[Page de garde]

**HEC MONTRÉAL**

# Analyse de l'approvisionnement stratégique de matériel médical en temps de crise

**par**
**Shadé Andjorin**

**Martin Cousineau**
**HEC Montréal**
**Codirecteur de recherche**

**Valérie Bélanger**
**HEC Montréal**
**Codirectrice de recherche**

**Sciences de la gestion**
**(Spécialisation Logistique internationale)**

**Mémoire présenté en vue de l'obtention**
**du grade de maîtrise ès sciences en gestion**
**(M. Sc.)**

**Décembre 2022**
**© Shadé Andjorin, 2022**

# Résumé

Ce mémoire s'intéresse à la problématique d'approvisionnement en équipement de protection individuelle dans le cadre de la pandémie de COVID-19. Avec la montée des cas de la maladie, les travailleurs de la santé québécois manquent d'équipement médical pour assurer la prestation des soins. Les gestionnaires du ministère de la santé doivent donc prendre des décisions importantes pour répondre à la demande croissante de cette ressource convoitée. Le mémoire propose donc différentes stratégies d'approvisionnement pour guider le gestionnaire dans la prise de décision. La simulation à évènements discrets s'est avérée une alternative appropriée pour la résolution du problème. Ainsi, l'outil développé explore les possibilités de s'approvisionner auprès d'une réserve d'équipement de protection individuelle et de sources alternatives. Il s'intéresse également à l'allocation de la demande entre les sources d'approvisionnement disponibles. L'évaluation des stratégies à l'aide d'indicateurs de performance enregistre des résultats divergents. D'une part, l'adoption d'une réserve nationale d'EPI minimise les ruptures de stock, tandis que le recours à un fournisseur alternatif minimise les risques. L'utilisation simultanée des deux sources d'approvisionnement est la meilleure stratégie si la contrainte budgétaire est surmontée. Le présent mémoire discute donc des enjeux relatifs à la minimisation des coûts et du risque de perturbation afin de départager sur l'efficience des stratégies proposées.

**Mots clés :** approvisionnement stratégique, gestion de risque, pandémie, COVID-19, allocation de la demande, source d'approvisionnement alternative, matériel médical, équipement de protection individuelle, réserve d'ÉPI

**Méthodes de recherche :** Simulation à évènements discrets

# Abstract

This thesis addresses the issue of personal protective equipment supply in the context of the COVID-19 pandemic. With the increase in the number of cases of the disease, health care workers in Quebec are running out of medical equipment to provide care. Managers at the Ministry of Health must therefore make important decisions to meet the growing demand for the coveted resource. This paper proposes different procurement strategies to guide managers in their decision-making process. Discrete event simulation has proven to be an appropriate alternative to solve the problem. Thus, the developed tool explores the possibilities of sourcing from a reserve of personal protective equipment and from alternative sources. The tool also provides demand allocation among available supply sources. Evaluation of the strategies using performance indicators shows divergent results. On the one hand, the adoption of a national PPE reserve minimizes stock-outs, while the use of an alternative supplier minimizes risk. Using both sources of supply simultaneously is the best strategy if the budget constraint is overcome. Thus, this dissertation addresses the issues of minimization of cost and disruption risk to determine the effectiveness of the proposed strategies.

**Keywords:** strategic procurement, supply chain management risk, pandemic, COVID-19, demand allocation, alternative sourcing, medical supplies, personal protective equipment, PPE reserve

**Research methods:** Discrete event simulation

# Table des matières

Résumé ..... iv
Abstract ..... vi
Table des matières ..... viii
Liste des tableaux ..... xi
Liste des figures ..... xiii
Liste des abréviations ..... xv
Remerciements ..... xvii
Introduction ..... 1
Chapitre 1 La revue de littérature ..... 8
1.1 Les stratégies d'approvisionnement ..... 8
1.1.1 L'approvisionnement simple (single sourcing) ..... 9
1.1.2 L'approvisionnement double (dual sourcing) ..... 10
1.1.3 L'approvisionnement multiple (multi-sourcing) ..... 10
1.1.4 L'approvisionnement local ..... 11
1.1.5 L'approvisionnement international ..... 12
1.2. La sélection des fournisseurs ..... 14
1.3 La gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement ..... 18
1.3.1 La sélection des fournisseurs ..... 21
1.3.2 L'allocation de la demande ..... 21
1.3.3 Les stratégies d'approvisionnement ..... 22
1.3.4 Les stratégies d'approvisionnement dans le contexte de la crise sanitaire de COVID-19 ..... 25
1.4 Les méthodes de sélection des fournisseurs ..... 26
1.4.1 L'AHP (Analytic Hierarchy Process) ..... 27
1.4.2 L'ANP (Analytic Network Process) ..... 27
1.4.3 L'arbre de décision ..... 28
1.4.4 La programmation linéaire ..... 29
1.4.5 La programmation non linéaire ..... 30
1.4.6 La programmation multi objectif ..... 31
1.4.7 Les heuristiques ..... 31
1.4.8 Les modèles analytiques ..... 32
1.4.9 L'analyse de décision multicritère ..... 32
1.4.10 La théorie des jeux ..... 33
1.4.11 La simulation ..... 33
Chapitre 2 Développement d'une approche de simulation : La méthodologie ..... 37
2.1 La simulation à évènements discrets ..... 37
2.2 Le logiciel de simulation Arena ..... 41
2.3 Le cadre d'analyse ..... 41
Chapitre 3 Développement d'une approche de simulation : La modélisation de la problématique ..... 43
3.1 La description conceptuelle du modèle ..... 43
3.2 Les hypothèses de la simulation ..... 44
3.3 Le système de réapprovisionnement périodique ..... 45
3.4 Les stratégies d'allocation de la demande dans la simulation ..... 47

3.5 L'extraction des données simulées ..... 51
3.6 L'évaluation des stratégies étudiées ..... 52
Chapitre 4 Développement d'une approche de simulation : L'implémentation du modèle conceptuel ..... 56
4.1 Le modèle initial ..... 56
4.2 L'ajout d'un fournisseur alternatif au modèle initial ..... 58
4.3 L'ajout d'une réserve au modèle initial ..... 58
4.4 L'ajout du fournisseur alternatif & de la réserve au modèle initial ..... 59
Chapitre 5 Développement d'une approche de simulation : L'expérimentation du modèle ..... 62
5.1 La collecte de données ..... 62
5.2 Analyse des données recueillies ..... 62
5.2.1 Les paramètres de la simulation ..... 63
5.2.2 L'évolution des hospitalisations en lien avec la COVID-19 ..... 65
5.2.3 La demande de masques N95 ..... 67
Chapitre 6 Développement d'une approche de simulation : La présentation des résultats 72
6.1 La vérification des résultats ..... 72
6.2 Les stratégies disposant d'une source d'approvisionnement alternative ..... 73
6.2.1 La demande perdue ..... 74
6.2.2 L'utilisation de la réserve ..... 75
6.2.3 La répartition des commandes ..... 76
6.2.4 Les pénuries ..... 78
6.2.5 Le stock final ..... 80
6.3 Les stratégies disposant de deux sources d'approvisionnement alternatives ..... 81
6.3.1 La demande perdue ..... 81
6.3.2 L'utilisation de la réserve ..... 82
6.3.3 La répartition des commandes ..... 83
6.3.4 Les pénuries ..... 84
6.3.5 Le stock final ..... 86
Chapitre 7 Développement d'une approche de simulation : La discussion des résultats 88
Conclusion ..... 94
Bibliographie ..... i
Annexes ..... viii

# Liste des tableaux

Tableau 1.1 Les avantages et inconvénients des stratégies d'approvisionnement ..... 14
Tableau 1.2 Les méthodes de sélection des fournisseurs dans un contexte de risque ... 27
Tableau 1.3 Les principaux résultats relevés dans la littérature sur la sélection des fournisseurs et l'allocation de la demande entre ces derniers..... 34
Tableau 2.1 Les composantes de la simulation à évènements discrets ..... 40
Tableau 3.1 Les stratégies d'allocation de la demande avec une source alternative ..... 47
Tableau 3.2 Les stratégies d'allocation de la demande avec deux sources alternatives .. 50
Tableau 3.3 La grille d'évaluation des indicateurs de performance ..... 52
Tableau 5.1 Les données associées aux paramètres de la simulation ..... 63
Tableau 5.2 Les paramètres de la simulation ..... 64
Tableau 5.3 La consommation et la demande réelle de masques N95..... 68
Tableau 6.1 Proportion de la demande perdue des stratégies à une source alternative avec intervalle de confiance de 95% ..... 74
Tableau 6.2 Répartition des stratégies à une source alternative selon leur stock final moyen avec intervalle de confiance de 95% ..... 80
Tableau 6.3 Répartition des stratégies à deux sources alternatives selon leur stock final moyen avec intervalle de confiance de 95% ..... 86

# Liste des figures

Figure 1.1 Les types de risques dans la chaîne d'approvisionnement ..... 20
Figure 3.1 La grille d'extraction des données brutes du modèle de simulation ..... 52
Figure 4.1 Le modèle de simulation initial ..... 56
Figure 4.2 Le modèle de simulation avec l'ajout d'un fournisseur alternatif ..... 58
Figure 4.3 Le modèle de simulation avec l'ajout d'une réserve d'ÉPI ..... 59
Figure 4.4 Le modèle de simulation avec l'ajout d'un fournisseur alternatif et d'une réserve d'ÉPI ..... 60
Figure 5.1 Évolution du nombre total de cas hospitalisés et admis aux soins intensifs avec un diagnostic de COVID-19 au Canada hors Québec entre juillet 2020 et juin 2021 .... 66
Figure 5.2 L'évolution de la consommation réelle de masques N95 dans les établissements hospitaliers canadiens de juillet 2020 à Juin 2021 ..... 67
Figure 5.3 La consommation de masques N95 et les prévisions de la demande lors de la 2e vague de COVID-19 ..... 70
Figure 6.1 Proportion de l'utilisation moyenne de la réserve des stratégies à une source alternative avec intervalle de confiance de 95% ..... 75
Figure 6.2 Proportion des commandes moyennes réparties entre le fournisseur alternatif et le fournisseur traditionnel ..... 77
Figure 6.3 Proportion des commandes moyennes réparties entre la réserve et le fournisseur traditionnel ..... 78
Figure 6.4 Proportion du temps en pénurie des stratégies à une source alternative ..... 79
Figure 6.5 Proportion de la demande perdue des stratégies à une source alternative ..... 82
Figure 6.6 Proportion de l'utilisation moyenne de la réserve des stratégies à deux sources alternatives avec intervalle de confiance de 95% ..... 83
Figure 6.7 Proportion des commandes moyennes réparties entre le fournisseur traditionnel, le fournisseur alternatif et la réserve ..... 84
Figure 6.8 Proportion du temps en pénurie des stratégies à deux sources alternatives .. 85

# Liste des abréviations

| | |
|---|---|
| AHP | *Analitical hiercarchy process* |
| ANP | *Analitical network process* |
| COVID-19 | Maladie provoquée par le coronavirus SARS-CoV-2 |
| ÉPI | Équipement de protection individuelle |
| GFA | Grand fournisseur alternatif |
| GR | Grande réserve |
| JAT | Juste à temps |
| PFA | Petit fournisseur alternatif |
| PR | Petite réserve |
| GRCA | Gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement |

# Remerciements

D’abord, j’adresse mes sincères remerciements à mes directeurs de mémoire, Martin Cousineau et Valérie Bélanger, qui ont su m’accompagner, m’encourager et me supporter tout au long de ce parcours. Merci pour votre constante disponibilité, votre patience et vos précieux conseils.

Je tiens également à remercier ma famille et mes amies qui ont su contribuer de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire. Merci pour votre soutien tout au long de mon parcours universitaire. Que ce travail puisse témoigner de votre soutien et de vos encouragements constants. Je tiens particulièrement à remercier maman, papa, mamie et Cherif sans qui la réalisation de ce travail n’aurait pas été possible. Merci d’avoir toujours été là pour moi et d’avoir su trouver les mots justes pour me motiver.

Enfin, je dédie cet écrit à la mémoire de mon grand-père, Gérard Bourbonnais. Merci papi d’avoir toujours cru en moi et de m’avoir accompagné dans tous mes projets. Je sais pertinemment que tu aurais pris la peine, avec un malin plaisir d’ailleurs, de me lire. Dans l’espoir de te rendre fière d’où tu es.

# Introduction

L'année 2020 restera à jamais marquée par la pandémie découlant de la maladie à coronavirus 2019 (COVID-19) qui enregistre jusqu'à ce jour plus de 6 millions de morts à travers le monde (Gauthier, 2022). C'est en décembre 2019 que le coronavirus causant la COVID-19 a été détecté pour la première fois à Wuhan en Chine (Gouvernement du Québec, 2022). Dès le 25 janvier 2020, un premier cas de COVID-19 est déclaré sur le sol canadien (Gerbet, 2020). Le 11 mars 2020, l'organisation mondiale de la santé déclare que l'éclosion de COVID-19 est maintenant considérée comme une pandémie (Labrecque, 2020), soit une épidémie touchant une partie importante de la population mondiale (Larousse, 2021). Pris de panique, les dirigeants tentent délibérément de mettre en place des stratégies pour faire face à la crise. En effet, le gouvernement fédéral a, entre autres, suspendu certains vols pour limiter l'entrée de cas de COVID-19 au pays.

Au Québec, l'état d'urgence sanitaire est déclaré le 13 mars 2020 alors que la crise mondiale prend une ampleur considérable (Gouvernement du Québec, 2022). Le gouvernement québécois instaure rapidement un confinement afin de restreindre les citoyens aux déplacements essentiels. Dans les établissements hospitaliers de la province, le nombre de cas positifs de COVID-19 ne cesse d'augmenter et le personnel soignant manque considérablement de matériel médical pour délivrer les soins aux patients contaminés.

Par conséquent, les différents paliers de gouvernements se mobilisent par tous les moyens afin de fournir aux établissements hospitaliers des fournitures qui peuvent être portées pour prévenir l'exposition potentielle aux maladies infectieuses, soit des équipements de protection individuelle (ÉPI) (Beaulieu et al., 2021). Ces équipements comportent, entre autres, les masques de procédure, les masques N95, les blouses, les visières et les gants et peuvent être classés en ordre de niveau de complexité comme suit : les visières étant de complexité minime, suivi du désinfectant pour les mains, puis des blouses, pour finir avec les masques qui sont de complexité supérieure (Beaulieu et al., 2021). Au printemps 2020, la consommation d'équipement de protection individuelle (ÉPI) atteint des records alors qu'on enregistre une utilisation hebdomadaire de 7 millions de masques chirurgicaux, de

1 400 000 blouses, de 140 000 masques N95 et de plus de 40 000 visières dans le système de la santé québécois (Duchaine, 2020). Tout au long de la crise dont les retombées se font toujours sentir, le masque N95 fait face à d'importants enjeux d'approvisionnement puisque certains matériaux nécessaires à sa fabrication sont produits uniquement en Chine. Il est donc difficile d'y trouver des sources alternatives d'approvisionnement dans l'immédiat. En effet, les entreprises locales n'ont pas été en mesure de rapidement modifier leurs chaînes de production pour en fabriquer comme ce fût le cas pour des ÉPI moins complexes.

