilateurs; le graphique 6b illustre un excédent extrême manifeste de ventilateurs pendant la majeure partie de la pandémie; de plus, dans ce cas, le coût économique d'une réserve importante peut être énorme. Par conséquent, l'autorité centrale doit établir un équilibre délicat pour une réserve initiale  $K_0$  qui tient compte du coût économique de la pénurie et de l'offre excédentaire, et des coûts d'entreposage.

Examinons le modèle d'optimisation suivant pour la taille d'une réserve initiale.

$$\min_{K_0 \geq 0} \sum_{j=1}^m \omega_j \left( \frac{\theta_j^+}{2} (X_j^{\text{VEN}} - (K_0 + aj))_+^2 + \frac{\theta_j^-}{2} (X_j^{\text{VEN}} - (K_0 + aj))_-^2 + c_j (K_0 + aj) \right) + c_0 K_0, \quad (1)$$

où  $m$  représente le nombre de jours de pandémie,  $\omega_j$  est un facteur de pondération de l'importance de la précision des coûts le  $j^{\text{e}}$  jour de la pandémie,  $\theta^+$  est un coût économique par unité quadratique de pénurie,  $\theta^-$  est un coût d'option d'une unité quadratique d'offre excédentaire,  $c_j$  représente le coût total de possession d'un ventilateur par jour, et  $C_0$  est le coût initial de stockage, qui peut comprendre à la fois le coût d'acquisition et le coût prévu de possession (entreposage, entretien, logistique des stocks, coût d'option). La forme quadratique représente le coût économique réel du déséquilibre entre l'offre et la demande. Par exemple, le premier terme est le produit de la *quantité* de la pénurie

$$X_j^{\text{VEN}} - (K_0 + aj)_+$$

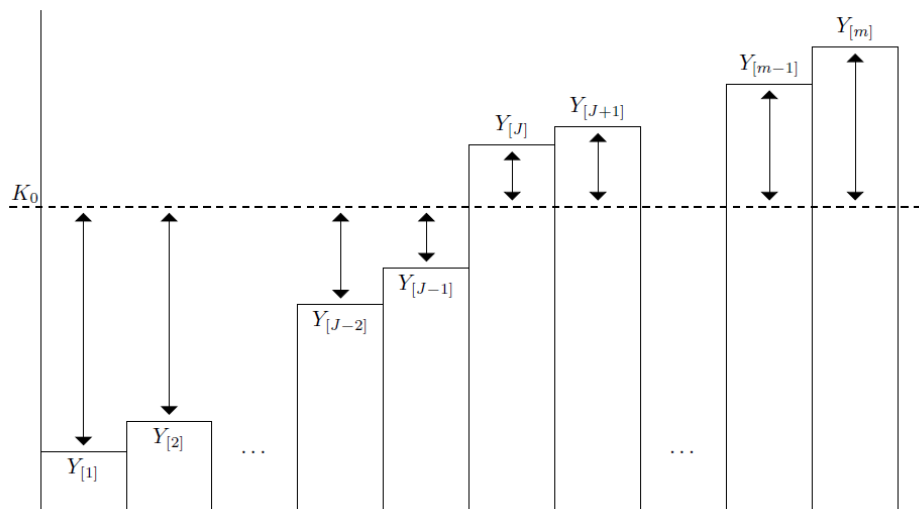


et le *coût variable par unité* (linéaire) de la pénurie

$$(\theta_j^\pm / 2)[X_j^{\text{VEN}} - (K_0 + aj)]_+$$

En d'autres termes, plus la pénurie est importante, plus le prix économique à payer est élevé. Contrairement à une valeur absolue de pénurie ou d'excédent, la forme quadratique reflète sans doute mieux l'impact économique du déséquilibre entre l'offre et la demande, dont le coût économique réel doit être déterminé par la loi de la demande. Selon une autre interprétation, un déséquilibre grave peut avoir un effet d'entraînement sur la société, comme provoquer la panique publique et l'érosion de la confiance dans la capacité du gouvernement de gérer les crises, ce qui entraîne des coûts supplémentaires pour contrôler les dégâts. Par conséquent, le coût économique augmente de façon non-linéaire avec un déséquilibre. Pour la même raison, nous intégrerons des formes quadratiques semblables au problème de planification d'urgence de l'EPI ainsi qu'aux problèmes d'affectation des ressources dans les sections suivantes. Le facteur de pondération  $w_j$  peut être utilisé à différentes fins. Par exemple, il peut être raisonnable de supposer que la précision de répondre aux besoins dans un avenir rapproché est plus importante que dans un avenir lointain compte tenu de l'incertitude entourant toutes prévisions. Un autre exemple pourrait représenter la façon de rendre le facteur de pondération proportionnel à la demande quotidienne  $X_j$ , car le déséquilibre entre l'offre et la demande peut avoir une plus grande incidence sur les régions densément peuplées. Si la préservation de la vie est un objectif primordial, il est alors possible de fixer le coût d'option de l'offre excédentaire  $\theta^-$  à zéro. En pratique, nous pourrions mesurer  $\theta^+$  et  $\theta^-$  par régression de la pénurie ou de l'offre excédentaire déclarée par rapport à la perte estimée du produit intérieur brut ou d'autres mesures économiques en période de pandémie.

**Graphique 7 : Réserve initiale optimale  $K_0$  par rapport aux pénuries prévues sans réserve initiale**



Pour comprendre la solution analytique à ce problème, nous devons examiner la pénurie projetée sans réserve initiale,  $Y_j := X_j^{\text{VEN}} - aj$ , pour  $j = 1, \dots, m$ , c'est-à-dire la demande accumulée moins l'offre accumulée, indépendamment de la réserve initiale. Il convient de

noter que nous considérons l'offre accumulée parce que les ressources sont durables et peuvent être réutilisées. Lorsque  $Y_j > 0$ , on pige dans la réserve initiale puisque la demande actuelle dépasse l'offre accumulée. Sinon, la réserve augmente à mesure que l'offre dépasse la demande. Puisque les coûts économiques d'une pénurie et d'un excédent sont pondérés différemment, la valeur de cette fonction objective dépend du nombre de jours de diminution de la réserve ( $Y_j > 0$ ) et du nombre de jours d'augmentation de la réserve ( $Y_j < 0$ ). La solution analytique à ce problème nécessite le triage des pénuries projetées en ordre croissant. Soit la séquence triée par  $\{Y_{[j]}, j = 1, \dots, m\}$ , où  $Y_{[j]}$  représente la  $j^e$  plus petite pénurie projetée.

Dans la fonction objective (1), le coefficient de coût  $\theta_j^\pm$  s'applique selon que la réserve dépasse ou non la demande. Si  $K_0$  est placé sous  $Y_{[j]}$ , il y a une pénurie dans le système de soins de santé et le coefficient de coût  $\theta^+$  est appliqué. Autrement, il y a excédent dans le système et le coefficient de coût  $\theta^-$  est appliqué. L'optimalité est atteinte lorsque le  $K_0$  est maintenu dans une position délicate (voir le graphique 7). La nature de la somme des pénuries quadratiques dans (1) détermine que la réserve initiale optimale  $K_0^*$  devrait être comprimée entre  $Y_{[j-1]}$  et  $Y_{[j]}$  de sorte que

$$Y_{[j-1]} \leq \frac{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- \left( Y_{[j]} - \frac{c_{[j]}}{\theta_{[j]}^-} \right) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ \left( Y_{[j]} - \frac{c_{[j]}}{\theta_{[j]}^+} \right) - c_0}{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+} \leq Y_{[j]}.$$

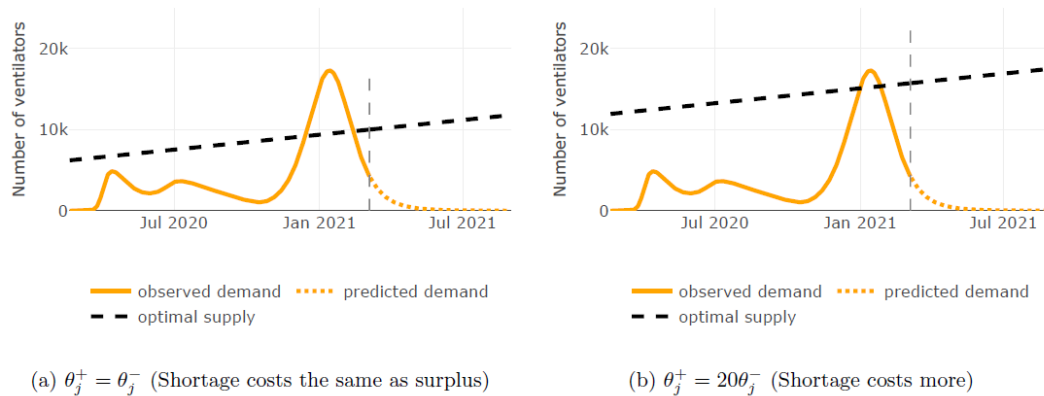
Une fois  $J$  identifié, la réserve optimale  $K_0^*$  est représentée par

$$K_0^* = \max \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- \left( Y_{[j]} - \frac{c_{[j]}}{\theta_{[j]}^-} \right) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ \left( Y_{[j]} - \frac{c_{[j]}}{\theta_{[j]}^+} \right) - c_0}{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+}, 0 \right\}.$$

La preuve de ce résultat se trouve à l'annexe A.1. Ce résultat montre que la réserve initiale optimale  $K_0$  est la moyenne pondérée de toutes les pénuries projetées actualisées par le coût de possession par rapport au coût économique de la pénurie,  $Y_{[j]} - c_{[j]}/\theta_{[j]}^\pm$ . Le terme

d'ajustement  $c_{[j]}/\theta_{[j]}^\pm$  indique que plus le coût de possession est élevé par rapport au coût économique du déséquilibre, moins il faut acheter de ventilateurs. Il est logique que si le coût de possession des ressources durables est trop élevé, l'autorité centrale d'un pays pauvre peut avoir peu de moyens financiers pour payer les réserves et n'avoir d'autre choix que de faire face au déséquilibre entre l'offre et la demande. Par contre, si le coût économique du déséquilibre est trop élevé en raison d'une perte de productivité ou même du ressentiment de la société à l'égard de l'incapacité du gouvernement de répondre à la demande, alors l'autorité centrale ignorerait le coût de possession et ferait tout ce qui est possible pour réduire la pénurie.

**Graphique 8 : Taille de la réserve initiale optimale  $K_0$  pour les ventilateurs selon différents coefficients de pondération du coût économique**



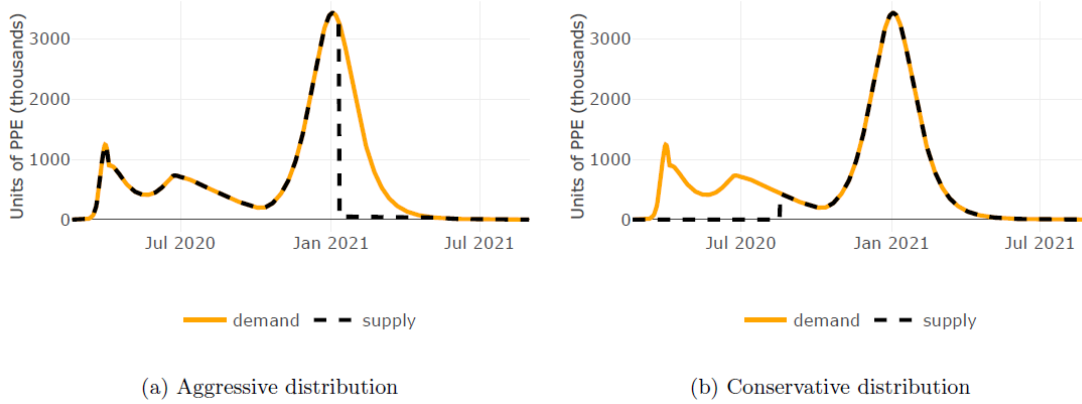
\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Le graphique 8 illustre la taille de la réserve initiale optimale dans l'étude de cas. Les paramètres du modèle sont présentés à l'annexe B. Mentionnons que les réserves initiales optimales sont choisies pour réduire les pénuries au stade précoce et l'offre excédentaire au stade avancé de la pandémie, comparativement aux stratégies présentées au graphique 6. Lorsque la pénurie de ressources coûte autant ou moins que l'excédent de ressources, le graphique 8a montre que la stratégie exige une réserves initiale moindre en raison de l'offre excessive une fois la pandémie terminée. En revanche, si la pénurie coûte plus que l'excédent, la stratégie consiste à réduire les pénuries au stade précoce au détriment de l'offre excédentaire aux stades avancés (voir le graphique 8b).