La logique d'approvisionnement en ÉPI avant la pandémie reposait sur une stratégie d'approvisionnement à l'international, principalement en Chine où les fournitures médicales sont fabriquées avec des coûts de production nettement inférieurs en plus de respecter les normes de qualité de Santé Canada. En Amérique du Nord, 90% des ÉPI sont importés de la Chine (Snowdon et al., 2021). Cette grande puissance est donc devenue le producteur mondial le plus important d'ÉPI avec une forte concentration de sa production dans la région de Wuhan, foyer de l'éclosion mondiale. Par ailleurs, à l'arrivée des premiers cas de la maladie à Wuhan, la production était notamment réduite en raison du Nouvel An chinois. Puis, avec la croissance fulgurante du nombre de cas, la Chine a rapidement dû mettre en place un confinement ce qui a d'autant plus ralenti la production de fournitures médicales (Beaulieu et al., 2021). En somme, lorsque la pandémie a été déclarée, les fournisseurs en matériel médical ont rapidement été submergés par un nombre de commandes dépassant largement leurs capacités de production. Ils ont donc placé leurs clients en allocation afin de répartir équitablement leur production (Fache, 2020) Comme l'approvisionnement de matériel médical en provenance de la Chine devient limité, eux aussi faisant face à la pandémie, les gouvernements mondiaux se voient dans l'obligation de réagir et de trouver des sources alternatives pour répondre aux besoins urgents d'ÉPI.

Au Canada, on se tourna donc instinctivement vers la recherche de nouveaux fournisseurs à l'étranger en réponse au manque de matériel médical, ce qui s'est avéré un défi de taille étant donné le risque que comporte les relations d'affaire à l'étranger. Dans un premier temps, il est difficile de mesurer la qualité des produits dans l'urgence, ce qui engendra la

réception de produits de contrefaçon ne remplissant pas les normes de Santé Canada (Fache, 2020). De plus, établir des contrats dans l'urgence est également un défi de taille en plus des prix des matières premières et des produits finis qui atteignent des sommets fulgurants étant donné la rareté des produits. En réponse à la crise, l'approvisionnement local devient donc une option de plus en plus favorisée alors que les entreprises locales mettent de concert les efforts nécessaires pour ajuster leur chaîne de production et fournir certains ÉPI nécessaires aux établissements.

Plusieurs entreprises canadiennes ont adapté leur chaîne de production pour répondre aux besoins du secteur de santé. L'agilité de certaines entreprises locales s'est rapidement avérée un atout. En effet, plusieurs entreprises ont pu dans un délai de 4 à 6 semaines adapter leur chaîne de production afin de produire des ÉPIs. Il est clair que ces entreprises ne sont pas arrivées à ce résultat sans défi. Optimoule, entreprise québécoise de moules, a notamment mentionné que la difficulté d'accès aux matières premières s'est avérée un obstacle pour l'entreprise (Blanchet, 2021). Ils se sont, entre autres, lancés dans la production de visières en réponse à la crise et ont mentionné la difficulté de trouver le plastique nécessaire à leur production. D'autant plus que lorsqu'ils arrivaient à y avoir accès, le coût du matériau était beaucoup plus dispendieux (Blanchet 2021). Medicom, entreprise productrice de plusieurs ÉPI a quant à elle réussi à construire en 3 mois une usine de production de masques N95 à Saint-Laurent (Boily et Cruzille, 2020). Quant à 3M, premier fournisseur du Canada en masques N95, ils ont créé une chaîne de production de masques N95 en Ontario qui fût opérationnelle 8 mois suivants les investissements initiaux (Gouvernement de l'Ontario, 2021). Au-delà d'entreprises œuvrant déjà dans le médical, d'autres entreprises se sont mobilisées pour répondre à la demande accrue d'ÉPI. Canada Goose, œuvrant dans le Prêt-à-Porter, prévoyait livrer environ 1,5 millions de blouses au Gouvernement du Canada à la fin octobre 2020 (Services publics et Approvisionnement Canada, 2020).

Ainsi, la crise sanitaire de COVID-19 a permis de soulever la problématique de la dépendance à la Chine en matière d'approvisionnement en ÉPI, ce qui nous amène à formuler la question de recherche suivante : Quelles sont les meilleures stratégies d'approvisionnement en matériel médical à favoriser en contexte de crise ?

Le présent mémoire a donc pour objectif de s'intéresser aux stratégies d'approvisionnement en place dans ce domaine afin de relever les meilleures stratégies à favoriser en contexte de crise. Le but de cette recherche est d'apporter un regard nouveau sur le processus décisionnel d'approvisionnement stratégique en proposant un modèle de simulation dynamique nous permettant d'analyser une multitude de stratégies et de paramètres. Avec notre simulation, nous arrivons à tenir compte des changements temporels dans la prise de décision. La littérature sur la gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement a connu une attention particulière depuis le mouvement vers l'externalisation des chaînes d'approvisionnement. Toutefois, les écrits sur le sujet restent limités d'où la pertinence d'approfondir davantage sur le sujet, d'autant plus que la pandémie de COVID-19 a permis de remettre en cause le processus décisionnel d'approvisionnement stratégique dans le secteur de la santé. En second lieu, avec les leçons tirées de la première vague, les autorités ont mis en place une réserve nationale d'ÉPI pour répondre aux besoins des établissements hospitaliers à travers le Canada. Par conséquent, nous souhaitons, dans un deuxième temps, analyser cette stratégie de réserve nationale afin de comprendre comment optimiser l'utilisation de celle-ci pour les crises à venir.

Nous caractérisons ici le terme de crise sanitaire par : « une situation d'urgence n'ayant jamais été expérimentée qui représente une menace pouvant affecter la santé de la population » (Futura Sciences, 2022). Au-delà d'une crise uniquement sanitaire, l'état de crise que nous considérons englobe tout ce qui en découle en matière d'approvisionnement en matériel médical et de toute conséquence des pénuries de matériel médical sur la délivrance des soins.

Nous avons décidé de nous intéresser à l'approvisionnement stratégique d'un seul produit, soit le masque N95. Étant donné que les ÉPI n'ont pas le même degré de complexité, nous ne souhaitions pas les étudier dans leur ensemble et avons décidé de mettre l'accent sur le masque N95 qui représente l'ÉPI avec le niveau de complexité le plus élevé selon Beaulieu et al. (2021). Comme nous nous intéressons à l'utilisation des ÉPIs dans les établissements hospitaliers dans le cadre de la pandémie de COVID-19, nous avons préféré cibler le masque N95 comme son utilisation est limitée à certaines procédures.

Selon les protocoles établis par les hautes instances de santé, le masque N95 doit être utilisé par un professionnel de la santé lorsqu'il est en contact avec : « un patient atteint d'une infection transmise par l'inhalation de gouttelettes aéroportées, la tuberculose en étant un exemple » (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2022). Lorsqu'il est bien ajusté à l'utilisateur, le masque N95 protège le nez et la bouche à 95 % des particules bactériennes en suspension dans l'air, des virus et des aérosols dangereux (Gouvernement du Canada, 2022). On utilise donc ce type de protection lorsque l'intervention devant être réalisée comporte un risque élevé de contamination. D'autres exemples significatifs de l'utilisation du masque N95 sont la bronchoscopie et l'autopsie. En somme, cet appareil avait été recommandé pour traiter les patients atteints ou suspectés d'être atteints de l'épidémie du syndrome respiratoire aigu sévère (SARS) de 2003. Bien entendu, ce type de protection est également recommandé, lorsqu'un membre du corps hospitalier fait face à un cas suspecté ou confirmé de COVID-19 (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2022).

En parallèle, le masque chirurgical permet plutôt de protéger les personnes qui le portent des fluides corporels, des particules et des micro-organismes, mais comme il est plus ample que le masque N95, il n'offre pas le même niveau de filtration des particules que le masque N95 (Gouvernement du Canada, 2022). Il est donc plus fréquemment utilisé pour des mesures préventives, mais lorsqu'une intervention de risque important doit être effectuée, le masque N95 doit être priorisé. Le N95 reflète donc mieux l'utilisation d'un ÉPI dans notre contexte par rapport aux masques chirurgicaux par exemple, qui doivent être portés en tout temps.

Le choix du masque N95 repose ainsi sur la complexité du produit en plus des enjeux importants d'approvisionnement propres à celui-ci. C'est un ÉPI primordial sans lequel la délivrance des soins ne peut s'effectuer sans risque pour les travailleurs de la santé. Une pénurie est donc fatidique pour un département de santé qui doit alors se mettre à risque de contracter le virus et éventuellement le propager à plus grande échelle. Assurer un approvisionnement constant de masques N95 s'est avéré un véritable enjeu durant les premières vagues de pandémie et se doit d'être mis de l'avant étant donné la gravité de rencontrer des pénuries de cet ÉPI critique. Enfin, nous pensons que les leçons tirées de

ce mémoire pourraient probablement servir à coordonner l'approvisionnement d'autres EPI moins complexes en y appliquant la même logique, mais en variant les différents paramètres.

Le présent mémoire se divise en 7 chapitres. Dans le premier chapitre, nous proposons une revue de littérature entourant les différents sujets relatifs à la problématique. Nous nous intéresserons à la sélection des fournisseurs ainsi qu'aux différents critères pouvant influencer ce choix. Puis, nous passerons en revue les différentes stratégies d'approvisionnement afin de comprendre les avantages et les inconvénients de chaque pratique. Enfin, nous présenterons les différentes méthodes utilisées pour réaliser la sélection des fournisseurs et l'allocation de la demande entre ceux-ci.

Le prochain chapitre exposera la méthode choisie pour comparer les différentes stratégies en ce qui a trait à la sélection des fournisseurs, soit la simulation.

Puis, dans les chapitres 3 & 4, le cadre conceptuel du modèle de simulation sera présenté suivi de son implémentation dans le logiciel de simulation. Les indicateurs de performance que nous souhaitons étudier seront également présentés dans le chapitre 3.

Ensuite, le chapitre d'expérimentation exposera l'analyse des données recueillies ayant servi à peupler le modèle de simulation pour qu'il se rapproche de la situation réelle d'intérêt.

Le chapitre qui suit présentera les résultats extraits de notre modèle de simulation en fonction des indicateurs de performance étudiés. Les stratégies seront ici comparées afin d'établir les stratégies à prioriser selon le contexte. Puis, le chapitre 7 présentera une discussion des résultats observés ainsi que des recommandations.

Pour finir, dans la conclusion, nous reviendrons sur l'ensemble du mémoire et émettrons les limites de la recherche.

# Chapitre 1 La revue de littérature

Le présent chapitre propose un bref recensement des écrits sur les sujets entourant la question de recherche. Dans un premier temps, nous nous attarderons à la sélection des fournisseurs et des stratégies d'approvisionnement afin de mieux comprendre les options à notre disposition pour réagir face à la crise. Ces décisions représentent des décisions stratégiques de la planification logistique. Il s'agit donc de décisions cruciales qui doivent être prises avec minutie, car elles seront prises sur un horizon temporel de long terme. Nous nous attarderons donc à ces choix stratégiques en premier lieu. Ainsi, nous passerons en revue les enjeux liés à l'approvisionnement local et international en passant par la quantité de sources d'approvisionnement à retenir. Puis, après s'être attardé aux décisions d'approvisionnement, on s'attardera plus particulièrement à la sélection des fournisseurs ainsi qu'aux critères qui influencent ce choix. Nous élaborerons également sur les méthodes aidant la prise de décision sur la sélection des fournisseurs. Par la suite, nous nous attarderons davantage à la gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement, comme elle influencera directement nos stratégies. En effet, lorsqu'une situation vient perturber l'approvisionnement, les organisations doivent rapidement adopter des stratégies d'urgence pour continuer à assurer leur approvisionnement. Ainsi, nous exposerons ici les différentes sources alternatives d'approvisionnement à notre disposition lorsque nous faisons face au risque.

## 1.1 Les stratégies d'approvisionnement

Pour s'armer face aux risques de la chaîne d'approvisionnement, les organisations se doivent de faire différents choix stratégiques. Parmi ces décisions primordiales, elles doivent choisir entre l'internalisation ou l'externalisation de leur production. Ensuite, elles choisiront aussi s'il est plus avantageux pour elles de s'approvisionner localement ou à l'international ou en adoptant la combinaison des deux. Puis, elles analyseront les différentes options qui s'offrent à elles et effectueront la sélection des fournisseurs. Avant de prendre la décision du choix des fournisseurs, reste à savoir avec combien de fournisseurs allons-nous décider d'entretenir une relation. En général, les approches les plus fréquentes consistent soit à négocier avec plusieurs fournisseurs en les mettant en

compétition les uns envers les autres, soit à développer un partenariat de long terme avec peu de fournisseurs, voir même un seul (Berger et al., 2004). Ainsi, le décideur doit donc prendre la décision optimale relative à son contexte.

### *1.1.1 L'approvisionnement simple (single sourcing)*

Dans ce cas, l'approvisionnement d'un produit donné se fait uniquement auprès d'un fournisseur spécifique. Bien entendu, le décideur a la possibilité de choisir parmi plusieurs compétiteurs, comparativement au cas de l'approvisionnement unique (sole sourcing) où, par défaut, l'acheteur peut uniquement s'approvisionner chez un seul fournisseur pour ce dont il a besoin (Hamdi et al., 2017).

L'approvisionnement simple permet bien entendu de réduire les coûts et comporte plusieurs avantages, dont une meilleure coopération et une relation plus forte entre les parties prenantes (Hamdi et al., 2017). C'est une stratégie utilisée notamment au Japon (Sarkar et al., 2013) pour certains types de produit. En effet, l'approvisionnement simple est pertinent dans un marché où l'on produit des items standards, dont la technologie est mature et où peu d'innovation est requise (Bensaou, 1999). Cette stratégie permet de garantir une qualité uniforme d'autant plus qu'elle permet de réduire les échanges d'information confidentielle et de faire des économies d'échelle (Hamdi et al., 2017). En effet, selon un sondage réalisé par Larson et Kulchitsky (1998), avoir un seul fournisseur permet une qualité supérieure à un coût total plus faible étant donné le contrôle que l'acheteur peut effectuer chez le fournisseur.

Cependant, la dépendance d'une firme à un seul fournisseur met celle-ci à risque en cas de perturbations de la chaîne d'approvisionnement (Yu, Zeng, et Zhao, 2009). Ainsi, en adoptant ce choix, l'organisation fait face au risque que le fournisseur ne soit pas en mesure de satisfaire ses besoins. De surcroit, l'organisation risque d'être contrainte à la capacité de production de ce fournisseur (Esmaeili-Njafabadi et al., 2019). Cette stratégie ne favorise pas la robustesse de la chaîne d'approvisionnent, mais la met plutôt à l'épreuve des intempéries (Dupont et al., 2018). Les entreprises optant pour une stratégie de production Juste-à-temps (JAT) vont souvent opter pour une relation de collaboration constante avec un seul fournisseur. Bien que l'approvisionnement simple comporte

quelques défis, cette stratégie permet tout de même une réduction des coûts de transactions ainsi qu'une collaboration plus étroite entre les acteurs.