### 3.2 Ressources à usage unique : Équipement de protection individuelle (EPI)

Comme dans le cas des ressources durables, l'autorité centrale doit établir une réserve initiale de  $K_0$  ressources à usage unique, comme l'EPI, et conclure des ententes contractuelles avec des fournisseurs d'urgence qui peuvent offrir un approvisionnement supplémentaire au rythme de production de  $a$  unités par jour. Comme l'EPI est à usage unique, pendant la pandémie, l'autorité centrale doit faire des réserves d'ensembles d'EPI non seulement pour le présent mais aussi pour éventuellement les déployer plus tard afin de répondre à une hausse de la demande. Par conséquent, l'autorité centrale doit planifier la taille initiale de la réserve  $K_0$  et la quantité de distribution  $k_j$  à toutes les régions le jour  $j$ . La dynamique du stockage centralisé  $\{K_j, j = 0, 1, \dots, m\}$  est déterminée par la relation récursive  $K_j = K_{j-1} + a - k_j + (k_j - X_j)_+$  for  $j = 1, \dots, m$ . La relation peut être interprétée comme suit. La réserve actuelle  $K_j$  est fondée sur la réserve de la période précédente  $K_{j-1}$ , augmentée de l'excédent net d'une nouvelle offre  $a$  moins la distribution prévue jusqu'à concurrence de la demande totale,  $\max\{k_j, X_j\}$ . En d'autres termes, si nous prenons des dispositions pour distribuer  $k_j$  unités mais que nous ne pouvons consommer que  $X_j < k_j$ , la quantité inutilisée devrait être ajoutée à la réserve centralisée pour utilisation future.

### Graphique 9 : Deux scénarios extrêmes de calendrier de distribution $k_1, k_2, k_m$ pour l'EPI



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Examinons deux cas extrêmes aux graphiques 9a et 9b de l'étude de cas. Dans un cas extrême, supposons que l'autorité centrale décide de distribuer le plus d'articles possible pour répondre à la demande jusqu'à ce que la réserve centralisée soit épuisée. Cette stratégie agressive de distribution anticipée est illustrée au graphique 9a. Après l'épuisement des réserves, le système ne compte que sur la nouvelle offre, qui n'est manifestement pas suffisante pour répondre aux demandes, ce qui peut engendrer de graves pénuries vers le pic de janvier 2021. Dans l'autre cas extrême, l'autorité centrale peut choisir de ne pas disperser le matériel jusqu'à ce que l'entrepotage soit jugé suffisant pour couvrir toutes les demandes futures. Une telle stratégie de distribution prudente est illustrée au graphique 9b. Cette stratégie pose un défi : l'autorité centrale devrait faire face aux répercussions de ne pas fournir d'aide au début de la pandémie. Par conséquent, il est sensé que l'autorité centrale élabore un calendrier de distribution qui tient compte de l'équilibre temporel des divers besoins de toutes les régions. Nous présentons ici le problème d'optimisation d'une réserve initiale et du calendrier de distribution des ressources à usage unique.

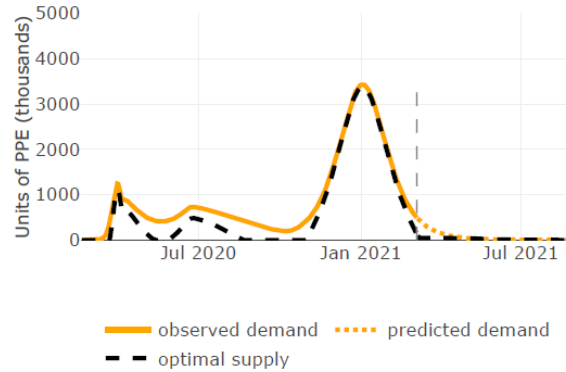
$$\min_{K_0 \geq 0, k_1, \dots, k_m} \sum_{j=1}^m \omega_j \left( \frac{\theta_j^+}{2} (X_j^{\text{PPE}} - k_j)_+^2 + \frac{\theta_j^-}{2} (X_j^{\text{PPE}} - k_j)_-^2 + c_j K_j \right) + c_0 K_0 \quad (2)$$

tel que

$$K_j = K_{j-1} + a - k_j + (k_j - X_j^{\text{PPE}})_+ \geq 0 \quad \text{et} \quad k_j \geq 0, \quad \text{pour } j = 1, 2, \dots, m,$$

où  $c_j$  est le coût de possession centralisé par unité d'EPI par jour. Il convient de souligner que l'entrepotage centralisé doit être maintenu non négatif à des fins pratiques et que le montant de la distribution doit également être maintenu non négatif.

**Graphique 10 : Calendrier de distribution optimal  $k_1, k_2, \dots, k_m$  et taille initiale de la réserve  $K_0$  d'EPI pour l'alliance de mise en commun des ressources à trois États**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Le graphique 10 illustre le cas d'un calendrier de distribution optimal pour l'alliance des trois États. Mentionnons que le calendrier de distribution optimal de l'offre demeure en deçà de la trajectoire de la demande. La faible pénurie résulte de la prise en compte du coût de possession. Si le coût de possession était nul, l'offre optimale devrait correspondre exactement à la demande en tout temps. La réserve initiale peut être fixée artificiellement à un niveau élevé de sorte que tout montant souhaité puisse être reporté d'une période à l'autre et durer suffisamment longtemps pour répondre à toutes les demandes futures. Compte tenu du coût de possession, le graphique 10 révèle également une stratégie de distribution qui, essentiellement, ignore les demandes au début d'une pandémie et après son extinction, et se concentre plutôt sur la satisfaction des demandes au premier pic de la pandémie. Rappelez-vous que le facteur de pondération important  $\omega_j$  dans cet exemple se veut proportionnel à l'ampleur de la demande. Par conséquent, la stratégie priorise la satisfaction de la demande au niveau du premier sommet sur d'autres périodes en raison de la forte demande lors du premier sommet. Si nous choissions le même facteur de pondération  $\omega_j$  pour toutes les périodes, la pénurie serait plus équilibrée à toutes les périodes.

Ce problème d'optimisation est difficile à résoudre de façon analytique. Toutefois, il est facile de démontrer que tout système de distribution de l'excédent  $k_j > X^{\text{PPE}}$  doit être sous-optimal et que le problème peut donc être simplifié comme suit :

$$\min_{K_0 \geq 0, k_1, \dots, k_m} \sum_{j=1}^m \omega_j \left( \frac{\theta_j^+}{2} (X_j^{\text{PPE}} - k_j)^2 + c_j K_j \right) + c_0 K_0$$

tel que  $K_j = K_{j-1} + a - k_j \geq 0$  et  $0 \leq k_j \leq X^{\text{PPE}}$ , pour  $j = 1, 2, \dots, m$ ,

En raison de la convexité, il peut être résolu numériquement au moyen de la programmation convexe disciplinée (PCD), ce qui nécessite un temps de calcul minimal (Grant, Boyd et Ye, 2006). La solution illustrée au graphique 10 est obtenue à l'aide d'un ensemble R, CVXR, élaboré à partir de la méthode PCD (Fu, Narasimhan et Boyd, 2020).

## 4. Pilier III : Affectation centralisée des ressources

En période de graves pénuries de ressources, un effort coordonné devient nécessaire pour obtenir des fournitures supplémentaires et rationner les ressources existantes limitées. Les ressources existantes ne sont pas nécessairement réparties en fonction des besoins en matière de santé ou de justice (Tobin-Tyler, 2020). De nombreux États les plus durement touchés doivent rationner les soins, tandis que d'autres ont une faible utilisation de leurs ressources. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ce ne sont pas toutes les régions qui ont connu une hausse de la demande en même temps (voir le graphique 2). On prétend depuis longtemps que le gouvernement fédéral américain aurait dû suivre l'utilisation actuelle et la projection des besoins dans tous les États, et coordonner l'affectation des ressources pour réduire les pénuries dans toutes les régions et au fil du temps, pendant la pandémie de COVID-19 (Ranney, Griffeth et Jha, 2020).

Il existe deux types courants de problèmes d'affectation des ressources en cas de pandémie, qui peuvent tous deux être formulés et présentés au pilier III du cadre proposé :

1. *Mise en commun des ressources au niveau macroéconomique.* Une autorité centrale agit dans le meilleur intérêt d'un regroupement de nombreuses régions pour accroître l'offre et coordonner la distribution des ressources existantes et supplémentaires entre les différents fournisseurs de soins de santé régionaux.
2. *Rationnement au niveau microéconomique.* Confrontés au déséquilibre de l'offre et de la demande de ressources et de matériel médicaux, les hôpitaux doivent souvent prendre des décisions difficiles, mais nécessaires pour rationner les ressources existantes limitées, ainsi que les nouvelles fournitures.

Même si, dans les deux cas, l'objectif de l'affectation consiste à fournir des ressources limitées là où elles sont le plus nécessaires, la mise en commun au niveau macroéconomique tient essentiellement compte des différences spatio-temporelles, tandis que le rationnement au niveau microéconomique met l'accent sur l'efficacité des soins de santé et la justice. L'établissement de normes, de protocoles et de politiques peut avoir une incidence profonde sur le fonctionnement du système de soins de santé en période de crise. Par conséquent, la meilleure pratique d'affectation des ressources devrait reposer sur une évaluation scientifique plutôt que sur des décisions ponctuelles prises à la volée et un ensemble disparate de règles de contrôle des dommages.

1. *L'affectation des ressources doit être fondée sur une approche globale pour répondre aux préoccupations de tous les intervenants.* L'utilisation de ressources limitées donne souvent lieu à des conflits entre les intérêts et les priorités. Par exemple, lorsque les fournitures médicales sont rares, de nombreux pays, États et villes se disputent les ressources. Bien que chaque État agisse dans son intérêt supérieur pour acquérir des instruments médicaux et de l'équipement de protection, un gouvernement fédéral peut envisager le besoin urgent comme une possibilité de prendre le contrôle de la marchandise pour grossir une réserve centralisée. Une approche globale vise à trouver un équilibre entre différents objectifs pour divers intervenants.

2. *Des méthodes scientifiques d'affectation des ressources devraient être élaborées en fonction d'un ensemble d'objectifs d'optimisation, répondre à certains critères éthiques et humanitaires et tenir compte des contraintes logistiques et budgétaires.* Lorsqu'une pandémie éclate, elle se propage souvent d'un milieu à l'autre dans les régions géographiques en raison de sa dynamique de transmission et elle touche différents secteurs d'un système de santé dans une réaction en chaîne. Les besoins médicaux peuvent varier sensiblement selon les caractéristiques démographiques et d'autres facteurs socioéconomiques. Bien qu'il n'y ait pas de solution universelle pour régler les problèmes d'affectation, il existe un ensemble de critères quantifiables et justifiables.

Même s'il est difficile d'aborder tous ces critères dans un seul modèle, nous croyons qu'ils peuvent être formulés de façon similaire, comme dans la section qui suit.

- **Minimiser la pénurie et l'offre excédentaire**

Les décideurs doivent tenir compte des différences spatio-temporelles de l'offre et de la demande au cours d'une pandémie. Les autorités doivent absolument affecter plus de ressources aux épicentres d'une pandémie qu'aux autres régions où la menace est moins imminente. Ainsi, la ville de New York a été le premier comté de l'État de New York visé par la pandémie de COVID-19, alors que d'autres comtés avaient peu ou pas de cas déclarés (Associated Press, 2020). Le gouverneur de l'État a émis un décret pour saisir les ventilateurs et autres équipements de protection sous-utilisés d'hôpitaux et d'entreprises privés. Alors que le nombre de personnes infectées se stabilise ou même décline dans les régions ravagées par la pandémie, une autorité centrale pourrait devoir se tourner vers d'autres secteurs d'éclosions potentielles et affecter des ressources en prévision de nouvelles vagues. C'est devenu évident lorsque de nombreux États américains aux premiers stades de l'épidémie de COVID-19 ont pris des mesures préventives pour s'approvisionner en fournitures médicales auprès de pays comme la Chine et la Corée du Sud qui avaient développé des capacités de production après avoir maîtrisé leurs propres épidémies locales. Par conséquent, il est sensé d'élaborer une stratégie d'affectation qui minimise les pénuries et l'offre excédentaire dans différentes régions et au cours du cycle de vie d'une pandémie.

- **Promouvoir et récompenser la valeur instrumentale**

L'équipement de prévention essentiel et les soins médicaux devraient d'abord être fournis aux travailleurs de la santé de première ligne et aux employés des entreprises essentielles et des infrastructures essentielles. Non seulement parce qu'ils courent un risque élevé en raison de leur exposition aux maladies infectieuses, mais aussi parce que la société assume un coût économique élevé lorsque ces travailleurs deviennent malades et sont incapables de retourner au travail. L'absence d'effectifs suffisants en première ligne peut engendrer de graves perturbations dans les services publics, ce qui peut avoir des répercussions sur le reste de l'économie. L'accès prioritaire aux soins médicaux peut être un incitatif essentiel au maintien en poste.