### *1.1.2 L'approvisionnement double (dual sourcing)*

La minimisation des coûts représente un objectif central en logistique. Ce dernier est d'autant plus déterminant en matière d'approvisionnement. Au-delà de la minimisation des coûts, il devient de plus en plus important pour les organisations d'éliminer la dépendance pour réduire les pénuries. Lorsque le décideur choisit une stratégie d'approvisionnement double, il sélectionne deux fournisseurs, dont l'un des deux domine l'autre, car il a des avantages que l'autre n'a pas, soit au niveau du prix, de la qualité, de la fiabilité, etc. (Hamdi et al., 2018).

Dans le secteur automobile, cette pratique est plus utilisée, entre autres chez Nokia et Toyota (Alcalde et Dahm, 2019). Une enchère de Vickrey se cache derrière le processus dans cette stratégie : Compte tenu des besoins proposés par l'acheteur, les fournisseurs proposent leurs prix et ce sont les deux fournisseurs avec le prix le plus faible qui remportent le contrat. Ces deux fournisseurs sélectionnés se séparent donc les parts du contrat également ou selon les termes du contrat. Le prix établi correspond au prix proposé par le fournisseur offrant le 3e prix le plus faible, mais n'ayant pas été sélectionné (Alcalde et Dahm, 2019).

Avec cette stratégie, les entreprises sont en mesure de réduire les risques en matière d'approvisionnement. En effet, en diversifiant leurs sources, les entreprises sont moins enclines à faire face à des pénuries si des situations hors de leur contrôle venaient à perturber la production chez les fournisseurs. Comme les chaînes d'approvisionnement sont de plus en plus intégrées, les entreprises ont intérêt à diversifier leurs sources d'approvisionnement pour ne pas ralentir d'autres étapes en aval de leur production.

### *1.1.3 L'approvisionnement multiple (multi-sourcing)*

Dans cette stratégie, le décideur doit choisir les fournisseurs adéquats parmi un nombre important de fournisseurs existants sur le marché (Berger et al., 2004). C'est une stratégie plutôt occidentale comparativement à l'approvisionnement simple (Sarkar et al., 2013).

Cette stratégie est considérée comme supérieure bien entendu si l'acheteur en a le budget nécessaire. En donnant la tâche à plusieurs fournisseurs de satisfaire la demande, cette stratégie peut augmenter la fiabilité et atténuer l'incertitude. Puis, la compétition entre les fournisseurs est féroce lorsque ce type de stratégie est favorisée, ce qui peut mener à des prix plus avantageux pour l'acheteur (Berger et al., 2004). De plus, en choisissant d'avoir plus de deux fournisseurs, si un fournisseur n'est plus en mesure de satisfaire aux besoins de l'acheteur parce qu'il a subi une perturbation par exemple, un autre fournisseur viendrait contrebalancer le déficit de production du fournisseur perturbé pour que l'entreprise puisse continuer à fonctionner. Ainsi, comme la probabilité que tous les fournisseurs subissent une perturbation de leur production en même temps est faible, beaucoup d'entreprises préfèrent faire ce choix pour minimiser les risques (Berger et al., 2004). Pour que le risque soit minimisé, il faut notamment que les fournisseurs ne soient pas interreliés. Par exemple, si un fournisseur achète d'un autre fournisseur du même groupe, l'avantage de substituer un fournisseur pour contrebalancer le déficit de production de l'autre est compromis (Fan et al., 2022).

En outre, les coûts fixes associés à la sollicitation de plusieurs fournisseurs augmentent. En effet, le processus de négociation peut être long et coûteux, ce qui peut engendrer un impact sur les délais de production (Berger et al., 2004). Puis, en s'approvisionnant de sources multiples, les économies d'échelle tombent, comme on commande en moins grande quantité chez plusieurs fournisseurs (Hamdi et al., 2018). La complexité de la base d'approvisionnement pourrait aussi nuire à la performance de l'entreprise, d'autant plus que des enjeux de communication supplémentaires peuvent également survenir (Fan et al., 2022). En résumé, l'approvisionnement multiple permet de limiter les risques associés aux perturbations de la chaîne logistique, mais augmente les coûts de transaction et possiblement les délais.

### *1.1.4 L'approvisionnement local*

En logistique, la décision d'approvisionnement peut représenter un arbitrage entre l'approvisionnement local et l'approvisionnement international afin d'atteindre les objectifs stratégiques de l'entreprise (Schniederjans et al., 2005). À des fins de

compréhension, nous distinguons par approvisionnement local, un approvisionnement au Canada. En choisissant de s'approvisionner localement, une entreprise peut éviter beaucoup de risques liés entres autres aux délais de livraison incertains ainsi qu'à la qualité de la marchandise pouvant avoir été endommagée durant le voyage. De surcroit, lorsque la production s'effectue localement, les entreprises seront plus en mesure de réaliser des audits chez leurs fournisseurs. Elles seront donc plus en mesure de contrôler et de règlementer leur production. La proximité avec le fournisseur n'est pas négligeable, car elle engendre des délais de livraison notamment beaucoup plus courts qu'en s'approvisionnant à l'étranger. Les coûts de transport sont également minimisés en favorisant des relations avec des entreprises locales (Schniederjans et al., 2005).

Par contre, comme la production locale comprend des coûts de main d'œuvre nettement plus élevés que la production à l'étranger, le prix des matériaux ou des produits finis achetés localement risque d'être plus élevé Ainsi, l'approvisionnement local comporte bien entendu des économies de coûts en termes de transport, mais qui se traduisent par des coûts de main d'œuvre plus élevés.

### *1.1.5 L'approvisionnement international*

Dans un premier temps, la raison principale motivant les entreprises à s'approvisionner à travers le globe est sans doute la minimisation des coûts de production étant donné la main d'œuvre bon marché à l'international. On parle ici d'une réduction des coûts de production pouvant aller jusqu'à 40% en délocalisant notre production (Meisler, 2004 dans Schnierderjans 2005). C'est le principe même de l'avantage comparatif de Ricardo où chacun se spécialise dans la production du bien dans lequel il possède l'avantage comparatif (Goldsmith, 2003 dans Schnierderjans 2005). Ainsi, les entreprises locales gagnent de l'expertise de production à l'international et peuvent se concentrer dans des activités à plus haute valeur ajoutée. En effet, selon la théorie de la *smiling curve,* une entreprise a intérêt à se spécialiser dans les activités à forte valeur ajoutée, que sont l'innovation et le marketing et à délaisser les activités à faible valeur ajoutée, soit la fabrication (Li, 2020).

Pour ce faire, le secteur de l'approvisionnement devient de plus en plus important, comme les organisations délocalisent de plus en plus leur production vers l'étranger afin de se concentrer sur les activités à forte valeur ajoutée (Vonderembse, 1999). Par conséquent, les firmes dépendent de plus en plus de leurs fournisseurs pour le design et la fabrication de certaines composantes. Au fur et à mesure que la relation de confiance se crée, la performance de l'entreprise devient donc dépendante de la performance de ses fournisseurs, d'où l'importance d'investir dans des relations durables (Vonderembse, 1999). Dans plusieurs domaines, par exemple dans le domaine médical, les entreprises ont intérêt à s'approvisionner à l'international, car elles n'ont pas forcément toutes les matières premières disponibles à portée de main pour fabriquer du matériel médical. Pour conclure, en délocalisant complètement leur production à l'international, au-delà d'avoir accès aux matières premières, les entreprises profiteront de concert d'une main d'œuvre bon marché et donc de coûts de production plus faibles que dans nombre de pays occidentaux (Schnierderjans, 2005).

Ainsi, de nombreux choix doivent être effectués en matière d'approvisionnement. Ces différentes stratégies sont résumées dans le tableau 1.1. Tel que présenté ci-dessous, en s'approvisionnant localement, les firmes bénéficient de coûts de transactions moins élevés alors qu'en s'approvisionnant à l'étranger, elles sont gagnantes en termes de coûts de production. Une analyse du coût total doit donc être effectuée afin de relever ce qui est plus adéquat dépendamment du contexte et du secteur d'activité. En ce qui concerne les différentes stratégies, à partir du moment où la décision du nombre de fournisseurs est prise, rien n'empêche une entreprise de s'approvisionner à la fois localement et à l'international.

Tableau 1.1 Les avantages et inconvénients des stratégies d'approvisionnement

| | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| **Simple** | • réduction des coûts<br>• collaboration étroite<br>• économies d'échelle<br>• qualité uniforme | • dépendance à une source<br>• risque de pénurie |
| **Double** | • réduction des pénuries<br>• diversification des sources | • augmentation des coûts de transaction |
| **Multiple** | • diminution de l'incertitude<br>• diversification des sources<br>• augmentation de la fiabilité<br>• minimisation du risque de perturbation<br>• compétition féroce | • augmentation des coûts de transaction<br>• long processus de négociation |
| **Local** | • diminution des délais de livraison<br>• contrôle de la production<br>• qualité préservée<br>• proximité<br>• diminution des coûts de transport | • augmentation des coûts de production<br>• diminution des économies d'échelle |
| **International** | • diminution des coûts de production<br>• accessibilité aux matières premières<br>• capacité de production importante<br>• gain d'expertise internationale | • augmentation des délais de livraison<br>• augmentation des coûts de transport |

## 1.2. La sélection des fournisseurs

La sélection des fournisseurs est une décision stratégique de la planification logistique. Elle représente une décision complexe en soi, dotée d'un niveau de risque et d'une incertitude considérable, car il est notamment difficile de prévoir l'évolution des fournisseurs à travers le temps. De plus, les organisations se trouvent dans une position d'asymétrie d'information comme elles ne connaissent pas la situation financière d'un fournisseur, ni leur historique de performance, avant de s'associer à lui, ces informations n'étant généralement pas rendues publiques (Wu, 2009). La sélection des fournisseurs est susceptible de devoir être revisitée au fil du temps, entre autres, si de nouveaux fournisseurs attrayants font leur entrée sur le marché. Advenant ce cas, les entreprises doivent comparer d'une part, le coût de maintenir leur fournisseur actuel au coût de choisir le nouveau fournisseur en tenant compte du coût de renonciation de bâtir une nouvelle

relation (Hosseininasab et Ahmadi, 2015). La sélection des fournisseurs est une décision primordiale, car elle a un impact direct sur le coût total des achats, ce qui correspond à un pourcentage important lorsqu'on considère le prix d'un produit final (Pazhani et al., 2016).

Au fil du temps, les fournisseurs devinrent de plus en plus impliqués dans la prise de décision en s'intéressant davantage aux préférences des consommateurs, ce qui leur a permis de mieux s'adapter aux besoins des firmes (Vonderembse, 1999). Cette idée d'implication des fournisseurs (*supplier involvement)* est caractérisée par une tendance à inclure les fournisseurs dans le processus décisionnel de l'organisation et d'établir une relation de coopération avec eux pour être en mesure de satisfaire le consommateur final et d'avoir une chaîne d'approvisionnement plus agile (Vonderembse, 1999). Au regard de la littérature, il est préférable pour les entreprises de développer des relations de long terme avec leurs fournisseurs, car elles bénéficieront de ces liens durables au fil du temps (Kalwani et Narayandas, 1995). Aujourd'hui, les entreprises cherchent d'autant plus à bâtir des relations solides avec leurs fournisseurs et misent davantage sur le partenariat et la coopération, ce qui explique la croissance des fusions et des acquisitions à travers les années (Aguezzoul et al., 2009).

Enfin, le processus de la décision se divise en deux étapes. D'abord, s'effectue une préqualification de fournisseurs potentiels, puis suit la sélection finale parmi ceux présélectionnés (Meena et Sarmah, 2016). Ainsi, comme les entreprises favorisent des relations durables et étroites avec leurs fournisseurs, elles doivent être en mesure d'évaluer toutes leurs options à l'aide de certains critères pour pouvoir départager les différents fournisseurs.

Comme la sélection des fournisseurs représente une décision stratégique, elle doit être analysée avec beaucoup de rigueur d'autant plus qu'elle influencera directement la performance d'une firme (Aguezzoul et al., 2009). Pour ce faire, les organisations utilisent et mesurent des critères afin de les aider dans le processus décisionnel.

La littérature sur le sujet remonte aux années 1960 alors que Dickson (1966) s'intéressa aux critères pris en compte dans la sélection des fournisseurs en réalisant une étude auprès

d'entreprises canadiennes. Ce pionnier du sujet a relevé 23 critères déterminants dans le choix des fournisseurs. Dickson a pu conclure dans son étude que la sélection des fournisseurs est, déjà dans les années 1960, une décision multicritère. Il faut donc faire des compromis et hiérarchiser les critères étant donné qu'un fournisseur est rarement performant à tous les niveaux, là où l'un excelle au niveau de la qualité, l'autre aura un délai de livraison plus court. (Aguezzoul et al., 2009).

Bien que les décisions logistiques soient en constante évolution, Weber et al. (1991) ont démontré dans les années 1990 que les critères relevés par Dickson restent, trente ans plus tard, décisifs dans la sélection des fournisseurs en analysant près d'une centaine d'articles sur le sujet publiés successivement aux travaux de Dickson. Weber et Dickson ont tous deux présenté une classification des critères selon leur niveau d'importance. Selon l'étude réalisée par Dickson (1966), le critère définitif est la qualité, suivi de la livraison et de la performance antérieure du fournisseur tandis que les travaux de Weber ont relevé que ce sont plutôt le prix, la livraison et la qualité dans cet ordre qui se sont montrés déterminants (Aguezzoul et al., 2009).

Bien entendu, le contexte historique a son rôle à jouer dans le choix des critères. En effet, dans l'étude de Dickson, la localisation géographique n'était pas considérée comme déterminante, alors que les recherches de Weber, qui s'inscrivent dans le contexte de JAT, y accordent une attention particulière. L'étude de Vonderembse et al. (1995) s'inscrivant toujours dans une perspective de JAT a démontré que les critères significatifs dans la sélection des fournisseurs sont la performance et la qualité du produit et que ces critères restent déterminants uniquement dans un contexte de JAT (Aguezzoul et al., 2009).

À l'orée du 21$^{e}$ siècle, selon un sondage réalisé par Vonderembse et al. (1995), les organisations participantes utilisaient principalement, la qualité du produit, la disponibilité du produit, la fiabilité des délais de la livraison et la performance du produit comme critères d'évaluation des fournisseurs (Vonderembse, 1999). Les travaux de Weber et al., (1991) ont relevé selon les proportions suivantes que les critères prix (80%), livraison (59%), et qualité (54%), sont les critères les plus étudiés dans la littérature et donc ceux qui restent majoritairement définitifs dans la prise de décision (Aguezzoul et

al., 2009). De plus, la qualité est primordiale dans le choix des fournisseurs, car elle se doit d'être adéquate et uniforme pour satisfaire aux attentes des consommateurs (Hosseininasab et Ahmadi, 2015). Ensuite, les délais de livraison sont également considérables dans le choix des fournisseurs dépendamment des besoins de l'acheteur. Enfin, le prix représente un autre facteur primordial dans la décision étant donné la constante préoccupation qu'ont les firmes de minimiser leurs coûts.