- **Accorder la priorité aux plus affectés**

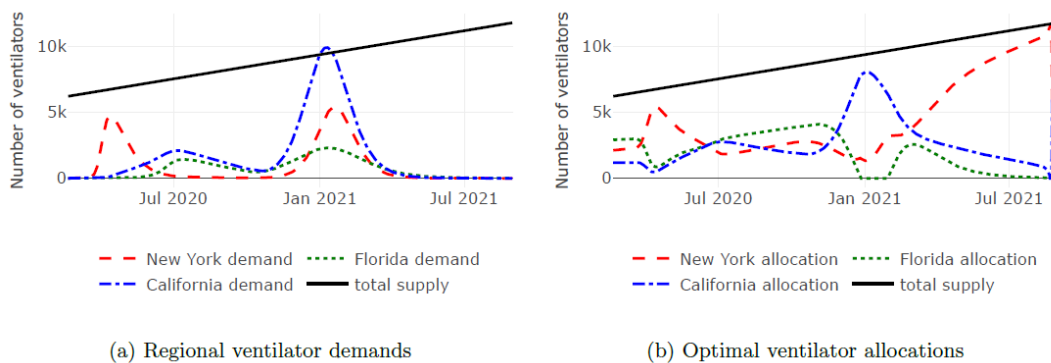
Le but ultime d'un système de santé est de sauver des vies. L'accès aux traitements médicaux essentiels doit être réservé aux patients qui font face à des situations potentiellement mortelles lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'équipement, comme des ventilateurs.

- **Maximiser les avantages des traitements**

La maximisation des avantages nécessite un pronostic de probabilité de survie des patients grâce au traitement. Une étude récente sur des patients atteints de la COVID-19 aux États-Unis a révélé que la plupart d'entre eux n'avaient pas survécu après avoir été placés sous ventilateur mécanique (Preidt, 2020). Afin de maximiser les avantages, l'accès au traitement par ventilateur devrait être priorisé pour les patients plus jeunes qui peuvent en bénéficier le plus et qui ont plus de chances de survie. Par exemple, de nombreux hôpitaux en Italie ont abaissé le seuil d'âge de 80 à 75 ans afin de rationner le nombre de ventilateurs limités (Rosenbaum, 2020). Une telle stratégie mène souvent à des dilemmes éthiques lorsqu'elle est en conflit avec la priorisation des plus affectés.

Le troisième pilier du cadre proposé de gestion des risques de pandémie consiste à affecter des ressources limitées à différentes régions, en s'appuyant sur les stratégies optimales de réserve et de distribution centralisées. Les graphiques 11a et 12a regroupent la demande régionale en ressources et l'offre globale optimale pour faciliter l'exposition.

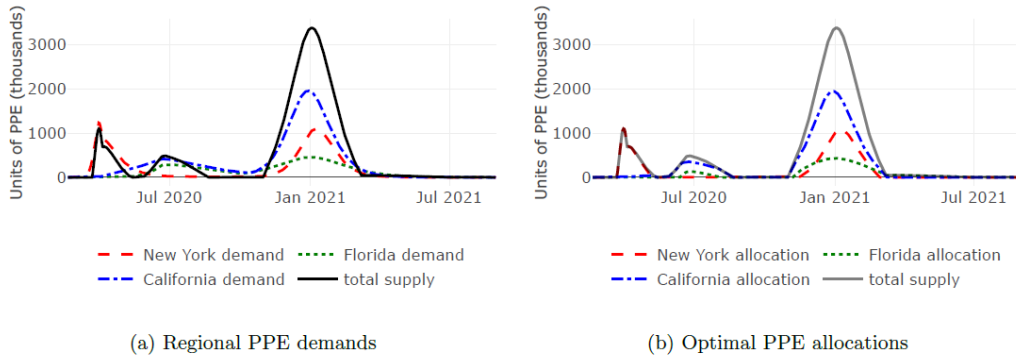
**Graphique 11 : Répartition optimale des ventilateurs dans l'État de New York, en Floride et en Californie**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.



**Graphique 12 : Répartition optimale de l'EPI dans l'État de New York, en Floride et en Californie**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

#### 4.1 Ressources durables : Ventilateurs

Dans l'ensemble de cette section, nous examinons la répartition des ressources existantes dans un système de soins de santé comptant  $n$  régions pendant une pandémie qui dure  $m$  jours. Nous utilisons toujours l'exposant  $(i)$  pour indiquer les quantités pour la  $i^e$  région. Rappelons qu'il pourrait y avoir une pénurie globale d'appareils de ventilation et d'EPI dans toutes les régions de l'alliance. L'autorité centrale devrait adopter une vision globale des intérêts concurrents dans les régions participantes. Chaque jour de la pandémie, lorsque la demande globale dépasse l'offre globale, l'autorité centrale devrait choisir d'affecter les ressources en tenant compte des différences spatiales de l'offre et de la demande. Cela motive le modèle d'optimisation pour l'affectation des ventilateurs :

$$\min_{\substack{K_j^{(i)} \geq 0; i=1,2,\dots,n; \\ j=1,2,\dots,m}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \omega_j^{(i)} \left( \frac{\theta_j^{+(i)}}{2} (X_j^{\text{VEN}(i)} - K_j^{(i)})_+^2 + \frac{\theta_j^{-(i)}}{2} (X_j^{\text{VEN}(i)} - K_j^{(i)})_-^2 \right)$$

tel que

$$\sum_{i=1}^n K_j^{(i)} = K_j \quad \text{pour } j = 1, 2, \dots, m$$

où  $\omega^{(i)}$  est un facteur de pondération pour le  $j^e$  jour de la pandémie dans la  $i$ -e région de l'alliance,  $\theta^{+(i)}$  est un coût économique par unité quadratique de pénurie, et  $\theta^{-(i)}$  est un coût d'option par unité quadratique d'offre excédentaire. Le terme quadratique  $\theta^{\pm(i)}/2 (X^{(i)} - K^{(i)})^2$  représente le coût économique attribuable au déséquilibre entre l'offre et la demande. Veuillez noter que  $\theta^{\pm(i)}/2$  mesure le taux d'augmentation du coût par unité; donc,  $\theta^{\pm(i)}/2 (X^{(i)} - K^{(i)})$  représente le coût variable linéaire par unité. Le coût variable reflète en principe la loi de la demande selon laquelle le prix augmente avec la quantité demandée. Par conséquent, le coût total est le produit du coût variable par unité  $\theta^{\pm(i)}/2 (X^{(i)} - K^{(i)})$  et de l'unité totale de déséquilibre  $X^{(i)} - K^{(i)}$ . Le coût économique est utilisé pour tenir compte à la fois des pertes potentielles de vie imputables au manque de ressources et du coût d'option des sources médicales inactives en raison de l'excédent de l'offre. La structure du coût économique est

utilisée non seulement pour sa résolubilité mathématique, mais aussi pour sanctionner les déséquilibres importants de l'offre et de la demande. Le facteur de pondération  $\omega^{(i)}$  peut servir à mesurer l'importance relative de l'affectation des ressources pour la région  $i$  au moment  $t_j$  à d'autres régions et points temporels. Il existe quelques exemples de son application selon divers critères de mise en commun ou de rationnement des ressources. Par exemple, dans un plan d'urgence national, où  $X^{(i)}$  est utilisé comme demande prévue de chaque région, pour des raisons politiques, une région métropolitaine comptant une forte population peut avoir plus de poids qu'un secteur rural ayant une petite population. Lorsque les hôpitaux doivent rationner des ressources limitées, ils peuvent mettre en œuvre la stratégie afin de maximiser les avantages des traitements. Dans une telle configuration,  $X^{(i)}$  représente la demande d'une cohorte particulière. Un décideur peut accorder plus de poids aux cohortes d'âge comptant plus d'années de vie restantes qu'à celles qui en comptent moins. Il s'agit également d'une stratégie courante qui vise à permettre aux travailleurs de la santé d'avoir accès en priorité aux ressources médicales. Dans les deux cas, l'ensemble des facteurs de pondération  $\omega^{(i)}$  reflète les priorités et les préférences de la direction au fil du temps. Certains choix précis quant aux facteurs de pondération  $\omega^{(i)}$  peuvent également refléter les caractéristiques démographiques. Si une région, par exemple  $i$ , compte une tranche de population comparativement plus importante de personnes âgées plus vulnérables à la pandémie, les modèles compartimentaux épidémiques, comme le modèle SEIRD susmentionné, projettent une demande  $X^{(i)}$  plus élevée. Dans ce cas, lorsque le facteur de pondération régional  $\omega^{(i)}$  est censé être monotone par rapport à la demande régionale projetée  $X^{(i)}$ , alors une priorité plus élevée sera accordée spontanément au terme quadratique du coût économique  $i$  de la région.

La contrainte  $K^{(i)} = K_j$  indique que les ressources affectées aux différentes régions doivent correspondre au total des ressources dont dispose l'autorité centrale. L'évolution de l'offre  $\{K_j, j = 1, 2, \dots, m\}$  repose sur la stratégie centralisée de réserve dont il a été question aux sections précédentes. L'évolution de la demande  $\{X_j, i = 1, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m\}$  peut être fondée sur les prévisions des modèles épidémiologiques ajustés aux données locales les plus récentes.

## 4.2 Ressources à usage unique : Équipement de protection individuelle (EPI)

L'affectation de ressources à usage unique est semblable à celle des ressources durables. La principale différence réside dans le montant de la réserve à libérer à chaque période. Pour des ressources durables, l'autorité centrale distribue les réserves accumulées  $K_j$  en tout temps  $j$ . Les ressources à usage unique ne pouvant être réutilisées, l'autorité centrale ne peut distribuer des montants supplémentaires que selon un calendrier de distribution. Compte tenu de cette différence, nous formulons l'affectation des ressources à usage unique par un problème d'optimisation.

$$\min_{\substack{k_j^{(i)} \geq 0; i=1,2,\dots,n; \\ j=1,2,\dots,m}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \omega_j^{(i)} \left( \frac{\theta_j^{+(i)}}{2} \left( X_j^{\text{PPE}(i)} - k_j^{(i)} \right)_+^2 + \frac{\theta_j^{-(i)}}{2} \left( X_j^{\text{PPE}(i)} - k_j^{(i)} \right)_-^2 \right)$$

Tel que  $\sum_{i=1}^n k_j^{(i)} = k_j$  pour  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Veillez noter que le montant de distribution  $k_j$  pourrait être déterminé avant une pandémie par une planification d'urgence ou pendant une pandémie par un calendrier de distribution ajusté. La section 3.2 « Ressources à usage unique : Équipement de protection individuelle » donne un exemple de la façon dont un tel calendrier de distribution peut être déterminé pour tenir compte de la concurrence temporelle pour les ressources à usage unique.

### 4.3 Algorithmes d'affectation globale

Les solutions d'analyse aux problèmes d'affectation des ressources durables et à usage unique peuvent être dérivées de la même façon parce qu'elles prennent essentiellement la même forme. Ci-après, comme l'affectation se fait d'une période à l'autre à l'intérieur de la solution, nous supprimerons l'indice  $j$  par souci de concision. Pour simplifier la notation dans la solution, nous utiliserons  $X^{(i)}$  sans l'indicateur du type de ressource pour la demande dans la région  $i$ , et nous utiliserons  $K^{(i)}$  pour la quantité de ressources attribuées dans la région  $i$ .

Nous discutons ici des solutions d'analyse aux problèmes d'optimisation présentés ci-dessus, à partir desquelles nous pouvons élaborer des perspectives économiques. Les preuves de ces solutions sont données à l'annexe A.2.

L'autorité centrale doit d'abord déterminer s'il existe un excédent ou une pénurie à l'échelle du système. La stratégie d'affectation diffère selon ces scénarios.

Il convient de souligner que, dans l'un ou l'autre des scénarios, le problème d'affectation des ressources en cas de pandémie est essentiellement un modèle d'optimum de Pareto en ce qui concerne les intérêts concurrents des membres d'un groupe. L'optimum de Pareto est un concept largement reconnu pour étudier l'efficacité économique en vue de l'affectation de ressources limitées. L'optimalité est atteinte lorsqu'il n'y a pas d'autre affectation qui peut accroître le bien-être de certains participants sans porter atteinte à celui des autres. La solution fondée sur une telle optimalité pourrait faire en sorte qu'une affectation soit sous-optimale pour certains membres; pourtant, l'affectation optimale de Pareto minimise l'objectif global du groupe. Chong, Feng et Jin (2021) ont étudié en profondeur le problème d'affectation qui touche des membres ayant des intérêts divergents, et nous allons nous inspirer de ces travaux pour faire des interprétations économiques des résultats des modèles d'affectation. De plus, en fait, on pourrait aussi percevoir ces problèmes d'optimisation dans le « Pilier II : Réserves et distribution centralisées » formulés comme l'auto-optimalité de Pareto dans le temps.

#### Excédent à l'échelle du système

S'il existe un excédent global dans le système de santé au moment  $j$  c.-à-d.  $K > \sum_{r=1}^n X^{(r)} = X$ , alors seulement le coût économique de l'offre excédentaire  $\theta^{-(i)}$  s'applique et l'affectation optimale des fournitures existantes à la  $i^{\text{e}}$  région est représentée par

$$K^{(i)} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \right) X^{(i)} + \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \left( K - \sum_{r \neq i} X^{(r)} \right), \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Remarquez que la formule d'affectation (3) a une interprétation économique explicite qui montre que l'offre optimale pour la région  $i$  découle d'un équilibre entre deux solutions optimales concurrentes :

- **Offre optimale égocentrique :  $X^{(i)}$**

Si la région  $i$  peut en demander autant qu'elle en a besoin, alors le montant en question montre l'offre idéale dans le seul intérêt de la région. Son examen fait fi de l'offre et de la demande de toutes les autres régions.

- **Offre optimale altruiste :  $K - \sum_{r=1; r \neq i}^n X^{(r)}$**

Si la région  $i$  place les intérêts de toutes les autres régions au-dessus des siens, alors les fournitures médicales sont attribuées aux autres régions et la région  $i$  se retrouve avec le reste.

L'autorité centrale a la responsabilité de servir de médiateur entre les régions en concurrence pour obtenir des ressources. La formule indique que l'optimalité pour la région  $i$ , compte tenu de l'ensemble du système, représente la moyenne pondérée de deux extrêmes, à savoir l'offre égocentrique et l'offre optimale altruiste. Il convient de souligner que la moyenne des deux

offres optimales est déterminée par la pondération harmonique  $\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}} / \sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}$  par opposition à la pondération arithmétique  $\frac{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}{\sum_{r=1}^n \omega^{(r)}\theta^{-(r)}}$ . Il est connu dans Chong, Feng et Jin (2021) que dans l'optimalité multi-objective de Pareto, la pondération harmonique est toujours utilisée pour équilibrer les intérêts concurrents des participants d'un groupe, tandis que la pondération arithmétique sert à équilibrer les objectifs concurrents d'un même participant.

Une autre interprétation de la formule (3) est fournie par la formule équivalente

$$K^{(i)} = X^{(i)} + B^{(i)} \left( K - \sum_{r=1}^n X^{(r)} \right), \quad B^{(i)} = \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}}. \quad (4)$$

Il découle de (4) que la ressource affectée est toujours présentée comme un ajustement de la demande réelle. En cas de surplus dans l'approvisionnement du système après que des fournitures optimales aient été distribuées à toutes les régions afin de répondre pleinement à leurs demandes, des ressources supplémentaires peuvent être mises à la disposition de la région  $i$  et chaque région en obtient une partie déterminée par pondération harmonique.

Remarquez que  $\sum_{i=1}^n K^{(i)} = K$  comme prévu puisque  $\sum_{i=1}^n B^{(i)} = 1$ .

### Pénurie à l'échelle du système

S'il y a une pénurie globale dans le système de santé au moment  $j$  (c.-à-d.  $K \leq \sum_{r=1}^n X^{(r)} = X$ ), il s'avère que la stratégie d'affectation optimale consiste à fournir les ressources là où elles sont le plus nécessaires. Nous pouvons résumer l'algorithme en trois étapes :

- **Étape 1 : Classement de la demande**

Le premier ordre consiste à trier les demandes régionales  $\{...X^{(i)}, i = 1, \dots, n\}$  en ordre décroissant. Nous utilisons l'indice  $[i]$  pour indiquer la  $i^{\text{e}}$  statistique d'ordre la plus importante; c.-à-d.  $X^{[1]} \geq \dots \geq X^{[n]} \geq 0$ . Le classement des demandes régionales détermine l'ordre dans lequel les régions sont prises en compte pour l'affectation des ressources à l'étape suivante.

- **Étape 2 : Test de frugalité**

L'algorithme teste d'abord les cas qui exécutent les règles d'affectation de la même façon que (4). Pour toute valeur fixe  $I = 1 \dots n$ , considérez la règle d'affectation globale qui prévoit  $I$  régions où la demande est la plus élevée par

$$\tilde{K}^{[i]} = X^{[i]} + \tilde{B}^{[i]} \left( K - \sum_{r=1}^I X^{[r]} \right), \quad \tilde{B}^{[i]} = \frac{1}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{[r]} \theta + [r]}}. \quad (5)$$

Pour trouver le nombre optimal  $I$  de régions à soutenir, l'algorithme assure que la règle d'affectation doit être frugale pour respecter les critères suivants :

1. L'offre totale  $K$  est presque suffisante pour répondre à la demande dans toutes les régions  $I$ ;

$$K \leq \sum_{r=1}^I X^{[r]}.$$

2. Lorsque la règle d'affectation (5) est appliquée avec force à toutes les régions, les régions  $I$  ayant les demandes les plus élevées devraient recevoir une affectation non négative et le reste du groupe une affectation négative.

$$\tilde{K}^{[1]}, \dots, \tilde{K}^{[I]} \geq 0 > \tilde{K}^{[I+1]}, \dots, \tilde{K}^{[n]}.$$

Une valeur unique de  $I$  passe le test de frugalité. Puisque la stratégie a pour objectif de couvrir le plus grand nombre possible de régions où la demande est la plus élevée, l'algorithme de recherche s'arrête lorsque la demande totale de  $I$  régions dépasse l'offre disponible. L'algorithme atteindrait une règle qui peut être gratifiante pour ces régions  $I$ , mais qui décourage les affectations aux autres régions.

- **Étape 3 : Affectation globale**

Une fois que l'algorithme détermine la valeur de  $I$ , toutes les ressources existantes sont partagées entre les états  $I$  selon le principe d'affectation globale. En d'autres termes, la répartition des ressources dans la  $i^{\text{e}}$  région est représentée par

$$K^{[i]} = \tilde{K}^{[i]}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, I;$$

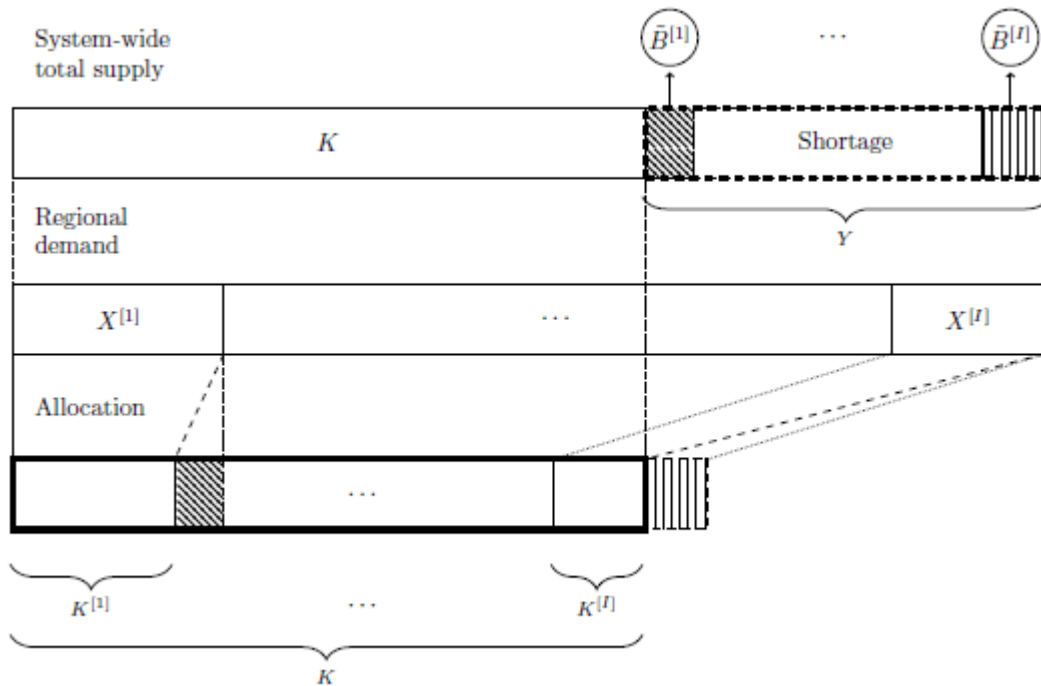
$$K^{[I+1]} = \dots = K^{[n]} = 0.$$

L'idée générale de l'affectation globale est illustrée au graphique 13. La première ligne du graphique montre qu'en cas de pénurie à l'échelle du système, la demande totale

dans toutes les  $I$  régions  $\sum_{i=1}^I X^{[i]}$  peut être considérée comme la composition de l'offre totale  $K$  et de la pénurie  $Y := \sum_{i=1}^I X^{[i]} - K$ . Par conséquent, dans le processus de répartition régionale,  $I$ ) les régions doivent non seulement partager les ressources disponibles, mais aussi assumer conjointement le fardeau de la pénurie, qui est proportionnel à leur pondération harmonique respective  $B_j^{[i]}$  pour  $i) = 1, 2, \dots, I$ . Ainsi, chaque région reçoit sa demande moins sa portion « équitable » de la pénurie à l'échelle du système; c.-à-d.  $X^{[i]} - B_j^{[i]} Y$ . Par exemple, le montant des ressources affectées à la région  $i$ ,  $K_j^{[i]}$  et la pénurie à partager prend la forme  $B_j^{[i]} Y$ , représentée par la zone pointillée au graphique 13. Ces deux parties correspondent à la demande totale dans cette région, soit  $X^{[i]}$ . On pourrait soutenir qu'une limite de cette solution est qu'aucune ressource n'est affectée aux régions  $I+1$  à  $n$  et qu'elle serait déraisonnable pour des raisons éthiques. On peut régler un tel problème en fixant un montant minimal d'affectation dans chaque région. Cette solution peut être facilement intégrée en ajoutant au modèle d'optimisation des contraintes supplémentaires  $K_j^{(i)} \geq M_j^{(i)}$  pour  $i = 1, 2, \dots, n$ , et  $j = 1, 2, \dots, m$ , où  $M_j^{(i)}$  est une offre minimale exigée par les décideurs.

Les solutions à la disposition de l'alliance des trois États pour la mise en commun des ventilateurs et des ensembles d'EPI sont présentées aux graphiques 11b et 12b. Le graphique 11b illustre le cas des stratégies d'affectation optimale pour les ventilateurs, ce qui confirme l'intuition dans la section « Étude de cas ». En avril 2020, l'autorité centrale aurait pu réaffecter de façon optimale à l'État de New York tous les ventilateurs disponibles dans l'alliance et ce, parce que l'État de New York est celui qui a la plus forte demande parmi les trois. En mai et juin 2020, les ventilateurs de l'État de New York auraient pu être réaffectés progressivement à la Floride et à la Californie; en juillet et août 2020, avec les ressources réaffectées de l'État de New York, la Floride et la Californie n'auraient pas dû subir de pénurie de ventilateurs. En janvier 2021, lorsqu'il y a eu une nouvelle poussée rapide de la demande, les réserves de ventilateurs sont passées des États relativement moins touchés (c.-à-d. New York et la Floride) à la Californie, où l'augmentation de la demande était extraordinaire.

**Graphique 13 : Affectation globale des ressources en cas de pénurie systémique**



\*Ce graphique est seulement disponible en anglais.

Le graphique 12b illustre les stratégies d'affectation optimale pour les ensembles d'EPI dans l'étude de cas. En avril 2020, l'autorité centrale aurait pu distribuer des ensembles d'EPI mis en réserve et tous les envoyer à l'État de New York pour son intervention d'urgence. À mesure que la pandémie s'estompait pour l'État de New York et reprenait de la vigueur en Californie et en Floride en juin 2020, les ressources auraient été réparties de façon plus égale. En août 2020, une fois la pénurie contenue dans les trois États et la demande relativement faible, les ensembles d'EPI disponibles devraient être conservés en prévision de la hausse simultanée de la demande, qui atteindra son apogée en janvier 2021.

## 5. Ajustements en temps réel

Comme nous l'avons mentionné précédemment, même si le présent document propose le cadre à trois piliers, ceux-ci devraient suivre un cycle. La COVID-19 nous a appris que la progression d'une pandémie est difficile à prédire. Au début de l'épidémie, lorsque l'on disposait de peu de données cliniques, le pilier I pour la prévision de la demande de ressources reposait sur les « meilleures estimations » pour les modèles épidémiologiques disponibles à l'époque. Il est possible que l'action prévue, avant une pandémie, dans les piliers II et III ait pu être sous-optimale pendant la pandémie. La présente section traite brièvement des ajustements nécessaires en temps réel dans le cadre à trois piliers.

Supposons qu'à un moment donné pendant la pandémie, par exemple  $l$ , pour  $0 < l < m$ , la pandémie n'a pas évolué comme prévu selon les modèles épidémiologiques, où  $m$  pourrait être une date de fin estimée de la pandémie. Pour le pilier I, les paramètres cliniques du modèle compartimental, comme le taux de transmission, peuvent être recalibrés en utilisant les données recueillies du temps 0 au temps  $l$ . De plus, le paramètre d'utilisation des ressources par chaque compartiment doit aussi être réévalué. Ensemble, ces deux mises à jour fournissent une prévision à jour de la demande de ressources.

Pendant la pandémie, il pourrait être nécessaire de rajuster les stratégies de distribution pour les ressources à usage unique, comme il est décrit à la section 3.2. Si la stratégie de distribution précédente était fondée sur une estimation trop libérale de la demande, une surabondance de ressources à usage unique pourrait causer du gaspillage dans les régions. Si elle était fondée sur une estimation prudente, une pénurie pourrait survenir. Il est donc essentiel que les décideurs recalibrent les projections de la demande et les intègrent au modèle pour une stratégie de distribution optimale.