Au-delà de ces facteurs clés, plusieurs autres critères propres à chaque acteur sont aussi considérables. Entre autres, la stabilité du fournisseur, se traduisant généralement par une relation de long terme, représente une décision clé, car un fournisseur stable est constamment en mesure de répondre aux besoins de l'acheteur alors qu'un fournisseur instable fluctue en termes de service à travers le temps et n'est donc pas fiable face à son acheteur (Hosseininasab et Ahmadi, 2015). Le risque doit de plus en plus être pris en compte dans la prise de décision et peut être mesuré par la probabilité que le fournisseur n'arrive pas à répondre aux besoins de l'acheteur.

Enfin, la décision stratégique du choix des fournisseurs est propre à chaque situation. En effet, ce sont les caractéristiques de l'acheteur qui déterminent les critères d'évaluation des fournisseurs. Par ailleurs, la capacité d'adaptation d'un fournisseur est devenue en soi un critère de décision. Ces critères sont donc revisités et propices à chaque acheteur dépendamment de leurs besoins (Hosseininasab et Ahmadi, 2015). En définitive, un nombre conséquent de critères, autant quantitatifs que qualitatifs, doivent être pris en compte dans le processus décisionnel, d'où la complexité de la décision (Wu, 2009).

## 1.3 La gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement

Malgré l'abondance de la littérature sur la sélection des fournisseurs, celle sur la sélection des fournisseurs en tenant compte du risque ou des perturbations dans la chaîne d'approvisionnement reste limitée, d'où l'intérêt d'approfondir davantage sur le sujet. Depuis le mouvement vers l'externalisation des chaînes d'approvisionnement, les décideurs ont commencé à accorder plus d'importance aux risques pouvant perturber l'ensemble de leurs activités (Mavi et al., 2016).

La gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement (GRCA) ou *supply chain risk management (SCRM)* peut être définie comme : « l'identification et la gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement à travers une approche coordonnée par les acteurs de la chaîne pour réduire les vulnérabilités dans une perspective d'ensemble (Mavi et al., 2016). » La GRCA représente également le développement et l'implémentation de stratégies par les acteurs de l'ensemble de la chaîne pour gérer tout type de risque avec pour objectif commun de réduire les vulnérabilités et de favoriser la profitabilité (Nooraie et Mellat Parast, 2015 dans Mavi et al., 2016). La majorité des chercheurs s'entendent pour résumer cinq étapes consécutives au processus de la GRCA, soit l'identification, l'évaluation, l'analyse, le traitement et le monitoring (Mavi et al., 2016).

Plusieurs types de risques présentés à la Figure 1.1 doivent être pris en compte dans la prise de décision selon le contexte. Les risques peuvent avoir différentes échelles. Ils peuvent être internes et donc surgir au sein même de l'organisation. (Juttner et al. 2003 dans Dupont et al., 2018). À ce niveau, ils touchent l'offre, la demande et les *trade credit risks* (Goh et al., 2007 dans Mavi et al., 2016) Ils peuvent également provenir d'une organisation hors de l'entreprise mère, mais tout de même se situer à l'intérieur de sa chaîne d'approvisionnement. On nomme ce type de risque les risques de chaîne d'approvisionnement. Ho et al. (2015) définissent les risques de la chaîne d'approvisionnement par « la probabilité et l'impact d'événements au niveau macro et/ou micro qui influencent négativement toute partie de la chaîne d'approvisionnement, entraînant des défaillances au niveau opérationnel, tactique ou stratégique ». Le risque le plus étudié dans la chaîne d'approvisionnement est celui en lien avec la sélection des fournisseurs, par exemple, le risque de faire face à des délais de livraison importants, une

mauvaise qualité ou une capacité de production incertaine. Les facteurs de risque dans la chaîne d'approvisionnement ont été rassemblés en cinq catégories. Nous retrouvons d'abord des facteurs macros, soit des risques externes qui prennent naissance à l'extérieur de la chaîne, soit dans l'environnement. L'instabilité économique ou politique des catastrophes naturelles, du terrorisme et des accidents sont considérés comme des facteurs de risque macros (Goh et al., 2007 dans Mavi et al., 2016). Ensuite, se retrouvent les risques relatifs à la demande, soit des variations ou des incertitudes de la demande et des erreurs de prévision. Puis, les facteurs de risque dans la chaîne d'approvisionnement comprennent les risques de fabrication qui peuvent découler de grèves ou d'accidents de travail, d'enjeux techniques ou de flexibilité. Les risques relatifs à l'offre sont aussi catégorisés comme des risques dans la chaîne d'approvisionnement et sont liés aux relations avec les fournisseurs et incluent la dépendance à un fournisseur et les enjeux d'approvisionnement simple. Enfin, nous trouvons les risques d'infrastructure, notamment un manque au niveau d'infrastructures de transport et d'information. Une organisation peut possiblement faire face aux cinq types de risques relevés. Comme il existe des interdépendances entre les différents types de risques, les étudier conjointement permettra une meilleure gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement (Ho et al. 2015). Les risques peuvent également être conséquents à plusieurs types d'évènements. Ils peuvent être uniques et donc affecter un seul fournisseur. Parmi les risques touchant indépendamment les fournisseurs, on parle de problèmes de qualité, d'équipement, de grèves de travail locales, de faillites, de la volatilité de la demande, de rabais sur la quantité, de fluctuations de prix, etc. A priori, ce sont des risques qui ont de fortes chances de se produire, mais dont les conséquences ne sont pas dramatiques. En second lieu, certains risques sont semi-super et donc affectent plusieurs fournisseurs qui sont, en général, localisés au même endroit. On compte entre autres parmi ces risques les désastres naturels, soit les tremblements de terre, les feux, les inondations, et les ouragans. Enfin, certains risques peuvent être supers et donc affecter tous les fournisseurs simultanément. On parle ici de crises économiques, d'attaques terroristes, de larges grèves du travail, de pandémie, d'instabilités autant politiques qu'économiques. Même si la probabilité de ces

désastres est faible, les conséquences pour l'ensemble de la société en sont très graves. (Hamdi et al., 2018).

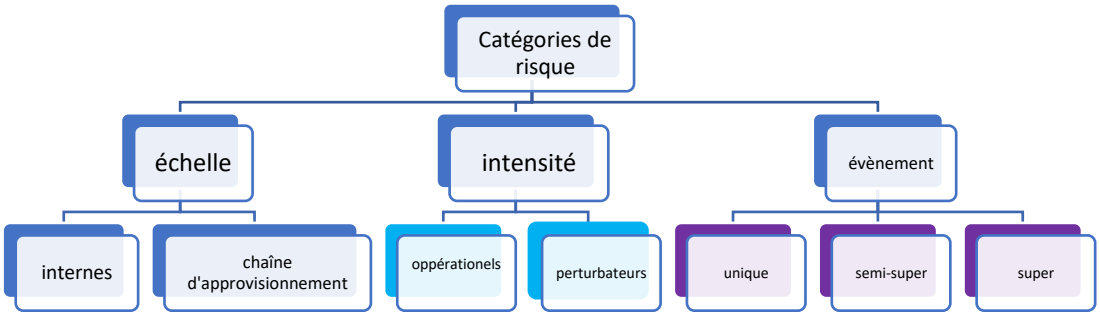



*Figure 1.1 Les types de risques dans la chaîne d'approvisionnement*

Source : Adapté de Dupont et al., (2018), Mavi et al., (2016), Ho et al., (2015) et Hamdi et al., (2018)

Pour finir, les risques peuvent également avoir différents niveaux d'intensité. Ils peuvent être opérationnels, c'est-à-dire qu'ils sont récurrents, voir même hebdomadaires. Ils ont donc une forte probabilité d'occurrence, mais les conséquences sont tolérables. Par exemple, l'incertitude de la demande, les problèmes d'équipement, les problèmes de qualité et les délais de livraison sont considérés comme des risques opérationnels (Dupont et al. 2018). Puis, ils peuvent être perturbateurs (*disruption risks*) et donc avoir un impact destructeur sur l'ensemble des organisations. Ce sont des risques dont la probabilité d'occurrence est faible, mais dont les impacts perturbent complètement les activités de la chaîne logistique. Les perturbations ont un impact sur l'ensemble de la chaîne de valeur alors qu'elles interrompent fréquemment le flux de production pour une période inconnue (Esmaeili-najafabadi et al., 2019). On y inclut entre autres, les catastrophes naturelles, les grèves, la faillite d'un fournisseur, les guerres et le terrorisme (Dupont et al. 2018).

Comme nous le constatons, certaines situations peuvent appartenir à plusieurs catégories à la fois, si on considère notre cas, la pandémie s'inscrit dans les risques de perturbation et peut affecter plusieurs voir même tous les fournisseurs au même moment. Elle présente

également un risque externe, car elle prend naissance à l'extérieur de la chaîne d'approvisionnement. À des fins d'analyse, nous nous intéresserons principalement au risque de perturbation dans ce mémoire étant donné qu'il y a encore beaucoup à dire sur le sujet. En effet, malgré l'abondance de la littérature sur les problèmes de sélection des fournisseurs, peu d'auteurs ont accordé une importance particulière aux risques de perturbations dans leur analyse (Dupont et al., 2018). La capacité pour les entreprises de répondre et de s'armer face aux risques représente un avantage majeur par rapport à ses compétiteurs et diminue les dommages sur le long-terme auxquels elle pourrait faire face si elle ne s'était pas intéressée au risque dans la prise de décision. (Mavi et al., 2016).

### *1.3.1 La sélection des fournisseurs*

Dans un contexte de sélection des fournisseurs où le facteur de risque est pris en considération, les critères définitifs les plus souvent retenus sont la qualité, le coût et la fiabilité (Hamdi et al. 2018). Il existe donc un arbitrage central au choix des fournisseurs en contexte de gestion de risque. D'un côté, lorsqu'on augmente le nombre de fournisseurs, le coût augmente, car on doit négocier des contrats avec plusieurs fournisseurs et on profite moins de rabais sur quantité. De l'autre côté, si on a uniquement un fournisseur et qu'un évènement perturbe les activités de ce fournisseur, les coûts associés à cette perturbation vont également augmenter (Sarkar et al., 2013). Il est donc primordial que les entreprises soient outillées pour faire le bon choix, car une perturbation de la chaîne peut engendrer des coûts importants liés à l'arrêt de production chez les fournisseurs, à la faible qualité et à l'inefficience (Sarkar et al., 2013). Lorsqu'il y a perturbation, en résulte la non-disponibilité des ressources nécessaires pour une certaine période. Advenant le cas où même les fournisseurs de matières premières sont touchés par la perturbation, il peut s'en suivre un gel complet de la production. Les fournisseurs doivent donc prendre des mesures d'urgence pour arriver à satisfaire la demande des acheteurs.

### *1.3.2 L'allocation de la demande*

Au-delà du choix du nombre de fournisseurs et de ces derniers en tant que tel, l'étape suivante consiste en l'allocation de la demande entre ces fournisseurs en se basant sur les

informations de chacun d'eux sur le coût, les rabais, et la capacité maximale (Meena et Sarmah, 2016). L'allocation de la demande entre ces fournisseurs est d'autant plus intéressante lorsque le risque existe et que des incertitudes sur les délais de livraison sont présentes comme dans notre situation actuelle. En effet, comme on l'a vu précédemment, les firmes accordent de l'importance à bâtir des relations de long terme avec leurs fournisseurs considérant les avantages que de telles relations proposent. Ce facteur complexifie encore une fois la décision, car il suppose que les firmes doivent allouer une quantité minimale à chacun de leurs fournisseurs pour maintenir des relations, par exemple en leur attribuant à chacun un pourcentage de la demande.

En ce qui concerne les rabais sur quantité, c'est une pratique courante auprès des fournisseurs afin d'encourager les firmes à acheter en plus grande quantité. Burke et al., (2008) ont d'ailleurs montré que l'allocation de la demande est grandement influencée par la stratégie de rabais sur quantité. Par conséquent, la prise en compte des rabais sur quantité devient également un facteur dans la prise de décision et influence la sélection du nombre de fournisseurs optimal ainsi que l'allocation de la demande totale parmi les fournisseurs tout en minimisant les coûts. En bref, les décisions d'allocation de la demande et de sélection des fournisseurs sont des décisions qui ne peuvent se prendre l'une sans l'autre. Pour ce faire, identifier les facteurs qui influencent l'allocation de la demande peut nous permettre de choisir les fournisseurs les plus adéquats selon le contexte.

### *1.3.3 Les stratégies d'approvisionnement*

Dans la littérature, il existe plusieurs stratégies pour limiter les risques de perturbation sur lesquelles la gestion de risque dans la chaîne d'approvisionnement se penche. D'abord, la recherche de sources alternatives d'approvisionnement s'est avérée une stratégie efficace pour minimiser les risques. Parmi ces sources alternatives, il peut s'agir, par exemple, d'un fournisseur alternatif, soit un fournisseur avec lequel nous n'avons pas de partenariat ou de contrat existant ou d'une réserve comportant des stocks disponibles (Chen, Wang, et Wu, 2021). L'utilisation du fournisseur alternatif amène plusieurs débats en soi. Yin et Whang (2018) ont relevé trois manières de coopérer avec un fournisseur alternatif. La

première consiste à adopter une stratégie d'achat anticipée auprès de ce fournisseur alternatif avant même que la perturbation ne se produise. La seconde stratégie consiste à assurer chez un fournisseur une certaine quantité de stock en prévision d'une intempérie. Ainsi, si une perturbation surgit, cette quantité pourrait servir à limiter les effets de la perturbation (Yin et Wang, 2018). Nous référons également cette stratégie à des stocks de pré-positionnement qui peuvent être utilisés afin de limiter les ampleurs d'une perturbation (Esmaeili-Najafabadi et al., 2019). Enfin, la dernière option consiste à faire appel au fournisseur après l'occurrence de la perturbation. Cette stratégie est plutôt adoptée dans une logique de réaction face à une perturbation, et sera détaillée davantage dans la section suivante. Les chercheurs ont pu démontrer qu'une stratégie d'achat anticipé devrait être utilisée lorsque le risque de perturbation est élevé tandis que lorsque celui-ci est faible, on devrait plutôt attendre que la perturbation se produise avant de solliciter un fournisseur alternatif (Yin et Wang, 2018).

En outre, certaines compagnies choisissent également de protéger leurs fournisseurs, soit en les fortifiant par rapport aux perturbations (Esmaeili-najafabadi et al., 2019). En effet, la gestion de risque dans la chaîne d'approvisionnement propose entre autres d'assurer une augmentation de la production chez les fournisseurs existants de manière à prévenir une augmentation potentielle de la demande. L'acheteur garantira donc au fournisseur d'augmenter ses volumes d'achats si ce dernier lui assure avec certitude qu'un surplus de production lui sera disponible si nécessaire. En investissant dans le développement de nos fournisseurs réguliers, on assure donc une allocation prioritaire du surplus de production en cas de perturbation. En travaillant en collaboration avec nos fournisseurs, la transparence est favorisée et nous risquons plus facilement d'avoir une visibilité sur les stocks directement chez le manufacturier, ce qui nous permettra de planifier en conséquence notre réapprovisionnement. Investir dans la gestion de stock, soit en recrutant du personnel qualifié ou en se munissant d'un logiciel automatisé, est également une stratégie favorable à la gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement. De plus, afin d'assurer une planification adéquate, la surveillance des produits critiques est également effectuée dans le but d'identifier des perturbations potentielles (Fache, 2020).