Supposons que la nouvelle projection de demande est représentée par  $\{\tilde{X}_{l+1}^{\text{PPE}}, \dots, \tilde{X}_m^{\text{PPE}}\}$  selon les informations mises à jour. Le taux de production peut aussi avoir été mis à jour à  $\tilde{a}$  par jour. On sait que la réserve actuelle est  $K_l$ . Ensuite, nous repensons le calendrier de distribution optimal

$$\min_{k_{l+1}, \dots, k_m} \sum_{j=l+1}^m \omega_j \left( \frac{\theta_j^+}{2} \left( \tilde{X}_j^{\text{PPE}} - k_j \right)_+^2 + \frac{\theta_j^-}{2} \left( \tilde{X}_j^{\text{PPE}} - k_j \right)_-^2 + c_j K_j \right)$$

Tel que  $K_j = K_{j-1} + \tilde{a} - k_j + \left( k_j - \tilde{X}_j^{\text{PPE}} \right)_+ \geq 0$  et  $k_j \geq 0$ , pour  $j = l+1, l+2, \dots, m$ .

Il convient de noter que ce problème d'optimisation est l'analogique de (2) avec des projections actualisées de la demande.

Pour le pilier III, selon la nouvelle prévision de la demande de ressources et le nouveau plan stratégique de distribution des ressources à usage unique, les stratégies d'affectation sont mises à jour en résolvant le problème d'optimisation à chaque fois, de  $l$  à  $m$ , comme il a été formulé auparavant. En pratique, cela implique la *confiscation* de toutes les ressources détenues par toutes les régions de l'alliance pour une réaffectation complète.



Enfin, le cycle des ajustements pourra se répéter périodiquement tout au long de la pandémie. La philosophie fondamentale est que même si nous ne pouvons pas changer ce qui est arrivé dans le passé, nous pouvons prendre des décisions optimales compte tenu des prévisions actuelles de l'avenir.

## 6. Conclusions et limites

La pandémie de COVID-19 a imposé des exigences et des contraintes extraordinaires aux systèmes de santé publics, exposant de nombreux problèmes, comme le manque de planification et de coordination adéquates. Le présent article examine ce qui aurait pu être mieux fait pour réduire le déséquilibre de l'offre et de la demande de ressources médicales. S'inspirant de la théorie classique de l'agrégation des risques et de l'affectation du capital, le présent document propose un cadre de planification et d'affectation des ressources à trois piliers : prévision de la demande, établissement de réserves et distribution centralisées, et répartition des ressources centralisées. Le présent document développe un nouvel équilibre spatio-temporel des ressources qui pourra éventuellement être utilisé par les décideurs publics comme base quantitative pour prendre des décisions éclairées sur la planification, le financement et le rationnement des ressources essentielles. Bien que ce document présente l'étude de cas numérique fondée sur une alliance hypothétique entre trois États (Californie, Floride et New York), pour illustrer l'efficacité de ces stratégies, celles-ci s'appliquent également à la collaboration entre d'autres régions du monde.

Il convient de souligner que le document met l'accent sur les perspectives de gestion qui peuvent être tirées du cadre d'optimisation et de ses solutions analytiques. Si un cadre est adopté en pratique, deux points devraient être améliorés. Tout d'abord, les erreurs d'estimation des intrants du modèle devraient être autorisées, tout en donnant lieu à une fourchette de confiance robuste en matière de planification et d'affectation d'urgence. Deuxièmement, un modèle compartimental stochastique peut être envisagé, tandis que les modèles d'optimisation peuvent être étendus à d'autres mesures du risque comme l'attente ou la valeur à risque, et peuvent même comprendre des contraintes de mesure des écarts.

En outre, il existe de toute évidence un certain nombre de limites dans l'exemple hypothétique d'un accord de mise en commun des ressources à trois États. Les trois États sont choisis pour les effets les plus radicaux de la planification et de l'affectation des ressources existantes à des fins d'illustration. Il est hors de la portée du présent document de considérer la réalité politique qui pourrait empêcher de tels arrangements. En théorie, la méthodologie peut être appliquée à la coalition volontaire réelle formée par six États du nord-est des États-Unis, bien que la coalition ait été établie en grande partie pour éviter la concurrence des prix dans les marchés publics. Une autre limite de cet exemple est l'approche égalitaire à l'égard des pénuries dans différentes régions, qui ne tient pas compte des questions éthiques pouvant découler du libre mouvement des ressources d'une région à l'autre. Bien qu'il puisse être économiquement optimal de fournir toutes les ressources du système à l'endroit où elles sont le plus nécessaires, il peut être politiquement difficile de laisser sans soutien d'autres endroits où les pénuries sont moins graves. Une solution potentielle consisterait à introduire des contraintes supplémentaires dans les problèmes d'optimisation qui nécessitent un soutien minimal pour chaque région.

## **7. Remerciements**

Cette recherche est appuyée par l'Institut canadien des actuaires (ICA). Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude aux membres du groupe chargé de la surveillance du projet de l'ICA, Victor Wang, Adam Granville, Alex Ngo, Cindy Li et Shlomit Jacobson, qui ont formulé des commentaires et des suggestions éclairés qui ont permis d'améliorer le manuscrit. Nous tenons également à remercier Qingxuan Kong, Charan Sankaran, Annie Zheng, Xuan Lin, Erchi Wang et d'autres étudiants de l'Illinois Risk Lab de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign pour leur précieux travail de soutien.

## Bibliographie

Acemoglu, Daron, Victor Chernozhukov, Iván Werning et Michael D. Whinston. *Optimal Targeted Lockdowns in a Multi-Group SIR Model*, document de travail, 27102, National Bureau of Economic Research, mai 2020.

Arentz, Matt, Eric Yim, Lindy Klaff, Sharukh Lokhandwala, Francis X. Riedo, Maria Chong et Melissa Lee. « Characteristics and Outcomes of 21 Critically Ill Patients With COVID-19 in Washington State », dans *JAMA*, vol. 323, n° 16, avril 2020, pp. 1612-1614.

Associated Press. « Cuomo Signs Order to Redistribute Ventilators as New York Coronavirus Cases Top 100,000 », dans *Boston Globe*, avril 2020, en ligne : [www.bostonglobe.com/2020/04/03/nation/cuomo-signs-order-seize-ventilators-hospitals-redistribute-them-hard-hit-areas/](http://www.bostonglobe.com/2020/04/03/nation/cuomo-signs-order-seize-ventilators-hospitals-redistribute-them-hard-hit-areas/).

Bhatraju, Pavan K., Bijan J. Ghassemieh, Michelle Nichols, Richard Kim, Keith R. Jerome, Arun K. Nalla, Alexander L. Greninger, Sudhakar Pipavath, Mark M. Wurfel, Laura Evans, Patricia A. Kritek, T. Eoin West, Andrew Luks, Anthony Gerbino, Chris R. Dale, Jason D. Goldman, Shane O'Mahony et Carmen Mikacenic. « Covid-19 in Critically Ill Patients in the Seattle Region: Case Series », dans *New England Journal of Medicine*, n° 382, mars 2020, pp. 2012 à 2022.

Charpentier, Arthur, Romuald Elie, Mathieu Laurière et Viet Chi Tran. « COVID-19 Pandemic Control: Balancing Detection Policy and Lockdown Intervention under ICU Sustainability », dans *Math. Model. Nat. Phenom.*, n° 2, 2020, pp. 57-99.

Chong, Wing Fung, Runhuan Feng et Longhao Jin. « Holistic Principle for Risk Aggregation and Capital Allocation », février 2021, dans *Annals of Operations Research, CovidActNow*, mars 2020. En ligne : <https://covidactnow.org/>.

Jan Dhaene, Andreas Tsanakas, Emiliano A Valdez et Steven Vanduffel. « Optimal Capital Allocation Principles », dans *Journal of Risk and Insurance*, vol. 79, mars 2020, n° 1, pp. 1-28.

Ellison, Ayla. « 20 States to Face ICU Bed Shortages when COVID-19 Peaks, Analysis Finds », dans *Becker's Hospital Review*, avril 2020, en ligne : [www.beckershospitalreview.com/patient-flow/20-states-to-face-icu-bed-shortages-when-covid-19-peaks-analysis-finds.html](http://www.beckershospitalreview.com/patient-flow/20-states-to-face-icu-bed-shortages-when-covid-19-peaks-analysis-finds.html).

Estes, Clary. « States Are Being Forced Into Bidding Wars To Get Medical Equipment To Combat Coronavirus », dans *Forbes*, 2020, en ligne : [www.forbes.com/sites/claryestes/2020/03/28/states-have-are-being-forced-into-bidding-wars-to-get-medical-equipment-to-combat-coronavirus](http://www.forbes.com/sites/claryestes/2020/03/28/states-have-are-being-forced-into-bidding-wars-to-get-medical-equipment-to-combat-coronavirus).

Centre européen de prévention et de contrôle des maladies. « Personal Protective Equipment (PPE) Needs in Healthcare Settings for the Care of Patients with Suspected or Confirmed Novel Coronavirus (2019-nCoV) », 2020, en ligne : [www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/novel-coronavirus-personal-protective-equipment-needs-healthcare-settings.pdf](http://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/novel-coronavirus-personal-protective-equipment-needs-healthcare-settings.pdf).

Facher, Lev. « The Coronavirus Outbreak has Left Medical Supplies in Short Supply. Is the Nation's Emergency Stockpile Ready to Help? », *STAT*, mars 2020, en ligne : [www.statnews.com/2020/03/10/coronavirus-strategic-national-stockpile/](http://www.statnews.com/2020/03/10/coronavirus-strategic-national-stockpile/).

Feng, Runhuan et Jose Garrido. « Actuarial Applications of Epidemiological Models », dans *North American Actuarial Journal*, vol. 15, n° 1, 2011, pp. 112-136.

Fernández-Villaverde, Jesús et Charles I. Jones. *Estimating and Simulating a SIRD Model of COVID-19 for Many Countries, States, and Cities*, document de travail 27128, National Bureau of Economic Research, mai 2020.

Fu, Anqi, Balasubramanian Narasimhan et Stephen Boyd. « CVXR: An R Package for Disciplined Convex Optimization », dans *Journal of Statistical Software*, vol. 94, n° 14, 2020.

Giordano, Giulia, Franco Blanchini, Raffaele Bruno, Patrizio Colaneri, Alessandro Di Filippo, Angela Di Matteo et Marta Colaneri. « Modelling the COVID-19 Epidemic and Implementation of Population-wide Interventions in Italy », dans *Nature Medicine* vol. 26, n° 6, 1<sup>er</sup> juin 2020, pp. 855-860.

Grant, Michael, Stephen Boyd et Yinyu Ye. « Disciplined Convex Programming », dans *Global Optimization: From Theory to Implementation*. s.l.d. Leo Liberti et Nelson Maculan. Springer. Chap. 7, 2006, pp. 155-210.

Grasselli, Giacomo, Alberto Zangrillo, Alberto Zanella, Massimo Antonelli, Luca Cabrini, Antonio Castelli, Danilo Cereda, Antonio Coluccello, Giuseppe Foti, Roberto Fumagalli, Giorgio Iotti, Nicola Latronico, Luca Lorini, Stefano Merler, Giuseppe Natalini, Alessandra Piatti, Marco Vito Ranieri, Anna Mara Scandroglio, Enrico Storti, Maurizio Cecconi et Antonio Pesenti. « Baseline Characteristics and Outcomes of 1591 Patients Infected With SARS-CoV-2 Admitted to ICUs of the Lombardy Region, Italy », dans *JAMA*, vol. 323, n° 16, avril 2020, pp. 1574-1581.

Greer, Amy L. et Dena Schanzer. « Using a Dynamic Model to Consider Optimal Antiviral Stockpile Size in the Face of Pandemic Influenza Uncertainty », dans *PLoS ONE* 8,6. s.l.d. Man-Seong Park, e67253, juin 2013.

Gregory, Victoria, Guido Menzio et David G. Wiczer. *RPandemic Recession: L or V-Shaped?*, document de travail, 27105, National Bureau of Economic Research, mai 2020.

Hill, Alison, Mike Levy, Sherrie Xie, Justin Sheen, Julianna Shinnick, Andrei Gheorghe et Chris Rehmann. *Modeling COVID-19 Spread vs Healthcare Capacity*, mars 2020, en ligne : <https://alhill.shinyapps.io/COVID19seir/>.

Hillairet, Caroline et Olivier Lopez. « Propagation of Cyber Incidents in an Insurance Portfolio: Counting Processes Combined with Compartmental Epidemiological Models », dans *Scandinavian Actuarial Journal*, DOI: 10.1080/03461238.2021.1872694, 2021.

Holdren, John P., Christine Cassel, Chris Chyba, Susan Graham, Eric Lander, Ed Penhoet, William Press, Maxine Savitz et Harold Varmus. « Recommendations for the National Strategic Pandemic Stockpile », Belfer Centre, 2020, en ligne : [www.belfercenter.org/publication/recommendations-national-strategic-pandemic-stockpile](http://www.belfercenter.org/publication/recommendations-national-strategic-pandemic-stockpile).

Holveck, Brandon, Dustin Racioppi et Alexis Shanes. « Delaware Partners with Northeast States to Buy PPE, Medical Supplies », *Delaware Online*, 2020, en ligne : [www.delawareonline.com/story/news/coronavirus-in-delaware/2020/05/03/nj-ny-de-pa-ct-northeast-states-form-regional-supply-chain-ppe/3074768001/](http://www.delawareonline.com/story/news/coronavirus-in-delaware/2020/05/03/nj-ny-de-pa-ct-northeast-states-form-regional-supply-chain-ppe/3074768001/).

Hortaçsu, Ali, Jiaru Liu et Timothy Schweg. « Estimating the Fraction of Unreported Infections in Epidemics with a Known Epicenter: An application to COVID-19 », dans *Journal of Econometrics* vol. 220, n° 1, Janvier 2020, pp. 106-129.

Hua, Chen et Samuel H. Cox. « An Option-Based Operational Risk Management Model for Pandemics », dans *North American Actuarial Journal*, vol. 13, n° 1, 2009, pp. 54-76.

Fonds monétaire international. Perspectives de l'économie mondiale. « *Les mesures de soutien et les vaccins devraient rehausser l'activité* », 1<sup>er</sup> janvier 2021, en ligne : [www.imf.org/fr/Publications/WEO/Issues/2021/01/26/2021-world-economic-outlook-update](http://www.imf.org/fr/Publications/WEO/Issues/2021/01/26/2021-world-economic-outlook-update).

Jamison, Dean T., Hellen Gelband, Susan Horton, Prabhat Jha, Ramanan Laxminarayan, Charles N. Mock et Rachel Nugent. *Disease Control Priorities, Third Edition (Volume 9): Improving Health and Reducing Poverty*, Washington (DC), Banque mondiale, novembre 2017.

Jones, Kate E., Nikkita G. Patel, Marc A. Levy, Adam Storeygard, Deborah Balk, John L. Gittleman et Peter Daszak. « Global Trends in Emerging Infectious Diseases », dans *Nature*, vol. 451, n° 7181, février 2008, pp. 990-993.

Lefèvre, Claude et Philippe Picard. « Final Outcomes and Disease Insurance for a Controlled Epidemic Model », dans *Appl. Stoch. Models Bus. Ind.*, vol. 34, n° 6, 2018, pp. 803-815.

Lefèvre, Claude, Philippe Picard et Matthieu Simon. « Assurance contre les risques épidémiques », dans *J. Appl. Probab.*, vol. 54, n° 1, 2017, pp. 286-303.

Lefèvre, Claude et Matthieu Simon. « SIR-type Epidemic Models as Block-structured Markov Processes », dans *Methodol. Comput. Appl. Probab.*, vol 22, n° 2, 2020, pp. 433-453.

Leung, Kathy, Joseph T. Wu, Di Liu et Gabriel M. Leung. « First-wave COVID-19 Transmissibility and Severity in China Outside Hubei after Control Measures, and Second-wave Scenario Planning: A Modelling Impact assessment », dans *The Lancet*, vol. 395, n° 10233, avril 2020, pp. 1382-1393.

Morse, Stephen S. Mars. « Factors in the Emergence of Infectious Diseases », dans *Emerging Infectious Diseases*, vol. 1, n° 1, 1995, pp. 7-15.

Patel, Nisarg A. « America Needs More Ventilators. Here's How We Can Get Them », *Ardoise*, mars 2020, en ligne : <https://slate.com/technology/2020/03/how-america-could-get-the-ventilators-it-needs.html>.

Porpora, Tracey. « What Is a Ventilator? How Much Does One Cost? », *Silive*, mars 2020, en ligne : [www.silive.com/coronavirus/2020/03/what-is-a-ventilator-how-much-does-one-cost.html](http://www.silive.com/coronavirus/2020/03/what-is-a-ventilator-how-much-does-one-cost.html).

Preidt, Robert. « Most COVID-19 Patients Placed on Ventilators Died, New York Study Shows », *US News*, avril 2020, en ligne : [www.usnews.com/news/health-news/articles/2020-04-22/most-covid-19-patients-placed-on-ventilators-died-new-york-study-shows](http://www.usnews.com/news/health-news/articles/2020-04-22/most-covid-19-patients-placed-on-ventilators-died-new-york-study-shows).

Ranney, Megan L., Valerie Griffeth et Ashish K. Jha. « Critical Supply Shortages: The Need for Ventilators and Personal Protective Equipment during the Covid-19 Pandemic », dans *New England Journal of Medicine*, vol. 382, avril 2020, n° 18, p. e41.

Rosenbaum, Lisa. « Facing Covid-19 in Italy: Ethics, Logistics, and Therapeutics on the Epidemic's Front Line », dans *New England Journal of Medicine*, vol. 382, n° 20, mai 2020, pp. 1873-1875.

Rowland, Christopher. « More Lifesaving Ventilators Are Available. Hospitals Can't Afford Them », *Washington Post*, mars 2020, en ligne : [www.washingtonpost.com/health/2020/03/18/ventilator-shortage-hospital-icu-coronavirus/](http://www.washingtonpost.com/health/2020/03/18/ventilator-shortage-hospital-icu-coronavirus/).

Segal, Sim. *Corporate Value of Enterprise Risk Management*, Hoboken (New Jersey), John Wiley & Sons, 5 avril 2011.

Siddiqui, M. Ruby et W. John Edmunds. « Cost-effectiveness of Antiviral Stockpiling and Near-Patient Testing for Potential Influenza Pandemic », dans *Emerging Infectious Diseases*, vol. 14, n° 2, février 2008, pp. 267- 274.

Stauffer, Jon M. et Subodha Kumar. « Impact of Incorporating Returns into Pre-Disaster Deployments for Rapid-Onset Predictable Disasters », dans *Production and Operations Management*, vol. 30, n° 2, 2021, pp. 451- 474.

*The Atlantic*. « The COVID Tracking Project », mai 2020, en ligne : <https://covidtracking.com/api>.

Tian, Huaiyu, Yonghong Liu, Yidan Li, Chieh-Hsi Wu, Bin Chen, Moritz U. G. Kraemer, Bingying Li, Jun Cai, Bo Xu, Qiqi Yang, Ben Wang, Peng Yang, Yujun Cui, Yimeng Song, Pai Zheng, Quanyi Wang, Ottar N. Bjornstad, Ruifu Yang, Bryan T. Grenfell, Oliver G. Pybus et Christopher Dye. « An Investigation of Transmission Control Measures during the First 50 Days of the COVID-19 Epidemic in China », dans *Sciences*, vol. 368, n° 6491, mars 2020, pp. 638-642.

Tobin-Tyler, Elizabeth. « In Allocating Scarce Health Care Resources During COVID-19, Don't Forget Health Justice », *Health Affairs Blog*, DOI : 10.1377/hblog20200422.50144, 2020.

US Centers for Disease Control and Prevention. « Principles of Epidemiology in Public Health Practice. », 2021, en ligne : [www.cdc.gov/csels/dsepd/ss1978/lesson1/section11.html](http://www.cdc.gov/csels/dsepd/ss1978/lesson1/section11.html)

US Centers for Disease Control and Prevention. « Tularemia », 2018, en ligne : [www.cdc.gov/tularemia/index.html](http://www.cdc.gov/tularemia/index.html)

Vanajakumari, Manoj, Subodha Kumar et Sushil Gupta. « An Integrated Logistic Model for Predictable Disasters », dans *Production and Operations Management*, vol. 25, n° 5, février 2016, pp. 791-811.

Organisation mondiale de la Santé. « Fièvre de la vallée du Rift », 2018, en ligne : [www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rift-valley-fever](http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rift-valley-fever)

World Health Organization (2019). « Encéphalite japonaise », 2019, en ligne : [www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/japanese-encephalitis](http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/japanese-encephalitis)

Worldometer. « Coronavirus Cases », 2021, en ligne : [www.worldometers.info/coronavirus/](http://www.worldometers.info/coronavirus/).

Wu, Zunyou et Jennifer M. McGoogan. « Characteristics of and Important Lessons From the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in China », dans *JAMA*, vol. 323, n° 13, avril 2020, p. 1239.

Yang, Penghui, Yibo Ding, Zhe Xu, Rui Pu, Ping Li, Jin Yan, Jiluo Liu, Fanping Meng, Lei Huang, Lei Shi, Tianjun Jiang, Enqiang Qin, Min Zhao, Dawei Zhang, Peng Zhao, Lingxiang Yu,

Zhaohai Wang, Zhixian Hong, Zhaohui Xiao, Qing Xi, Dexi Zhao, Peng Yu, Caizhong Zhu, Zhu Chen, Shaogeng Zhang, Junsheng Ji, Guangwen Cao et Fusheng Wang. « Caractéristiques épidémiologiques et cliniques de la COVID-19 Patients with and without Pneumonia in Beijing, China », Dans *medRxiv*, DOI : <https://doi.org/10.1101/2020.02.28.20028068>, 2020.

Yang, Xiaobo, Yuan Yu, Jiqian Xu, Huaqing Shu, Jia'an Xia, Hong Liu, Yongran Wu, Lu Zhang, Zhui Yu, Minghao Fang, Ting Yu, Yaxin Wang, Shangwen Pan, Xiaojing Zou, Shiyong Yuan et You Shang. « Clinical Course and Outcomes of Critically Ill Patients with SARS-CoV-2 Pneumonia in Wuhan, China: A Single-centered, Retrospective, Observational study », dans *The Lancet Respiratory Medicine*, vol. 8, n° 5, mai 2020, pp. 475-481.



## Annexe A : Solutions analytiques et démonstrations

### A.1 Réserves de ressources durables

Le problème d'optimisation des réserves de ressources durables est le suivant :

$$\min_{K_0 \geq 0} \sum_{j=1}^m \omega_j \left( \frac{\theta_j^+}{2} (X_j - (K_0 + aj))_+^2 + \frac{\theta_j^-}{2} (X_j - (K_0 + aj))_-^2 + c_j (K_0 + aj) \right) + c_0 K_0.$$

**Théorème A.1.** Soit  $Y_j = X_j - aj, \forall j = 1, 2, \dots, m$ . Soit  $S = \sum_{j=1}^m \omega_j c_j + c_0$ .  $Y_{[1]} \leq Y_{[2]} \leq \dots \leq Y_{[m]}$  la séquence de plus en plus ordonnée de  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ . Soit  $J = 1, 2, \dots, m$  de sorte que

$$\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- (Y_{[j]} - Y_{[J]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ (Y_{[j]} - Y_{[J]}) \leq S \leq \sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- (Y_{[j]} - Y_{[J-1]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ (Y_{[j]} - Y_{[J-1]}),$$

où nous définissons que lorsque  $J = 1$ ,

$$\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- (Y_{[j]} - Y_{[J]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ (Y_{[j]} - Y_{[J]}) = \sum_{j=1}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ (Y_{[j]} - Y_{[1]}),$$

$$\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- (Y_{[j]} - Y_{[J-1]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ (Y_{[j]} - Y_{[J-1]}) = \infty.$$

Soit

$$K'_0 = \frac{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{(j)} \theta_{(j)}^- Y_{(j)} + \sum_{j=J}^m \omega_{(j)} \theta_{(j)}^+ Y_{(j)} - S}{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{(j)} \theta_{(j)}^- + \sum_{j=J}^m \omega_{(j)} \theta_{(j)}^+}.$$

Si  $K_0 \ll 0$ , alors la réserve initiale optimale, qui minimise la fonction objective ci-dessus,  $K_0^* = 0$ , et si  $K_0 \geq 0$ , alors  $K_0^* = K_0$ .

*Démonstration.* Soit  $Y_j = X_j - aj, \forall j = 1, 2, \dots, m$ . Soit  $Y_{[1]} \leq Y_{[2]} \leq \dots \leq Y_{[m]}$  la séquence de plus en plus ordonnée de  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ . Dans ce cas,  $Y_j$  représente la pénurie quotidienne lorsque la réserve initiale est complètement absente. La fonction objective devient alors

$$F(K_0) := \sum_{j=1}^m \omega_{[j]} \left( \frac{\theta_{[j]}^+}{2} (Y_{[j]} - K_0)_+^2 + \frac{\theta_{[j]}^-}{2} (K_0 - Y_{[j]})_+^2 \right) + \left( \sum_{j=1}^m \omega_j c_j + c_0 \right) K_0 + \sum_{j=1}^m \omega_j c_j a_j.$$

Il convient de noter que  $F(K_0)$  est une fonction convexe dans  $K_0$  pour  $K_0 \in \mathbb{R}$ . Soit

$$G(K_0) = \sum_{j=1}^m \omega_{[j]} \left( \frac{\theta_{[j]}^+}{2} (Y_{[j]} - K_0)_+^2 + \frac{\theta_{[j]}^-}{2} (K_0 - Y_{[j]})_+^2 \right),$$

$$S = \sum_{j=1}^m \omega_j c_j + c_0,$$

où  $G(\cdot)$  est convexe dans  $K_0$ .