En dernier lieu, une stratégie de réserve peut également permettre de s'armer face à une éventuelle perturbation. Au Canada, cette stratégie remonte à l'époque de la Guerre froide, où l'objectif était d'emmagasiner des fournitures en prévision d'une guerre nucléaire (Laing et Westervelt, 2020). Aujourd'hui, les réserves sont plutôt utilisées en réponse à des catastrophes humanitaires. Dans les faits, la majorité des désastres sont stochastiques, il est donc impossible d'anticiper l'ampleur des dégâts, ce qui amène les organisations à être plutôt réactives que proactives (Hu et Dong, 2019). De toute évidence, une réserve physique de fournitures nécessite des investissements financiers importants, d'autant plus qu'on immobilise énormément d'argent dans les stocks (Laing et Westervelt, 2020). Ainsi, compte tenu des coûts élevés d'entreposage, les organisations ont plutôt tendance à se procurer les biens nécessaires à la suite de l'évènement survenu, d'où l'importance d'avoir des relations durables avec les fournisseurs afin d'assurer la disponibilité et la vitesse de livraison nécessaire à la réaction de crise (Hu et Dong, 2019). En parallèle, si les produits entreposés dans la réserve sont périssables, il est possible qu'ils atteignent leur date de péremption avant même qu'on ait besoin de les utiliser, ce qui cause des pertes considérables (Laing et Westervelt, 2020). Ainsi, pour qu'une réserve soit utile et qu'elle permette réellement d'éliminer une perturbation, il faut que des ressources supplémentaires soient allouées à la gestion efficace de cette dernière (Fache, 2020).

Bien entendu, les stratégies exposées plus haut amènent des investissements importants en matière d'approvisionnement stratégique, mais permettent d'éliminer au maximum les risques de perturbations (Fache, 2020). Pour cette raison, d'autres organisations choisissent plutôt l'acceptance, c'est-à-dire qu'ils considèrent que le coût de se protéger face au risque est supérieur au coût relatif à une potentielle perturbation, donc ils décident volontairement de ne pas avoir de stratégie pour prévenir les perturbations (Esmaeili-najafabadi et al., 2019).

### *1.3.4 Les stratégies d'approvisionnement dans le contexte de la crise sanitaire de COVID-19*

La gestion du risque dans la chaîne d'approvisionnement repose sur une logique d'anticipation des possibles facteurs pouvant fragiliser la chaîne afin d'adopter des stratégies conséquentes à ces menaces. Toutefois, qu'en est-il du cas où il suffit plutôt de réagir à une menace, par exemple, celle de la pandémie, qui s'est produite soudainement sans que nous n'ayons pu la neutraliser à l'avance? Ici, nous cherchons à présenter la littérature disponible sur les stratégies d'approvisionnement ayant été utilisées par les organisations au cours de la crise ainsi que les pistes de solution sur le sujet. Les écrits sur la gestion de risque dans la chaîne d'approvisionnement post pandémie restent très limités étant donné la récence des évènements, mais nous permettent déjà d'illustrer une certaine prise de conscience pouvant provoquer une réforme sur le sujet.

Historiquement, le secteur de la santé a toujours été conditionné à s'approvisionner à moindre coût étant donné les fortes pressions budgétaires dans ce secteur. James Fache (2020) de la chaire de d'approvisionnement de la clinique Mayo au Minnesota a d'ailleurs relevé que le prix et la performance du produit restaient les facteurs déterminants dans la sélection de fournisseurs dans le secteur de la santé. Avec les conclusions tirées de la pandémie de COVID-19, ces critères changent considérablement alors qu'on accorde nettement plus d'importance à la fiabilité du fournisseur quitte à ce que le prix augmente, mais que ce fournisseur puisse nous garantir un approvisionnement constant (Fache, 2020). Gereffi (2020) a proposé quelques solutions post-pandémie, dont la nécessité d'investir dans les capacités de production locales, et l'expansion des sources d'approvisionnement à l'étranger dans de nouvelles régions géographiques pour limiter la dépendance.

En ce qui a trait à l'approvisionnement local, Fache (2020) fait également référence au développement de production locale dans le secteur de la santé durant la pandémie pour répondre aux besoins des établissements hospitaliers. Les chercheurs s'entendent pour avancer que les fournisseurs locaux garderont possiblement quelques parts de marché, si les autorités en place leur garantissent des contrats sur le long terme, mais ultimement, il

est prévisible que l'approvisionnement à l'international reprenne majoritairement le dessus, tout en sachant parfaitement que les fournisseurs étrangers referont probablement face au virus (Fache, 2020). Quant à Chen, Wang et Wu (2021), ils ont soulevé plusieurs critères qui ont été pris en compte dans l'urgence et d'autres qui doivent continuer d'être mis de l'avant dans la sélection des fournisseurs alternatifs. Parmi ces facteurs, ils ont mentionné la qualité du produit, le prix, la réputation de l'entreprise, le délai de livraison, mais aussi de nouveaux facteurs, dont la performance durant la pandémie et la gravité de la pandémie chez le fournisseur.

La diversification des sources d'approvisionnement est définitivement revenue à plusieurs reprises dans les écrits suivant les premières vagues de la crise. Shah et al. (2022) soulignent que cette diversification est nécessaire pour assurer un approvisionnement sans interruption. En bref, la littérature post-pandémie propose un nouveau regard sur le sujet qui nécessite d'être pris en compte par les autorités en place afin de continuer à prévenir le risque dans les chaînes d'approvisionnement.

## 1.4 Les méthodes de sélection des fournisseurs

Au fil du temps, plusieurs méthodes ont été développées afin de faciliter la prise de décision quant à la sélection des fournisseurs dans un contexte de gestion du risque. Historiquement, on considérait plutôt une méthode statique de sélection des fournisseurs, sans tenir compte de l'évolution du fournisseur à travers le temps, alors qu'aujourd'hui on utilise des méthodes beaucoup plus dynamiques (Hosseininasab et Ahmadi, 2015). Bien entendu, le processus décisionnel de la sélection des fournisseurs diffère si l'on omet le facteur de risque dans la prise de décision. Dans notre cas, la prise en compte du risque est primordiale d'autant plus qu'elle influencera les différents critères de sélection des fournisseurs. Étant donné notre contexte de crise sanitaire, nous nous concentrons donc uniquement sur les écrits considérant le risque dans la sélection des fournisseurs. L'abondance de la littérature existante sur la sélection des fournisseurs hormis le risque par rapport à celle considérant le risque nous a également poussé à nous y attarder davantage afin d'y apporter une contribution. Le tableau 1.2 ci-bas présente un résumé des différentes méthodes trouvées et propose des articles en lien avec chaque méthode.

Tableau 1.2 Les méthodes de sélection des fournisseurs dans un contexte de risque

| Méthode | Définition et Principe | Avantages | Inconvénients | Articles |
|---|---|---|---|---|
| AHP (*Analytic Hierarchy Process)* | Classification des critères de manière hiérarchique pour trouver la solution optimale | Réduit le processus d'évaluation des risques | Difficulté d'introduire des contraintes | Wu et al., (2006) |
| ANP (*Analytic Network Process)* | Représentation hiérarchique en reliant les éléments du même niveau par des *clusters* et des nœuds | Version améliorée de l'AHP qui tient compte de l'interdépendance entre les critères | Difficulté d'introduire des contraintes | Nekooie et al., (2015)<br>Ali et al., (2015) |
| Arbre de décision | Analyse d'un diagramme en tenant compte de différentes options et critères confictuels | Présentation d'une vue d'ensemble des retombées de chaque décision | Incertitude | Berger et al., (2004)<br>Ruiz-Torres et Mahmoodi,(2007)<br>Sarkar et Mohapatra, (2009)<br>Sarkar et al., (2013) |
| Programmation linéaire | Modélisation mathématique d'un problème en maximisant ou minimisant la fonction-objectif à l'aide de variables et contraintes établies | Efficacité | Résolution de problèmes linéaires uniquement | Chen et al., (2012)<br>Bohner & Minner, (2017) |
| Programmation non linéaire | Modélisation mathématique incluant une fonction non-linéaire dans la fonction objectif ou dans une ou plusieurs contraintes | Résolution de problème non linéaire | Complexité | Esmaeili-najafabadi et al., (2019)<br>Davarzani et al., (2011)<br>P L Meena et Sarmah, 2013 |
| Programmation multi objectif | Méthode multi-objectifs qui permet d'assigner à chaque objectif un niveau cible et une priorité relative à la réalisation de cet objectif | Prise en compte de plusieurs objectifs contradictoires | Complexité | Ravindran et al., (2010)<br>Bilsel & Ravindran, (2011) |
| Heuristiques | Méthode de résolution de problème développant une alternative à la solution optimale | Rapidité d'exécution<br>Simplicité<br>Proposition d'une solution qui se rapproche de la solution optimale | Niveau d'expertise élevé | Meena et al., (2011) |
| Modélisation analytique | Méthode de résolution à l'aide de fonctions mathématiques | Proposition d'une solution optimale | Niveau d'expertise élevé | Meena et Sarmah, (2016) |
| Technique de préférence de commande par similarité à la solution idéale (TOPSIS) | Méthode mesurant les distances euclidiennes où l'alternative choisie a la distance la plus courte par rapport à la solution optimale et la plus longue par rapport à la pire alternative | Proposition d'une solution qui se rapproche de la solution optimale | Incertitude non représentée | Mavi et al. (2016) |
| Théorie des jeux | Déterminer les actions que les joueurs doivent prendre pour gagner la partie | Prise en compte de tous les acteurs dans la prise de décision | Incertitude | Xiao et al., (2010) |
| Simulation | Imitation d'un système ou d'un processus de la réalité | Prise en compte de changements temporels dans la prise de décision | Maitrîse d'un logiciel de simulation | Kabadayi et Dehghanimohammadabadi, (2022)<br>Ivanov, (2020) |

### *1.4.1 L'AHP (Analytic Hierarchy Process)*

Les travaux de Wu et al. (2006) ont représenté la méthode de hiérarchie multicritère ou *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dont le principe est de classer les critères de sélection des fournisseurs de manière hiérarchique en gardant pour objectif de sélectionner la meilleure alternative. Ils ont démontré qu'en utilisant l'AHP, les organisations peuvent réduire le processus d'évaluation des risques (Wu, Blackhurst et Chidambaram, 2006). Néanmoins, le risque lorsqu'on utilise ce type de technique est l'usage du jugement humain dans l'établissement de l'importance relative aux différents critères ce qui peut être contrôlé dans la mesure où l'AHP est supportée par une méthode d'analyse connexe. Il est également difficile de tenir compte de certaines contraintes dans le modèle.

### *1.4.2 L'ANP (Analytic Network Process)*

De l'AHP est né l'ANP, soit l'*Analytic network process* consistant en une version améliorée de l'AHP. L'ANP reconnait que plusieurs problèmes ne peuvent être représentés hiérarchiquement comme ils comportent des interactions et de la dépendance

entre différents niveaux de la hiérarchie. Par conséquent, l'ANP permet des relations entre les différents niveaux (Görener, 2012). Pour tenir compte des facteurs de risque qualitatifs, Ali et al. (2015) utilisent l'ANP dans le but de considérer l'interdépendance entre les critères à laquelle ils combinent un modèle mathématique pour également tenir compte des facteurs de risque plutôt quantitatifs. Ils cherchent à identifier une priorité des risques dépendamment des fournisseurs (Nekooie et al., 2015).

### *1.4.3 L'arbre de décision*

Ensuite, l'arbre de décision consiste en l'analyse d'un diagramme qui peut aider le décideur à prendre ses décisions en tenant compte de différentes contraintes et critères conflictuels et de représenter la réalité de manière simplifiée. Cette méthode nous présente une vue d'ensemble des retombées de chaque décision (Berger et al., 2004). Le travail de Berger et al. (2004) est primordial dans la littérature sur la gestion de risque avec des arbres de décision. Les auteurs avaient pour objectif de déterminer le nombre optimal de fournisseurs minimisant le coût total en tenant compte du risque. Ils ont posé un arbitrage important entre le risque et le coût. D'un côté de l'arbitrage est considéré les coûts d'opération de travailler avec plusieurs fournisseurs, de l'autre, la perte financière engendrée si les fournisseurs sont perturbés. Les chercheurs ont donc introduit la notion de ratio critique pour résoudre cet arbitrage (Berger et al., 2004).

Ruiz-Torres et Mahmoodi (2007), Sarkar et Mohapatra (2009) ainsi que Sarkar, Mohapatra, et Chaudhary 2013 ont apporté des extensions au modèle pionnier de Berger et al. (2004). Ruiz-Torres et Mahmoodi (2007) ont surpassé les hypothèses de Berger et al. (2004) en introduisant une nouvelle hypothèse pour tenir compte des évènements semi-super pouvant affecter plusieurs fournisseurs, mais pas tous les fournisseurs au même moment. Par conséquent, si un fournisseur est perturbé, les autres fournisseurs n'ayant pas subi cette perturbation peuvent rattraper la production du fournisseur perturbé et ce sans coût additionnel, la perte étant maintenant répartie à travers la chaîne (Ruiz-Torres et Mahmoodi, 2007). En résumé, ils ont montré qu'un fournisseur unique est l'approche la moins coûteuse quand des fournisseurs extrêmement fiables sont disponibles et que le nombre de fournisseurs augmente à mesure que la probabilité de perturbation augmente (Meena, Sarmah, et Sarkar, 2011).

Sarkar et Mohapatra (2009) ont quant à eux posé l'hypothèse que les évènements semi-super sont relatifs à la localisation où tous les fournisseurs d'une même région géographique sont affectés, mais pas ceux d'une autre région. Par conséquent, ils démontrent, toujours à l'aide d'un arbre de décision, que la sélection des fournisseurs de différentes régions géographiques est une meilleure stratégie que la sélection des fournisseurs dans une même région géographique (Meena, Sarmah, et Sarkar, 2011).

Pour ce qui est de (Sarkar, Mohapatra, et Chaudhary 2013), ils ont considéré les trois types d'évènements, soit unique, semi-super et super et ont attribué des probabilités différentes à plusieurs scénarios possibles. Dans cet article, les auteurs se sont intéressés à une machine dont la production est perturbée uniquement si une partie critique et non remplaçable de celle-ci est manquante suite à une perturbation du fournisseur de cette composante critique. Ils ont donc dérivé le coût total de cette perturbation et considéré les différents impacts sur la production. Enfin, ils ont utilisé l'analyse mathématique pour réduire le nombre d'alternatives à considérer dans leur arbre de décision (Sarkar, Mohapatra, et Chaudhary 2013).