Les dérivés de premier ordre de  $G$  à  $Y_{[1]}$  and  $Y_{[m]}$  sont les suivantes :

$$G'(Y_{[1]}) = \sum_{j=1}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^-(Y_{[1]} - Y_{[j]}) \leq 0.$$

$$G'(Y_{[m]}) = \sum_{j=1}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[j]} - Y_{[m]})(-1) = \sum_{j=1}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[m]} - Y_{[j]}) \geq 0.$$

Puis  $\exists \tilde{K}_0 \in [Y_{[1]}, Y_{[m]}]$  de sorte que  $G'(\tilde{K}_0) = 0$ . Puisque  $S = \sum_{j=1}^m \omega_j c_j + c_0 \geq 0$ ,  $\exists K'_0 \in (-\infty, Y_{[m]})$  de sorte que  $F'(K'_0) = 0$ , c.-à-d.  $\exists J = 1, \dots, m$  de sorte que  $K'_0 \in [Y_{[J-1]}, Y_{[J]}]$ , où nous définissons  $Y_{(0)} = -\infty$ , et  $F'(K'_0) = 0$ .

Ici, nous assouplissons la contrainte selon laquelle la réserve initiale doit être non négative, mais nous la rajouterons à la fin. La principale observation, c'est que compte tenu de tous les  $(Y_{[j]})_{j \in \{0, \dots, m\}}$ , nous pouvons toujours trouver  $K_0$  entre deux valeurs adjacentes  $Y_{[j]}$ 's,  $Y_{[J-1]}$  et  $Y_{[J]}$ , qui minimisent la fonction objective. C'est-à-dire que

$$F'(K'_0) = \sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^-(K'_0 - Y_{[j]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[j]} - K'_0)(-1) + S = 0.$$

Alors

$$K'_0 = \frac{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- Y_{[j]} + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ Y_{[j]} - S}{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+}.$$

Par conséquent, la condition selon laquelle  $K'_0 \in [Y_{[J-1]}, Y_{[J]}]$  est représentée par

$$Y_{[J-1]} \leq \frac{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- Y_{[j]} + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+ Y_{[j]} - S}{\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^- + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+} \leq Y_{[J]}.$$

Ou de façon équivalente,  $\exists J = 1, 2, \dots, m$ , de sorte que

$$\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^-(Y_{[j]} - Y_{[J]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[j]} - Y_{[J]}) \leq S \leq \sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^-(Y_{[j]} - Y_{[J-1]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[j]} - Y_{[J-1]}),$$

où si  $J = 1$ , nous définissons

$$\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^-(Y_{[j]} - Y_{[J]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[j]} - Y_{[J]}) = \sum_{j=1}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[j]} - Y_{[1]}),$$

$$\sum_{j=1}^{J-1} \omega_{[j]} \theta_{[j]}^-(Y_{[j]} - Y_{[J-1]}) + \sum_{j=J}^m \omega_{[j]} \theta_{[j]}^+(Y_{[j]} - Y_{[J-1]}) = \infty.$$

Enfin, compte tenu de la non-négativité de la réserve, si  $K_0 < 0$ , alors la réserve initiale optimale  $K_0^* = 0$  et si  $K_0 \geq 0$ , alors  $K_0^* = K_0$ .

## A.2 Affectation centralisée des ressources

Le problème d'optimisation pour l'affectation des ressources dans les régions est le suivant :

$$\min_{\substack{K_j^{(i)} \geq 0; i=1,2,\dots,n; \\ j=1,2,\dots,m}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \omega_j^{(i)} \left( \frac{\theta_j^{+(i)}}{2} (X_j^{(i)} - K_j^{(i)})_+^2 + \frac{\theta_j^{-(i)}}{2} (X_j^{(i)} - K_j^{(i)})_-^2 \right)$$

$$\sum_{i=1}^n K_j^{(i)} = K_j, \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m,$$

de sorte que

**Théorème A.2.** *L'optimisation ci-dessus est effectuée d'une période à l'autre et, pour simplifier la notation, l'indicateur de temps  $j$  peut être supprimé à chaque point dans le temps. Soit  $X^{[1]} \geq \dots \geq X^{[n]} > 0$  la séquence de moins en moins ordonnée de  $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(n)}$ .*

Si  $K > \sum_{r=1}^n X^{(r)} = X$ , alors

$$K^{(i)} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \right) X^{(i)} + \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \left( K - \sum_{r \neq i} X^{(r)} \right), \forall i = 1, 2, \dots, n.$$

Si  $K \leq \sum_{r=1}^n X^{(r)} = X$ , nous pouvons trouver un  $I = 1, 2, \dots, n$  tel que  $K \leq \sum_{r=1}^I X^{[r]}$ ,

$$X^{[i]} \geq \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=1}^I X^{[r]} - K \right), \forall i = 1, \dots, I,$$

$$X^{[i]} < \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=1}^I X^{[r]} - K \right), \forall i = I + 1, I + 2, \dots, n.$$

Dans ce cas  $K^{[I+1]} = \dots = K^{[n]} = 0$ .

$$K^{[i]} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \right) X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( K - \sum_{r=1, r \neq i}^I X^{[r]} \right), \forall i = 1, \dots, I.$$

*Démonstration.* À chaque point dans le temps  $j$ , nous voulons résoudre le problème d'optimisation suivant :

$$\min_{K^{(i)}; i=1,2,\dots,n} \sum_{i=1}^n \omega^{(i)} \left( \frac{\theta^{+(i)}}{2} (X^{(i)} - K^{(i)})_+^2 + \frac{\theta^{-(i)}}{2} (K^{(i)} - X^{(i)})_+^2 \right)$$

$$\sum_{i=1}^n K^{(i)} = K, K^{(i)} \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n.$$

de sorte que

### Cas 1 : Excédents et pénuries coexistants

D'abord, examinons le cas où certaines régions ont des excédents, tandis que d'autres enregistrent simultanément des pénuries. Nous démontrerons plus loin que ce cas est impossible, indépendamment des contraintes non négatives. Supposons donc que  $K^{(1)}, K^{(2)}, \dots, K^{(n)}$  s'étend localement dans un ensemble réalisable, de sorte que  $I$  d'entre eux satisfont  $K^{(i)} > X^{(i)}$ , où  $i = 1, 2, \dots, n-1$ . Le reste  $n - I$  satisfait  $K^{(i)} \leq X^{(i)}$ . Sans perte de généralité, supposons que les premiers  $I$  de  $K^{(i)}$  font partie de l'ancien groupe. Puis le problème local devient

$$\min_{K^{(i)}; i=1,2,\dots,n} \sum_{i=I+1}^n \omega^{(i)} \frac{\theta^{+(i)}}{2} (X^{(i)} - K^{(i)})^2 + \sum_{i=1}^I \omega^{(i)} \frac{\theta^{-(i)}}{2} (X^{(i)} - K^{(i)})^2$$

de sorte que 
$$\sum_{i=1}^n K^{(i)} = K.$$

La solution à ce problème est représentée par

$$K^{(i)} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}} + \sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{+(r)}}} \right) X^{(i)} + \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}} + \sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{+(r)}}} \left( K - \sum_{r \neq i} X^{(r)} \right),$$

pour  $i = 1, 2, \dots, I$ , et

$$K^{(i)} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{+(i)}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}} + \sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{+(r)}}} \right) X^{(i)} + \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{+(i)}}}{\sum_{r=1}^I \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}} + \sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{+(r)}}} \left( K - \sum_{r \neq i} X^{(r)} \right),$$

pour  $i = I + 1, \dots, n$ .

Cependant,  $\forall i = 1, 2, \dots, I, K^{(i)} > X^{(i)}$ , et  $\forall i = I + 1, \dots, n, K^{(i)} \leq X^{(i)}$ , ce qui implique  $K > \sum_{r=1}^n X^{(r)}$  et  $K \leq \sum_{r=1}^n X^{(r)}$ , donc nous avons une contradiction. Ce résultat montre qu'il est impossible pour certaines régions d'avoir des excédents tandis que d'autres régions enregistrent des pénuries. Il suffit donc de tenir compte uniquement des scénarios selon lesquels il y a un excédent à l'échelle du système et une pénurie à l'échelle du système.

### Cas 2 : Excédent à l'échelle du système

S'il y a un excédent à l'échelle du système – c.-à-d. que toutes les régions ont des excédents – le problème devient

$$\min_{K^{(i)}; i=1,2,\dots,n} \sum_{i=1}^n \omega^{(i)} \frac{\theta^{-(i)}}{2} (K^{(i)} - X^{(i)})^2$$

$$\sum_{i=1}^n K^{(i)} = K,$$

de sorte que  $K^{(i)} > X^{(i)}, \forall i = 1, \dots, n.$

La solution est représentée par

$$K^{(i)} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \right) X^{(i)} + \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \left( K - \sum_{r \neq i} X^{(r)} \right).$$

Pour que ce résultat soit maintenu, nous avons seulement besoin de la condition selon laquelle  $K > \sum_{r=1}^n X^{(r)} = X$ . En raison de son unicité, dans cette condition, ce  $K^{(i)}$  est optimal.

### Cas 3 : Pénurie à l'échelle du système

Il reste à résoudre le cas d'une pénurie à l'échelle du système, c.-à-d. que toutes les régions ont des pénuries. Dans ce cas, le problème devient

$$\min_{K^{(i)}; i=1,2,\dots,n} \sum_{i=1}^n \omega^{(i)} \frac{\theta^{+(i)}}{2} (X^{(i)} - K^{(i)})^2$$

$$\sum_{i=1}^n K^{(i)} = K;$$

de sorte que  $0 \leq K^{(i)} \leq X^{(i)}, \forall i = 1, \dots, n.$

Outre la condition donnée que  $\sum_{i=1}^n K^{(i)} = K$ , ce problème d'optimisation comporte des contraintes d'inégalité supplémentaires. Par conséquent, nous utilisons les conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) comme suit :

$$\omega^{(i)}\theta^{+(i)}(K^{(i)} - X^{(i)}) - \lambda_1^{(i)} + \lambda_2^{(i)} + \mu = 0,$$

$$0 \leq K^{(i)} \leq X^{(i)},$$

$$\lambda_1^{(i)} \geq 0, \quad \lambda_1^{(i)} K^{(i)} = 0,$$

$$\lambda_2^{(i)} \geq 0, \quad \lambda_2^{(i)} (K^{(i)} - X^{(i)}) = 0,$$

pour tous les  $i = 1, \dots, n$ . En ce qui concerne les valeurs de  $\lambda^{(i)}$  et  $\lambda^{(j)}$ , nous pouvons examiner les quatre cas mutuellement exclusifs suivants :

1.  $\lambda_1^{(i)} > 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} > 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ ,
2.  $\lambda_1^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} > 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ ,
3.  $\lambda_1^{(i)} = 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ ,
4.  $\lambda_1^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ .

Chacun d'entre eux sera abordé comme suit.

**Cas 3.1 :**  $\lambda_1^{(i)} > 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} > 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ .

Nous démontrerons que ce cas mènera à une contradiction, donc qu'il est impossible. Parce que l'ordre de  $\lambda_1^{(i)}$  et  $\lambda_2^{(i)}$  n'influe pas sur les conditions, par souci de simplicité, nous les réorganisons de façon à ce que  $I = 1, 2, \dots, n - 1$ , et un  $\tilde{I} = 1, 2, \dots, n - 1$ , pour lequel

$$\begin{aligned}\lambda_1^{[i]} &> 0, & \forall i = 1, \dots, I, \\ \lambda_1^{[i]} &= 0, & \forall i = I + 1, \dots, n, \\ \lambda_2^{[i]} &= 0, & \forall i = 1, \dots, n - \tilde{I}, \\ \lambda_2^{[i]} &> 0, & \forall i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n,\end{aligned}$$

où  $[i]$  sont des indices après la réorganisation.

Nous avons aussi la condition que  $I \leq n - \tilde{I}$ , parce que pour chaque  $i$ ,  $\lambda_1^{[i]} > 0$  sous-entend que  $K^{[i]} = 0$ , ce qui sous-entend également que  $\lambda_2^{[i]} = 0$ . Par conséquent, le nombre de  $\lambda_2^{[i]}$  qui équivalent à 0 (c.-à-d.  $n - \tilde{I}$ ) est au moins le nombre de  $\lambda_1^{[i]}$  qui dépassent 0; c.-à-d.  $I$ . Puis par les conditions de stagnation complémentaires dans les conditions de KKT ci-dessus,  $K^{[i]} = 0, \forall i = 1, 2, \dots, I$  et  $K^{[i]} = X^{[i]}, \forall i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n$ .

Ensuite, les conditions de KKT sont simplifiées.

$$\begin{aligned}-\omega^{[i]}\theta^{+[i]}X^{[i]} - \lambda_1^{[i]} + \mu &= 0, & \forall i = 1, \dots, I \\ \omega^{[i]}\theta^{+[i]}(K^{[i]} - X^{[i]}) + \mu &= 0, & \forall i = I + 1, \dots, n - \tilde{I} \\ \lambda_2^{[i]} + \mu &= 0, & \forall i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n \\ 0 \leq K^{[i]} \leq X^{[i]}, & & \forall i = I + 1, \dots, n - \tilde{I}\end{aligned}$$

$$\sum_{r=I+1}^{n-\tilde{I}} K^{[r]} = K - \sum_{r=n-\tilde{I}+1}^n X^{[r]},$$

nous pouvons donc observer la contradiction suivante :

$$\begin{aligned}\mu &= -\lambda_2^{[n]} < 0 \\ \mu &= \omega^{[1]}\theta^{+[1]}X^{[1]} + \lambda_1^{[1]} > 0.\end{aligned}$$

Par conséquent, nous pouvons conclure que si  $\tilde{I} = 1, \dots, n - 1$ , alors  $I = 0$  ou  $n$ , et sa contraposition est également vraie, ce qui indique que si  $I = 1, \dots, n - 1$ , alors  $\tilde{I} = 0$  ou  $n$ . Ces deux énoncés correspondent aux deuxième et troisième cas respectivement et sont considérés comme suit.