### *1.4.4 La programmation linéaire*

D'une part, la programmation mathématique est encore aujourd'hui utilisée pour réaliser cette importante tâche du choix des fournisseurs ainsi que de l'allocation de la demande entre les fournisseurs sélectionnés. En effet, en établissant des variables distinctes et des critères propres à chaque contexte, les modèles mathématiques nous permettent généralement de trouver la solution optimale (Boer, Labro et Morlacchi, 2001). Un modèle est défini dans le but de déterminer les décisions qui permettent de maximiser ou de minimiser une fonction-objectif en considérant un certain nombre de contraintes et d'hypothèses.

(Chen, Zhao, et Zhou, 2012) ont développé un modèle de programmation linéaire pour représenter un système de réapprovisionnement périodique avec un fournisseur ainsi qu'un fournisseur alternatif uniquement disponible dans le cas d'une perturbation. Bien entendu, le fournisseur alternatif comporte des coûts plus élevés par rapport au fournisseur régulier et a une capacité de réapprovisionnement limitée, comme il est uniquement

sollicité lorsque le fournisseur traditionnel n'est pas en mesure de satisfaire la demande. Durant une période de perturbation, les auteurs ont démontré que la capacité de production du fournisseur alternatif doit uniquement satisfaire la demande maximale et qu'il devient de moins en moins nécessaire à mesure que les coûts relatifs à opérer ce fournisseur augmentent (Chen, Zhao, et Zhou, 2012).

Bohner et Minner (2017) ont quant à eux utilisé la programmation linéaire mixte à nombres entiers dont le modèle cherche à trouver la combinaison de sélection de fournisseurs ainsi que l'allocation de la demande entre ceux-ci qui minimise les coûts d'opération, d'approvisionnement et de pénurie. Par conséquent, les résultats du modèle ont permis de conclure qu'un nombre minimal de fournisseurs augmente les économies d'échelle, mais augmente le risque de perturbation. Puis, à mesure que le risque s'accentue, le décideur réalloue sa demande vers un fournisseur moins risqué, mais dont les coûts totaux sont plus élevés (Bohner et Minner, 2017).

### *1.4.5 La programmation non linéaire*

Au-delà de la programmation linéaire se trouve la programmation non linéaire. Esmaeili-Najafabadi et al. (2019) ont proposé un modèle de programmation non linéaire en nombre entiers dans le but d'optimiser la sélection des fournisseurs et de concert l'allocation des commandes dans les chaînes d'approvisionnement centralisées en considérant le risque de perturbation. Au lieu de considérer le coût de l'acheteur uniquement, ils ont minimisé le coût total de la chaîne d'approvisionnement. Ils ont considéré quatre décisions importantes, soit les fournisseurs sélectionnés, l'allocation de la demande entre eux, les fournisseurs protégés, c'est-à-dire ceux qui ont une protection face au risque et dont le risque de perturbation est nul et enfin l'allocation d'un stock prépositionné d'urgence entre ces fournisseurs protégés. Les facteurs ayant été déterminants dans le choix des fournisseurs sont la probabilité de perturbation et le prix. En effet, lorsque le risque de perturbation est faible, les fournisseurs étant le moins risqué sont sélectionnés et la demande est allouée entre eux. Alors que lorsque la probabilité de perturbation augmente, le prix devient le critère prédominant permettant la prise de décision. Ainsi, les fournisseurs avec les prix les plus bas seront plus attirants pour les preneurs de décision

et donc ce sont eux qui seront considérés comme étant protégés (Esmaeili-Najafabadi et al. 2019). Meena et Sarmah (2013) ont aussi développé un modèle de programmation non linéaire en nombre entier mixte pour résoudre un problème d'allocation de la demande considérant différentes capacités, probabilités de risques et différents rabais par fournisseur. Ils en concluent que le coût a plus d'influence dans la décision d'allocation que le risque de perturbation associé à ce fournisseur (Meena et Sarmah 2013).

### *1.4.6 La programmation multi objectif*

En somme, la programmation multi objectif sert à prendre en compte plusieurs objectifs pouvant être contradictoires dans un même problème. Dans cette méthode, les préférences du décideur sont considérées dans la résolution de problème. Le modèle tentera donc de proposer une solution qui se rapproche le plus possible des objectifs en tenant compte des priorités qui y sont associées (Ravindran et al. 2010). Ravindran et al. (2010) ont proposé quatre alternatives en optimisant chaque objectif séparément dans un modèle de programmation multi objectif pour résoudre le problème de sélection des fournisseurs en tenant compte du risque. Le problème a été résolu en utilisation quatre variantes de la programmation multi objectif. Dans certains cas, c'est le prix auquel on accorde la priorité alors que dans d'autres cas le délai de livraison et la qualité prennent le devant dans la sélection des fournisseurs. Toutefois, en général, les résultats ont pu montrer que le choix optimal des fournisseurs est très sensible au prix malgré le contexte de risque (Ravindran et al. 2010).

### *1.4.7 Les heuristiques*

Les heuristiques sont également souvent utilisées en gestion des opérations, car elles sont efficaces et proposent rapidement une solution à un problème complexe qui se rapproche de la solution optimale (Hamdi, 2017). Dans un contexte de gestion de risque, Meena et al. (2011) ont proposé une heuristique afin de déterminer le nombre total de fournisseurs minimisant les coûts en tenant compte du risque d'évènements catastrophiques. Ils ont également souligné un arbitrage important, soit celui entre les coûts et le niveau de service. Intuitivement, le niveau de service sera supérieur à mesure que le nombre de fournisseurs augmente, ce qui engendrera en contrepartie une augmentation des coûts.

Comme Ruiz-Torres et Mahmoodi (2007), les chercheurs ont aussi exposé que si un fournisseur est perturbé, les autres fournisseurs peuvent rattraper la production de ce dernier à coût nul. Leurs résultats ont également montré que le nombre optimal de fournisseurs diminue lorsque le coût d'opération des fournisseurs augmente. Enfin, le nombre optimal de fournisseurs diminue en fonction de la probabilité croissante des super évènements, mais sans impact significatif sur le nombre optimal de fournisseurs à retenir. Ainsi, en considérant un certain niveau de service, l'approvisionnement multiple sera toujours favorisé face à l'approvisionnement simple (Meena, Sarmah et Sarkar, 2011).

### *1.4.8 Les modèles analytiques*

Les modèles analytiques ne sont également pas très utilisés dans la littérature. Toutefois, certains auteurs s'y sont intéressés, comme Meena et Sarmah (2016) qui l'ont utilisé pour déterminer le nombre optimal de fournisseurs ainsi que l'allocation de la demande entre ces derniers en tenant compte bien entendu du risque de perturbation. Ils ont développé une procédure de solution par étapes. Les résultats révèlent qu'au fur et à mesure que la demande augmente, le nombre de fournisseurs augmente de concert. Les fournisseurs qui offrent des rabais sur quantité intéressants et dont le risque de perturbation est moindre sont davantage sollicités. Ils proposent également que les fournisseurs plus coûteux, mais moins risqués devraient quand même être gardés en banque comme alternative en cas de perturbation (Meena et Sarmah, 2016).

### *1.4.9 L'analyse de décision multicritère*

L'analyse de décision multicritère permet quant à elle d'évaluer plusieurs alternatives en comparant divers critères (Boer, Labro et Morlacchi, 2001). C'est une technique rapide, peu coûteuse et simple à mettre en œuvre qui prend en compte des critères pouvant être subjectifs. Par contre, comme elle dépend du jugement humain pour établir les poids attribués à chaque critère, elle ne représente pas forcément une solution optimale, mais peut servir de point de départ pour départager les différents fournisseurs. Parmi les méthodes de décision multicritère se trouvent la technique de préférence de commande Fuzzy par similarité à la solution idéale (Fuzzy TOPSIS). C'est une méthode pratique et utile pour hiérarchiser et comparer plusieurs fournisseurs en mesurant les distances

euclidiennes.  Le principe est simple : la solution sélectionnée devrait avoir la distance la plus courte de la solution optimale et la distance la plus éloignée de la solution la moins préférable (Mavi et al. 2016). Mavi et al. (2016) ont établi neuf critères de sélection des fournisseurs dans un contexte de gestion de risque et en ont conclu que le facteur le plus important dans la prise de décision est le risque relatif à la demande.

### *1.4.10 La théorie des jeux*

Ensuite, la théorie des jeux est une méthode de sélection des fournisseurs utilisée dans de plus rares cas en contexte de gestion de risque. Cet outil d'aide à la décision est un jeu mathématique logique où le but est de déterminer les actions que les joueurs doivent prendre pour gagner la partie. Elle est utilisée pour prendre en compte des aspects de compétition, de collaboration et de négociation dans le processus de sélection des fournisseurs (Ravindran et al. 2010). Xiao et al. (2010) ont utilisé la théorie des jeux dans le but d'analyser les effets du délai de livraison sur l'allocation de la demande dans un contexte d'incertitude sur cette demande. Ultimement, lorsque le délai de livraison augmente, tout en tenant compte de la capacité de production du fournisseur ainsi que des coûts d'entreposage, la quantité commandée au fournisseur va tout de même augmenter (Xiao et al. 2010).

### *1.4.11 La simulation*

Enfin, la simulation représente une imitation du monde réel sur un logiciel informatique comportant plusieurs fonctions interactives. Grâce à ce logiciel, plusieurs scénarios peuvent être expérimentés et analysés (Alsolami, 2020). La simulation est notamment utile lorsque les impacts d'une perturbation sur la chaîne d'approvisionnement nécessitent de refléter des conditions évolutives à travers le temps (Ivanov, 2020). Kabadayi et Dehghanimohammadabadi (2022) ont développé un modèle de simulation qu'ils ont combiné à d'autres approches pour résoudre un problème de sélection des fournisseurs dans un contexte où un risque de perturbation est présent. Leur méthode a pour but de simplifier la sélection en identifiant les critères les plus importants dans la prise de décision dépendamment du contexte (Kabadayi et Dehghanimohammadabadi, 2022). Saputro et al. (2021) ont quant à eux proposé un modèle de simulation discret pour la

sélection des fournisseurs et la gestion de stock en tenant compte d'incertitude sur la qualité et de perturbation. Le tableau 1.3 résume les principaux résultats relevés dans la littérature relatifs à la problématique de la recherche. En général, les coûts semblent avoir une importance considérable dans la prise de décision et ce, au-delà du contexte de gestion de risque dans la chaîne d'approvisionnement.

Tableau 1.3 Les principaux résultats relevés dans la littérature sur la sélection des fournisseurs et l'allocation de la demande entre ces derniers

| Méthode | Résultat | Article |
|---|---|---|
| Arbre de décision | Arbitrage entre le risque et le coût : D'un côté de l'arbitrage se trouve le coût d'opération d'interagir avec plusieurs fournisseurs, de l'autre côté se trouve la perte financière qui résulte d'une perturbation des fournisseurs. | Berger et al., (2004) |
| Arbre de décision | Si un fournisseur est perturbé, les autres fournisseurs n'ayant pas subi cette perturbation peuvent rattraper la production du fournisseur perturbé et ce sans coût additionnel, la perte étant maintenant répartie à travers la chaîne. | Ruiz-Torres et Mahmoodi (2007) |
| Arbre de décision | La sélection des fournisseurs de différentes régions géographiques est une meilleure stratégie que la sélection des fournisseurs dans une même région géographique | Sarkar et Mohapatra (2019) |
| Programmation linéaire | Durant une période de perturbation, la capacité de production du fournisseur alternatif doit uniquement satisfaire la demande maximale et il devient de moins en moins nécessaire à mesure que les coûts relatifs à opérer ce fournisseur augmentent. | Chen, Zhao, et Zhou, (2012) |
| Programmation linéaire | Un nombre minimal de fournisseurs augmente les économies d'échelle, mais augmente le risque de perturbation. À mesure que le risque s'accentue, le décideur réalloue sa demande vers un fournisseur moins risqué, mais dont les coûts totaux sont plus élevés | Bohner et Minner, (2017) |
| Programmation non linéaire | Lorsque le risque de perturbation est faible, les fournisseurs étant le moins risqué sont sélectionnés et la demande est allouée entre eux. Alors que lorsque la probabilité de perturbation augmente, le prix devient le critère prédominant permettant la prise de décision. | Esmaeili-Najafabadi et al. (2019) |
| Programmation non linéaire | Le coût a plus d'influence dans la décision d'allocation que le risque de perturbation associé à ce fournisseur | Meena et Sarmah (2013) |
| Programmation multi objectif | Le choix optimal des fournisseurs est très sensible au prix malgré le contexte de risque | Ravindran et al. (2010) |
| Modèle analytique | Les fournisseurs qui offrent des rabais sur quantité intéressants et dont le risque de perturbation est moindre sont davantage sollicités. Les fournisseurs plus coûteux, mais moins risqués devraient quand même être gardés en banque comme alternative en cas de perturbation. | Meena et Sarmah (2016) |
| Théorie des jeux | Lorsque le délai de livraison augmente, tout en tenant compte de la capacité de production du fournisseur ainsi que des coûts d'entreposage, la quantité commandée au fournisseur va tout de même augmenter. | Xiao et al. 2010 |

En bref, dans ce chapitre, nous avons pu explorer les écrits sur les différents sujets relatifs au sujet de recherche. L'exploration des méthodes de sélection des fournisseurs nous a permis de relever la méthode se prêtant la mieux à notre problématique. Puis, les recherches portant sur les stratégies d'approvisionnement, plus particulièrement les stratégies tenant compte du risque dans la prise de décision, nous ont permis de développer les stratégies d'allocation de la demande modélisées dans notre simulation. Notamment, les lignes directives de l'activation de nos sources d'approvisionnement s'inspirent de constats relevés dans la littérature. Les discussions sur les différents types de risques nous ont également permis de comprendre à quel type de risque la pandémie était associée. Comme les risques ont été identifiés, nous avons alors pu tester des stratégies les minimisant. Enfin, nous avons aussi pu relever les coûts relatifs à l'adoption des

différentes stratégies qui nous permettront d'alimenter la discussion sur la prise de décision en ce qui concerne les stratégies efficientes.

C'est ainsi que se conclut la section relative à la recension des écrits. Le prochain chapitre se penchera sur la méthodologie ayant été utilisée pour résoudre le problème posé. Nous justifierons dans un premier temps le choix de la méthode choisie, puis discuterons de la terminologie de la méthode.

# Chapitre 2 Développement d'une approche de simulation : La méthodologie

Dans le présent mémoire, nous avons choisi d'utiliser la simulation, particulièrement la simulation à évènements discrets afin d'apporter des réponses à notre problématique. Le choix de cette méthode repose sur certains points. Tel que démontré précédemment, il est vrai que la résolution mathématique permet, dans de nombreux cas, de fournir une réponse exacte à une problématique donné. Par contre, il arrive de plus en plus que les systèmes du monde réel deviennent trop complexes pour être résolus à l'aide de modèles mathématiques ou analytiques (Law, 2015). Par conséquent, la simulation devient une bonne alternative alors que son application se reflète aujourd'hui dans plusieurs domaines, notamment dans les systèmes de gestion hospitalière, de gestion de stock et de files d'attente (Alsolami 2020). La simulation nous permettra donc de tester une multitude de valeurs afin de tirer des conclusions sur les meilleures stratégies à adopter en contexte de crise.

Elle permet également de modéliser des variables aléatoires et de prendre en compte des facteurs dynamiques dans la prise de décision, ce qui est nécessaire dans notre problématique, entre autres, comme nous voulons représenter des paramètres qui varient à travers le temps. Comme on se trouve dans une période de pandémie, nous voulons réviser nos décisions et nos paramètres à travers le temps afin d'aligner nos décisions à la demande, qui fluctue selon une courbe épidémiologique. L'incertitude inhérente au problème peut facilement être représentée à l'aide d'un modèle de simulation. En effet, grâce à cette méthode, il est possible de quantifier les risques et donc d'identifier des solutions plus robustes (Law, 2015).

## 2.1 La simulation à évènements discrets

La simulation à évènements discrets comporte plusieurs composantes définies ci-dessous. D'une part, les entités alimentent le système, elles sont donc les objets dynamiques dans la simulation, par exemple des individus. Elles se déplacent à travers la simulation et peuvent changer de statut et affecter d'autres entités (Kelton, 2015). Les entités dans notre

simulation sont les demandes hebdomadaires des établissements hospitaliers. Cette information transige à travers le modèle et c'est à partir de celle-ci que nous prenons nos décisions de réapprovisionnement. Les entités doivent comporter des divergences pour être représentatives de la population d'origine. Elles ont donc des attributs, soit des caractéristiques propres qui les différencient les unes des autres. Dans le cas où les entités à l'étude sont des patients, les attributs sont utilisés pour emmagasiner de l'information sur eux, comme leur âge, leur sexe ou leur état de santé général par exemple (Caro et al., 2015). Dans notre cas, le nombre d'unités demandées représente les attributs de nos entités, car elles nous permettent de distinguer la demande de la première semaine de celle de la cinquième et donc d'ainsi suivre l'évolution des décisions de la simulation à travers le temps. Le système se définit comme : « un ensemble d'entités, par exemple des personnes ou des machines, qui agissent et interagissent ensemble pour atteindre un objectif logique. » Dans la pratique, ce qui est défini comme le système dépend surtout des objectifs de l'étude (Law, 2015). On réfère souvent la simulation à un système et il est nécessaire de poser quelques hypothèses pour l'établir. Selon Law (2015), l'état du système correspond à : « la collecte des informations sur les variables pour décrire le système à un moment donné ». Autrement dit, chaque état du système a des paramètres initiaux propres à lui. En effet, si on simule le processus de réapprovisionnement relatif à la première vague de COVID-19, les paramètres associés devraient différer de ceux de la troisième vague, comme on peut tirer des conclusions des situations passées et s'ajuster en conséquence pour les évènements à venir. L'état du système établit les paramètres initiaux de la simulation, soit, dans notre cas :

- le nombre de masques N95 demandés relatif à la période correspondante,
- le stock initial dans l'ensemble des établissements hospitaliers étudiés,
- les termes du contrat établi avec le ou les fournisseurs, comportant sa capacité de production maximale,
- la quantité totale de masques disponibles dans la réserve (le cas échéant),
- les délais de livraison des fournisseurs traditionnels et alternatifs suivants une distribution uniforme.

L'information globale, également appelée les variables ou les variables globales dépendamment des ouvrages, permet de collecter des informations sur l'ensemble du système (Kelton, 2015). En effet, au-delà de l'information emmagasinée sur les entités par les attributs, il existe d'autres types d'information qui nécessitent d'être emmagasinés dans la simulation, mais qui ne touchent pas nécessairement les entités. Pour emmagasiner cette information, on crée des variables qui restent disponibles tout au long de la simulation. L'horloge par exemple, est une variable globale qui garde l'information sur l'heure actuelle dans la simulation (Caro et al., 2015). Nous utilisons de nombreuses variables dans notre simulation pour emmagasiner de l'information dont le stock physique et le stock virtuel. Par stock virtuel, nous considérons le stock en transit auprès des différentes sources d'approvisionnement. Comme ces dernières comportent des délais de livraison différents qui peuvent excéder le délai permis de réapprovisionnement, l'information de la quantité en commande est emmagasinée dans le stock virtuel pour qu'elle soit considérée lorsque vient le temps de placer une nouvelle commande.

Les ressources, quant à elles, correspondent à des contraintes de capacité. À partir du moment où une composante est limitée, elle représente une ressource dans la simulation. Le nombre de lits d'hôpitaux disponibles dans une unité de soin est considéré comme une ressource évaluée en logistique hospitalière (Caro et al., 2015). Une ressource est donnée à une entité. Celle-ci l'utilise lorsque disponible et la relâche lorsque la tâche nécessitant la ressource est réalisée. La simulation présentée ne comporte aucune ressource.

Les évènements représentent des points de changement dans la simulation. Dès qu'un évènement survient, l'entité vit un changement, que ce soit au niveau de ses attributs ou de ses relations avec les autres entités (Caro et al., 2015). Par ailleurs, les évènements ne surviennent pas uniquement sur les entités. Ils peuvent également apporter des changements sur des variables, des attributs ou des statistiques (Kelton, 2015). Si on veut représenter un modèle de dépistage du cancer du sein, une mammographie serait un évènement changeant le cours de la simulation dans le cas d'un résultat positif (Caro et al., 2015). Dans notre situation actuelle, un exemple d'évènement pourrait correspondre au moment auquel le fournisseur traditionnel atteint sa capacité maximale de production,

car un changement au niveau des stratégies d'approvisionnement en résultera selon les sources alternatives disponibles à ce moment. Le tableau 2.1 ci-bas récapitule les différentes composantes de la simulation à évènements discrets en proposant des exemples et en définissant à quoi ils correspondent dans notre simulation.

Tableau 2.1 Les composantes de la simulation à évènements discrets

| Composante | Description | Exemple | Cette simulation |
|---|---|---|---|
| Entité | Les sujets à l'étude dans la simulation | Individus, patients | Demandes hebdomadaires |
| Attributs | Les caractéristiques d'une entité | Âge, sexe, poids | Nombre de masques N95 demandés |
| Système | L'ensemble des entités | Personnes, Machines | Demandes de masques N95 d'une vague donnée |
| État du système | La description d'un système à un moment donné | Un ensemble de machines en 2020 | Paramètres initiaux (stock initial, capacité de la réserve) |
| Variables | Information pertinente à emmagasiner pour l'ensemble de la simulation | L'heure actuelle | Stock physique, stock virtuel |
| Ressources | Contraintes de capacité, horaire | Nombre de lits d'hôpitaux | N.A. |
| Évènements | Points de changement dans la simulation | Mammographie dans un modèle de dépistage du cancer du sein | Détermination de la taille de la commande |

Les premiers travaux sur la simulation utilisaient surtout des feuilles de calcul sur Microsoft Excel. Aujourd'hui, plusieurs autres logiciels de simulation ont été développés pour faciliter le processus dont Arena de *Rockwell Automation* (Alsolami, 2020). Nous avons choisi ce logiciel pour représenter la situation analysée. La fonction d'interactivité du logiciel a d'ailleurs eu beaucoup d'influence sur notre choix. En effet, il est possible d'effectuer différentes itérations à notre modèle de départ en y ajoutant uniquement quelques modules supplémentaires. Le processus de la simulation comprend d'abord la conceptualisation d'un modèle en identifiant les variables à l'étude (Alsolami, 2020). Il suffit par la suite d'interagir avec nos différentes variables et d'utiliser les différents modules afin de représenter la situation réelle d'intérêt. Tel que mentionné précédemment, la simulation est une représentation imitative de la réalité. Ainsi, dans notre contexte de gestion des stocks dans une situation critique de pandémie, il nous fallait un outil représentatif de notre situation et des différentes alternatives en cas de pénurie que l'on pourrait déployer à des moments clés de la simulation.

## 2.2 Le logiciel de simulation Arena

Deux grandes sections sont importantes dans le logiciel de simulation Arena. La partie du haut représente le modèle, donc le diagramme (*flowchart*) dans lequel les entités vont traverser et seront influencées par différents changements. Ensuite, la partie du bas représente le tableur (*spreadsheet*), là où les variables et différents modules du modèle sont définis. Chaque fois que l'on clique sur l'un des modules du modèle, l'action relative à celui-ci apparait dans la fenêtre du tableur. L'utilisateur peut simplement glisser et déposer les modules l'un à la suite de l'autre pour créer une suite logique. Il a accès à des processus de base qui sont généralement utilisés par tous pour modéliser des arrivées et des départs. Des processus avancés sont également disponibles et permettent entre autres d'importer et d'extraire des données externes (Law, 2015). Ainsi, ce logiciel nous permettra de représenter la problématique dirigeant notre recherche.

## 2.3 Le cadre d'analyse

Pour répondre à la problématique de recherche, nous allons dans un premier temps collecter des données afin de paramétrer le modèle de simulation, qui seront présentées au chapitre 5 du mémoire. La collecte de données réelles fût nécessaire afin que le modèle soit représentatif de la situation réelle d'intérêt. Suite à cette collecte, nous allons bâtir des stratégies d'allocation de la demande qui seront testées dans le logiciel de simulation. Ces stratégies seront exposées dans la section 3.3 du chapitre suivant. Ces stratégies auront différentes sources d'approvisionnement disponibles ainsi que différents leviers d'activation de chacune d'elles. Nous allons tester un certain nombre d'itérations de chaque stratégie pour ensuite statuer sur un nombre d'itération qui présentera des résultats statistiquement significatifs, tel que discuté dans la section 6.1. Nous analyserons alors les stratégies à l'aide d'indicateurs de performance qui seront présentés dans la section 3.5 ci-bas. Nous discuterons enfin des résultats obtenus et proposerons des recommandations.

# Chapitre 3 Développement d'une approche de simulation : La modélisation de la problématique

Le présent chapitre portera sur l'utilisation de la simulation à évènements discrets pour répondre à la problématique d'approvisionnement en matériel médical en contexte de crise. Tout d'abord, nous présenterons une description du modèle, puis les hypothèses que nous avons établies pour bâtir notre modèle de simulation. Enfin, nous exposerons les différentes stratégies analysées ainsi que les indicateurs de performance nous permettant de mesurer l'efficience de ces stratégies.

## 3.1 La description conceptuelle du modèle

Le modèle de simulation a été conçu dans le but de représenter le processus relatif à l'expédition de matériel médical aux établissements hospitaliers suivi du réapprovisionnement de cette ressource. Le modèle cherche, dans un premier temps, à satisfaire la demande des établissements. Nous calculons donc une prévision de cette demande en fonction de la consommation réelle estimée. Le modèle expédie ensuite ce qu'il est capable d'envoyer aux établissements dépendamment du niveau de stock étant disponible.

Nous devons ensuite décider si une nouvelle commande doit être placée. Pour ce faire, nous avons choisi d'adopter un système de réapprovisionnement périodique. Nous avons donc la possibilité de placer une commande chaque lundi. L'intervalle est fixe certes, mais la quantité commandée est variable et représente la différence entre le niveau de stock actuel et le niveau cible. Comme nous établissons des prévisions relatives à la consommation estimée de la demande, le niveau cible est recalculé chaque semaine en fonction des prévisions.

Après avoir établi la quantité commandée, vient le moment de déterminer l'allocation de cette commande entre les sources d'approvisionnement disponibles. Nous proposons différentes stratégies d'allocation qui sont toutes testées dans le modèle de simulation. Pour chacune des stratégies, nous disposons d'une ou de plusieurs sources d'approvisionnement qui ont des caractéristiques respectives : soit une capacité et un délai

de livraison suivant une distribution uniforme. La stratégie détermine l'allocation de la demande, en fonction des sources disponibles qui sont prédéterminées. Enfin s'effectue le réapprovisionnement du matériel médical suite au délai de livraison des sources respectives. Le processus reprend alors son cours pour simuler l'ensemble de la vague de pandémie d'intérêt.

## 3.2 Les hypothèses de la simulation

Les hypothèses ci-bas ont été posées afin de guider le processus d'allocation de la demande et de réapprovisionnement des établissements hospitaliers :

1. Nous considérerons un seul produit, soit le masque N95 pour des raisons exposées précédemment. Bien entendu, rien n'empêche de refaire le même exercice avec d'autres ÉPI connus.
2. Les prévisions sont utilisées pour ajuster les stratégies comme nous ne disposons pas d'information parfaite sur la demande.
3. Nous considérons un organisme central fédéral en charge du réapprovisionnement de matériel médical pour les établissements hospitaliers à travers le pays. Même si le fonctionnement actuel est plutôt réparti entre les différentes provinces, les données recueillies quant aux différentes demandes représentent la demande du Canada au complet d'où la généralisation de l'organisme fédéral. Nous nous mettons donc à la place du gestionnaire dans la prise de décision.
4. Lorsqu'une commande est placée, le fournisseur peut nous fournir jusqu'à sa capacité maximale. L'atteinte de cette capacité maximale correspond donc à un levier d'activation pour une source alternative.
5. Lorsqu'un fournisseur confirme qu'il a le stock nécessaire pour satisfaire la demande et qu'il nous fournit une date de livraison, il s'engage à nous envoyer la quantité confirmée dans un délai de livraison se situant dans un intervalle de temps défini. Autrement dit, on reçoit toujours la bonne quantité à temps.
6. Nous sommes conscients que nous faisons actuellement face à une pandémie et que nous allons manquer de matériel médical. Pour ce faire, nos stratégies anticipent l'augmentation croissante de la demande.

7. Dans chacune des stratégies, nous disposons d'une ou de plusieurs sources d'approvisionnement qui ont des capacités différentes et des délais de livraison suivant une distribution uniforme.
8. Nous disposons au maximum de trois différentes sources d'approvisionnement, soit un fournisseur traditionnel, un fournisseur alternatif et une réserve d'ÉPI.
9. Les stratégies d'allocation sont propres aux sources d'approvisionnement disponibles. En fait, nous avons décidé de simuler différentes capacités disponibles que nous qualifions de grande ou petite réserve et de grand ou petit fournisseur alternatif afin de représenter les difficultés d'approvisionnement en temps de crise. De cette manière, le gestionnaire est forcé de faire un choix en fonction des possibilités s'offrant à lui, ce qui nous permettra mieux d'évaluer l'efficience de chacune des stratégies.
10. Notre fournisseur traditionnel, soit le fournisseur avec lequel nous étions déjà en partenariat avant la pandémie, est uniquement en mesure de nous fournir la quantité maximale établie dans le contrat initial, il peut donc nous fournir au plus la capacité maximale qui nous est allouée.
11. En ce qui concerne nos fournisseurs alternatifs, soit les fournisseurs avec lesquels nous n'avions pas de partenariat avant la crise, ils sont disponibles dès le moment de leur activation, soit dès la première commande qui leur est placée. Nous assumons également que les recherches quant à cette nouvelle relation d'affaire et la négociation des contrats ont déjà été effectuées préalablement.
12. La réserve, quant à elle, comporte une capacité disponible de masques N95 qui n'est pas renouvelable. Elle est donc plutôt utilisée en cas d'urgence, soit lorsque les fournisseurs ne sont plus en mesure de satisfaire notre demande, mais n'est en aucun cas réapprovisionnée.