**Cas 3.2 :**  $\lambda_1^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} > 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ .

Comme dans le cas précédent, nous utilisons les valeurs réorganisées  $\lambda_1^{[i]}$  et  $\lambda_2^{[i]}$ , donc maintenant  $\lambda_2^{[i]} = 0$ , pour tous  $i = 1, \dots, n - \tilde{I}$ , et  $\lambda_2^{[i]} > 0$ , pour tous  $i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n$ , pour certains  $\tilde{I} = 1, 2, \dots, n - 1$ . Cela sous-entend  $K^{[i]} = X^{[i]}$ , pour tous les  $i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n$ .

Dans ce cas, les conditions de KKT deviennent

$$\begin{aligned} \omega^{[i]\theta+[i]}(K^{[i]} - X^{[i]}) + \mu &= 0, \quad \forall i = 1, \dots, n - \tilde{I} \\ \lambda_2^{[i]} + \mu &= 0, \quad \forall i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n \\ 0 &\leq K^{[i]} \leq X^{[i]}, \quad \forall i = 1, \dots, n - \tilde{I} \\ \sum_{r=1}^{n-\tilde{I}} K^{(r)} &= K - \sum_{r=n-\tilde{I}+1}^n X^{(r)}. \end{aligned}$$

En solutionnant ce système, nous obtenons

$$\begin{aligned} K^{[i]} &= \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{[i]\theta+[i]}}}{\sum_{r=1}^{n-\tilde{I}} \frac{1}{\omega^{[r]\theta+[r]}}} \right) X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]\theta+[i]}}}{\sum_{r=1}^{n-\tilde{I}} \frac{1}{\omega^{[r]\theta+[r]}}} \left( K - \sum_{r \neq i}^n X^{[r]} \right) \\ &= X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]\theta+[i]}}}{\sum_{r=1}^{n-\tilde{I}} \frac{1}{\omega^{[r]\theta+[r]}}} \left( K - \sum_{r=1}^n X^{[r]} \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n - \tilde{I} \\ \mu &= \frac{1}{\sum_{r=1}^{n-\tilde{I}} \frac{1}{\omega^{[r]\theta+[r]}}} \left( \sum_{r=1}^n X^{[r]} - K \right) \\ \lambda_2^{[i]} &= -\mu = -\frac{1}{\sum_{r=1}^{n-\tilde{I}} \frac{1}{\omega^{[r]\theta+[r]}}} \left( \sum_{r=1}^n X^{[r]} - K \right), \quad \forall i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Selon l'hypothèse de pénurie à l'échelle du système,  $\sum_{r=1}^n X^{[r]} - K \geq 0$ , et donc,  $\lambda_2^{[i]} \leq 0$  pour tous  $i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n$ . Mais cela contredit l'hypothèse selon laquelle  $\lambda_2^{[i]} > 0$  pour tous  $i = n - \tilde{I} + 1, \dots, n$ . Nous pouvons donc dire qu'il s'agit d'un autre cas impossible.

**Cas 3.3 :**  $\lambda_1^{(i)} > 0$  pour certains  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ .

Encore une fois, dans ce cas, nous utilisons les valeurs  $\lambda_1^{[i]}$  réorganisées et  $\lambda_2^{[i]}$  pour

$i = 1, \dots, n$ . Et nous supposons qu'il existe un  $I = 1, 2, \dots, n-1$ , tel que  $\lambda_1^{[i]} > 0$  pour  $i = 1, \dots, I$ , et  $\lambda_1^{[i]} = 0$  pour  $i = I+1, \dots, n$ . Cela sous-entend  $i = 1, \dots, I$ , et nous obtenons les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} -\omega^{[i]}\theta^{+[i]}X^{[i]} - \lambda_1^{[i]} + \mu &= 0, \quad \forall i = 1, \dots, I \\ \omega^{[i]}\theta^{+[i]}(K^{[i]} - X^{[i]}) + \mu &= 0, \quad \forall i = I+1, \dots, n \\ 0 \leq K^{[i]} \leq X^{[i]}, \quad \forall i &= I+1, \dots, n \\ \sum_{i=I+1}^n X^{[i]} &= K. \end{aligned}$$

Ensemble, elles nous donnent

$$\begin{aligned} K^{[i]} &= \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \right) X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( K - \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} \right) \\ &= X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( K - \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} \right), \quad \forall i = I+1, \dots, n. \\ \mu &= \frac{1}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} - K \right) \\ \lambda_1^{[i]} &= \frac{1}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} - K \right) - \omega^{[i]}\theta^{+[i]}X^{[i]}, \quad \forall i = 1, \dots, I. \end{aligned}$$

Puisque  $\lambda_1^{[i]} > 0$  pour  $i = 1, \dots, I$  et  $0 \leq K^{[i]} \leq X^{[i]}$  pour  $i = I+1, \dots, n$ , les conditions suivantes sont maintenues :

$$K \leq \sum_{r=I+1}^n X^{[r]},$$

$$\begin{aligned} X^{[i]} &< \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} - K \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, I, \\ X^{[i]} &\geq \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} - K \right), \quad \forall i = I+1, \dots, n. \end{aligned}$$

**Cas 3.4 :**  $\lambda_1^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ , et  $\lambda_2^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ .



Il ne reste plus qu'à examiner le cas dans lequel  $\lambda_1^{(i)} = 0$  et  $\lambda_2^{(i)} = 0$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ . Puisqu'il n'y a pas de divergence dans les valeurs de  $\lambda_1^{(i)}$  et de  $\lambda_2^{(i)}$ , la réorganisation ne fait pas de différence. Néanmoins, nous utiliserons les indices ordonnés  $^{[i]}$  ici pour assurer la cohérence.

Dans ce cas, les conditions deviennent

$$\omega^{[i]} \theta^{+[i]} (K^{[i]} - X^{[i]}) + \mu = 0, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

$$0 \leq K^{[i]} \leq X^{[i]}, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n K^{[i]} = K.$$

Résoudre ce système nous donne

$$\begin{aligned} K^{[i]} &= \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{[i]} \theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{[r]} \theta^{+[r]}}} \right) X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]} \theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{[r]} \theta^{+[r]}}} \left( K - \sum_{r \neq i} X^{[r]} \right) \\ &= X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]} \theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{[r]} \theta^{+[r]}}} \left( K - \sum_{r=1}^n X^{[r]} \right), \quad \forall i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Puisque nous supposons qu'il y a une pénurie à l'échelle du système,  $K - \sum_{r=1}^n X^{[r]} \leq 0$ , et donc nous obtenons  $K^{[i]} \leq X^{[i]}$  pour tous  $i = 1, \dots, n$ . Ensuite, la seule condition requise pour que ce résultat soit maintenu est  $0 \leq K^{[i]}$  pour tout  $i = 1, \dots, n$ , ce qui nous donne

$$X^{[i]} \geq \frac{\frac{1}{\omega^{[i]} \theta^{+[i]}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{[r]} \theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=1}^n X^{[r]} - K \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n.$$

Ce résultat peut être considéré comme un cas particulier du **cas 3.3**, où  $I = 0$ , et par conséquent nous pouvons combiner les résultats de ces deux cas.

En résumé, le résultat dépend d'un excédent ou d'une pénurie à l'échelle du système. En cas d'excédent à l'échelle du système (c.-à-d.  $K^{(i)} > X^{(i)}$  pour  $i = 1, \dots, n$ ), la répartition optimale dans chaque région est représentée par

$$K^{(i)} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \right) X^{(i)} + \frac{\frac{1}{\omega^{(i)}\theta^{-(i)}}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\omega^{(r)}\theta^{-(r)}}} \left( K - \sum_{r \neq i} X^{(r)} \right).$$

En cas de pénurie à l'échelle du système (c.-à-d.  $0 \leq K^{(i)} \leq X^{(i)}$  pour  $i = 1, \dots, n$ ), il a été démontré que la solution peut être trouvée en triant  $\lambda_1^{(i)}$  de manière à ce que le premier  $I = 0, 1, \dots, n-1$  d'entre eux soit supérieur à 0. Si  $I$  est 0, alors tout  $\lambda_1^{(i)} = 0$ . Le  $I$  ici doit

satisfaire aux conditions suivantes,  $K \leq \sum_{r=I+1}^n X^{(r)}$ ,

$$X^{[i]} < \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} - K \right), \forall i = 1, 2, \dots, I,$$

$$X^{[i]} \geq \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} - K \right), \forall i = I+1, \dots, n,$$

où si  $I = 0$ , la première inégalité peut être éliminée. Une fois  $I$  identifié, la répartition optimale dans chaque région est représentée par  $K^{[1]} = \dots = K^{[I]} = 0$ ,

$$K^{[i]} = \left( 1 - \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \right) X^{[i]} + \frac{\frac{1}{\omega^{[i]}\theta^{+[i]}}}{\sum_{r=I+1}^n \frac{1}{\omega^{[r]}\theta^{+[r]}}} \left( K - \sum_{r=I+1}^n X^{[r]} \right), \quad \forall i = I+1, \dots, n.$$

Puisque  $\lambda_1^{(i)}$  sont triés, le résultat final aurait dû être trié de nouveau en conséquence. Toutefois, les conditions sont les mêmes peu importe l'ordre. Enfin, nous avons réétiqueté  $I$  et  $n-I$  pour simplifier les notations dans le texte principal et, par conséquent,  $X^{(i)}$  devraient donc plutôt être triés en ordre décroissant.

## Annexe B : Valeurs des paramètres dans des exemples numériques

Cette section présente un relevé de tous les paramètres des modèles utilisés dans les sections précédentes. Les mêmes ensembles de paramètres sont utilisés pour tous les calculs du cadre à trois piliers.

**Tableau 4 : Paramètres d'évaluation de la demande; les valeurs sont choisies dans les fourchettes fournies dans les tableaux 2 et 3**

Paramètre	Valeur
Pourcentage des patients aux soins intensifs ayant besoin de ventilateurs (catégorie $I_3$ )	0,9
Unités d'EPI requises par patient exposé (catégorie $E$ )	5
Unités d'EPI requises par patient hospitalisé (catégorie $I_2$ )	15
Unités d'EPI requises par patient aux soins intensifs (catégorie $I_3$ )	20

**Tableau 5 : Paramètres de planification des ventilateurs (Porpora, 2020; Rowland, 2020; Patel, 2020)**

Paramètre	Valeur
États participants	New York, Floride, Californie
Coût de possession par unité et par jour ( $c_j$ )	1
Coût initial de la réserve par unité ( $c_0$ )	25 120
Taux de production journalier ( $a$ )	10 unités
Coût de pénurie/du déficit ( $\theta_j^+/\theta_j^-$ ) au graphique 8a	1 000/1 000
Pénurie/excédent ( $\theta_j^+/\theta_j^-$ ) au graphique 8b	1 000/20
Poids variable dans le temps ( $\omega_j$ )	Proportionnel à la demande journalière $X_j$

**Tableau 6 : Paramètres de planification de l'EPI**

Paramètre	Valeur
États participants	New York, Floride, Californie
Coût de possession par 1 000 unités par jour ( $c_j$ )	0,01
Coût initial de la réserve pour 1 000 unités ( $c_0$ )	0,5
Taux de production journalier ( $a$ )	50 000 unités
Coût de pénurie ( $\theta^+$ )	1
Poids variable dans le temps ( $\omega_j$ )	Proportionnel à la demande journalière $X_j$

**Tableau 7 : Paramètres d'affectation des ventilateurs/ensembles d'EPI**

Paramètre	Valeur
États participants	New York, Floride, Californie
Coût d'une pénurie/d'un excédent ( $\theta_j^{(i)+} / \theta_j^{(i)-}$ )	1
Pondération de l'affectation des ressources dans la région $i$ au temps $j$ ( $\omega^{(i)}$ )	Proportionnelle à $m$



© 2021 Institut canadien des actuaires

Institut canadien des actuaires  
360, rue Albert, bureau 1740  
Ottawa, ON K1R 7X7  
613-236-8196  
[siege.social@cia-ica.ca](mailto:siege.social@cia-ica.ca)

[cia-ica.ca](http://cia-ica.ca)



L'Institut canadien des actuaires (ICA) est l'organisme bilingue national et le porte-parole de la profession actuarielle au Canada. Nos membres se vouent à fournir des services et des conseils actuariels de la plus haute qualité. L'Institut place l'intérêt public avant les besoins de la profession et de ses membres.