## 3.3 Le système de réapprovisionnement périodique

Tel que mentionné précédemment, nous avons décidé d'adopter un système de réapprovisionnement périodique à quantité variable pour le placement des commandes auprès des sources d'approvisionnement proposées. Nous avons donc la possibilité de placer une commande chaque lundi. L'intervalle est fixe certes, mais la quantité commandée est variable et représente la différence entre le niveau de stock actuel et le

niveau cible. Comme nous établissons des prévisions relatives à la consommation estimée de la demande, le niveau cible doit évoluer à travers le temps. Il est donc recalculé chaque semaine en fonction de l'erreur absolue moyenne sur la prévision. Ainsi, la formule ci-bas représente le calcul effectué chaque semaine pour recalculer le stock de sécurité (Axsater, 2015) :

$$SS = FS \times EAM_{prévision} \times \sqrt{i + d}$$

Où le facteur de sécurité (FS) utilisé est de 2,06 qui correspond à un intervalle de confiance de 95% que nous avons choisi d'adopter. Puis, l'erreur absolue moyenne de la prévision est recalculée chaque semaine en fonction de la moyenne absolue des erreurs sur les semaines précédentes. Ensuite, les valeurs de *i* et *d* correspondent respectivement au délai de livraison moyen (*d*), soit 1 semaine et à l'intervalle entre chaque commande (*i*), soit 1 semaine. La valeur du stock de sécurité est donc réinitialisée en fonction de ces paramètres comme le niveau cible est dynamique.

Enfin, on recalcule notre nouveau niveau cible en fonction de la prévision calculée ($\mu$) en plus d'y additionner le stock de sécurité recalculé (Axsater, 2015):

$$NC = \mu \times (i + d) + SS$$

Dans un second temps, comme ce système de réapprovisionnement est basé sur l'erreur absolue moyenne de la prévision, nous avons aussi calculé des prévisions à l'aide de la moyenne mobile sur la consommation estimée. La démarche que nous avons utilisée pour simuler la consommation sera abordée dans la section 5.2.3. Lorsque nous avons calculé la moyenne mobile de la consommation, nous l'avons générée sur 2, 3, 4, 5, et 6 semaines et il s'est avéré que la moyenne mobile sur trois semaines (MM3) était celle qui minimisait l'erreur absolue moyenne et se rapprochait donc le plus de la courbe de consommation. C'est donc la technique de prévision que nous avons retenue pour déterminer la demande de masques dans notre système de simulation. Nous avons également utilisé les prévisions fournies par MM6 dans le logiciel de simulation, mais cette fois-ci pour observer les tendances dans la demande. Ainsi, dans les stratégies nécessitant la désactivation du fournisseur alternatif, on regarde la demande de cette semaine comparativement à celle de la semaine dernière pour voir si nous observons une tendance à la baisse pour le cas

échéant, le désactiver. Nous préfèrerions utiliser MM6 que MM3 pour la désactivation de notre source alternative comme nous voulions que la tendance soit marquée dans le temps avant de prendre la décision de désactiver notre source alternative.

## 3.4 Les stratégies d'allocation de la demande dans la simulation

Les stratégies d'allocation de la demande ont été bâties en fonction des différentes sources d'approvisionnement disponibles. La première stratégie représente cependant le modèle initial, elle dispose donc uniquement du fournisseur traditionnel pour assurer le réapprovisionnement de masques. Les stratégies 2 à 17 présentées dans le tableau 3.1 comportent la possibilité de s'approvisionner auprès d'une seule source alternative alors que dans les stratégies 18 à 33 présentées dans le tableau 3.2, on dispose de deux sources alternatives. Nous souhaitons tester différentes stratégies d'allocation pour tirer des conclusions sur les meilleures pratiques à adopter en termes d'approvisionnement en temps de crise. On retrouve également une version détaillée des stratégies étudiées en annexe (Annexe 2 : Le tableau d'expérimentation des stratégies d'allocation de la demande). Les stratégies d'allocation sont régies par certains leviers, soit l'activation d'une source alternative respective, puis sa désactivation, le cas échéant. Le moment d'activation d'une source et la quantité lui étant commandée dépendent de la stratégie adoptée.

Tableau 3.1 Les stratégies d'allocation de la demande avec une source alternative

| | Nom de la stratégie | **Modèle initial** | **Allocation partielle de la demande à la source alternative** | | | | **Allocation complète de la demande à la source alternative** | | | | **Activation de la source alternative en fonction de la demande perdue** | | | | **Allocation selon les fluctuations de la demande** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 6 | 10 | 14 | 3 | 7 | 11 | 15 | 4 | 8 | 12 | 16 | 5 | 9 | 13 | 17 |
| source disponible | fournisseur traditionnel | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | grand fournisseur alternatif | | x | | | | x | | | | x | | | | x | | | |
| | petit fournisseur alternatif | | | x | | | | x | | | | x | | | | x | | |
| | petite réserve | | | | x | | | | x | | | | x | | | | x | |
| | grande réserve | | | | | x | | | | x | | | | x | | | | x |

Voici les sources alternatives s'offrant à nous : Dans les stratégies 2 à 5, nous disposons d'un fournisseur alternatif avec une grande capacité de production alors que dans les stratégies 6 à 9, sa capacité est réduite de moitié. Pour les stratégies 10 à 13, nous avons accès à une réserve de petite taille alors que dans les stratégies 14 à 17, on dispose d'une

grande réserve. Nous avons appliqué à chaque possibilité les mêmes quatre stratégies, raison pour laquelle chaque possibilité d'approvisionnement dispose de quatre stratégies. Nous avons décidé d'attribuer différentes capacités à nos sources alternatives dans le but de représenter le plus de cas de figures possibles auxquels le gestionnaire pourrait avoir à faire face dans la prise de décision en contexte de pandémie. De plus, comme les coûts d'adopter chacune des sources diffèrent considérablement, il est nécessaire de présenter les deux options pour statuer sur la pertinence de chacune des sources alternatives. De plus, en proposant plus de possibilités, on permet au gestionnaire d'identifier la stratégie la plus efficace à son contexte particulier.

La première stratégie (*allocation partielle de la demande à la source alternative* dans le tableau 3.1) consiste à allouer la quantité commandée totalement au fournisseur traditionnel jusqu'à ce que ce dernier atteigne sa capacité maximale de production. À partir du moment où le fournisseur traditionnel nous fournit à capacité maximale, nous activons la source alternative pour qu'elle réponde à la demande n'ayant pas pu être satisfaite par le fournisseur traditionnel suivant le calcul ci-bas : quantité commandée source alternative = quantité commandée – capacité fournisseur traditionnel. Nous plaçons une commande uniquement si le stock total est inférieur au niveau cible. Si la commande placée est supérieure à la capacité des sources disponibles, la quantité commandée maximale est la capacité du fournisseur traditionnel auquel s'ajoute la capacité de la source alternative. La source alternative est donc utilisée pour pallier le manque de production du fournisseur traditionnel.

La deuxième stratégie (*allocation complète de la demande à la source alternative)*, quant à elle, reprend la logique précédente, mais ici à partir du moment où le fournisseur traditionnel nous fournit à pleine capacité, nous activons la source alternative en lui allouant l'entièreté de la commande selon la formule suivante : quantité commandée source alternative = quantité commandée. En effet, comme le fournisseur traditionnel nous fournit déjà à pleine capacité, nous anticipons qu'il ne sera pas en mesure de supporter l'augmentation attendue de la demande. Nous décidons donc d'utiliser la source alternative pour satisfaire l'entièreté de la demande de manière à ce que notre fournisseur traditionnel puisse avoir un répit et ainsi chercher à s'adapter en augmentant ses capacités

de production. Il est nécessaire dans ces deux stratégies de désactiver la source alternative à partir du moment où elle n'est plus nécessaire. Ainsi, lorsque nous constatons une tendance à la baisse dans les prévisions de la demande, nous souhaitons arrêter de s'approvisionner auprès de la source alternative.

La troisième stratégie (*activation selon la demande perdue*), dépend plutôt de l'enregistrement de la première demande perdue dans la prise de décision. Ainsi, si aucune demande perdue n'est observée, la quantité commandée correspondra au maximum à la capacité du fournisseur traditionnel. Puis, si on enregistre une demande perdue, nous commandons une quantité fixe aux sources disponibles, soit sa capacité au fournisseur traditionnel et sa capacité au fournisseur alternatif. Comme l'enregistrement de demande perdue signifie que le fournisseur traditionnel ne répond plus à l'accroissement de la demande, on veut rapidement renflouer les stocks en augmentant radicalement la quantité commandée. Dans le cas où la source alternative est une réserve, la quantité commandée correspond à la capacité du grand fournisseur alternatif dans le cas d'une grande réserve et la capacité du petit fournisseur alternatif dans le cas d'une petite réserve pour que les stratégies puissent être mesurées sur une échelle comparable. La source alternative est également désactivée lorsque la demande présente une tendance à la baisse pour éviter les surplus de masques.

Pour finir, la dernière stratégie (*allocation selon les fluctuations de la demande)* consiste à tenir compte des tendances de la demande dans la prise de décision. Ainsi, on place une commande à la source alternative si nous observons une tendance à la hausse. Pour déterminer les tendances, nous regardons la demande de cette semaine et nous la comparons à celle de la semaine dernière. Si la nouvelle demande est supérieure, nous enregistrons une tendance à la hausse, ce qui en résultera par l'activation de la source alternative alors que si la nouvelle demande est inférieure, la tendance est plutôt à la baisse et nous continuons de nous approvisionner uniquement auprès de notre fournisseur traditionnel. En ce qui concerne la quantité commandée, dans le cas d'une tendance à la baisse, la quantité commandée correspondra au maximum à la capacité du fournisseur traditionnel alors que dans le cas d'une tendance à la hausse, nous pouvons commander à la source alternative, ce que le fournisseur traditionnel n'a pas été en mesure de satisfaire

toujours selon la formule suivante : quantité commandée source alternative = quantité commandée – capacité fournisseur traditionnel. Cette stratégie comprend donc une contrainte additionnelle qui peut avoir un impact considérable sur l'allocation de la demande entre les sources disponibles.

Tableau 3.2 Les stratégies d'allocation de la demande avec deux sources alternatives

| | Nom de la stratégie | **Utilisation de la source alternative pour pallier le manque de production en commançant par la réserve** | | | | **Allocation complète de la demande à la source alternative en commançant par la réserve** | | | | **Utilisation de la source alternative pour pallier le manque de production en commançant par le fournisseur alternatif** | | | | **Allocation complète de la demande à la source alternative en commençant par le fournisseur alternatif** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 18 | 22 | 26 | 30 | 19 | 23 | 27 | 31 | 20 | 24 | 28 | 32 | 21 | 25 | 29 | 33 |
| source disponible | fournisseur traditionnel | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | grand fournisseur alternatif | x | x | | | x | x | | | x | x | | | x | x | | |
| | petit fournisseur alternatif | | | x | x | | | x | x | | | x | x | | | x | x |
| | petite réserve | x | | | x | x | | | x | x | | | x | x | | | x |
| | grande réserve | | x | x | | | x | x | | | x | x | | | x | x | |

Les stratégies 18 à 21 disposent à la fois d'un fournisseur alternatif d'une grande capacité et d'une réserve de petite taille. Puis, dans les stratégies 22 à 25, nous disposons également d'un fournisseur alternatif avec des capacités de production importantes, mais aussi d'une réserve de grande taille. Ensuite, suivent les stratégies 26 à 29 disposant d'un fournisseur alternatif à capacité réduite, mais d'une réserve de grande taille. Enfin, les stratégies 30 à 33 disposent à la fois d'un fournisseur alternatif et d'une réserve enregistrant des capacités limitées. Nous avons également appliqué à chaque possibilité les mêmes quatre stratégies, raison pour laquelle chaque possibilité d'approvisionnement dispose de quatre stratégies.

La première stratégie étudiée (*allocation partielle de la demande à la réserve en premier lieu*) consiste à d'abord pallier le manque de production du fournisseur traditionnel par la réserve lorsque le fournisseur traditionnel atteint ses capacités de production maximales, puis, lorsque celle-ci a épuisé l'entièreté de sa disponibilité, nous utilisons le fournisseur alternatif pour continuer de pallier le manque de production lié à un accroissant inattendu de la demande. L'intérêt d'utiliser la réserve en premier lieu est qu'elle dispose d'un délai de livraison nettement inférieur au fournisseur alternatif. Elle sera donc en mesure de répondre plus rapidement à la demande des établissements hospitaliers. Il reste maintenant

à déterminer si cette stratégie proposera une bonne utilisation de la réserve à travers le temps.

La seconde stratégie (*allocation complète de la demande à la réserve en premier lieu*) garde la même logique, mais ici, à partir du moment où le fournisseur traditionnel nous fournit à pleine capacité, nous activons la source alternative en lui allouant l'entièreté de la commande selon la formule suivante : quantité commandée source alternative = quantité commandée. Dans un premier temps, c'est la réserve qui comble l'entièreté de la quantité commandée, puis lorsque cette dernière ne dispose plus de masques N95, c'est le fournisseur alternatif qui comble la quantité totale.

Les deux stratégies suivantes (*allocation partielle de la demande au fournisseur alternatif en premier lieu*) et (*allocation complète de la demande au fournisseur alternatif en premier lieu*) reprennent les mêmes décisions d'activation que les deux précédentes, mais au lieu de reposer sur la réserve dans un premier temps, nous reposons d'abord sur le fournisseur alternatif, puis utilisons la réserve uniquement en dernier recours. En utilisant la réserve en dernier lieu, on profite des capacités de production respectives des fournisseurs disponibles et gardons la réserve uniquement en cas d'urgence. Ainsi, le fournisseur alternatif est d'abord utilisé pour pallier le manque de production du fournisseur traditionnel, puis lorsque ce dernier atteint lui aussi ses capacités maximales de production, c'est la réserve qui prend le relai. Dans les cas où la réserve ne dispose plus de capacité, l'attribution de la commande retourne au fournisseur traditionnel. En guise de rappel, nous vous invitons à consulter l'Annexe 2 pour suivre les détails relatifs à chaque stratégie.

## 3.5 L'extraction des données simulées

Pour chaque stratégie étudiée, nous avons décidé d'extraire les données pertinentes vers des fichiers Excel afin de les analyser par la suite. Arena propose certains rapports pouvant être générés à même le logiciel. Par contre, ces outils ne nous permettaient pas de bien relever les phénomènes étudiés d'où le choix d'utiliser un outil externe pour l'analyse de données. La figure 3.1 présente les données extraites du modèle de simulation relatif à la stratégie 6. Dans cette stratégie, les sources disponibles sont composées d'un fournisseur

traditionnel et d'un fournisseur alternatif avec une petite capacité. Cette feuille Excel combine donc toutes les données extraites dans les modules *Readwrite* d'une itération de la stratégie adoptée. Ces données brutes sont extraites afin d'être évaluées dans une grille qui sera présentée prochainement.

| demande perdue | Qc fourn alternatif | Qc fourn traditionnel | Qc fourn tradi < capacité max | Qc demande décroissante | Quantite commandée reserve | Stock physique | Stock réserve |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 91048 | 75000 | 50000 | | 50000 | | 106028 | |
| 18381 | 75000 | 50000 | | 50000 | | 55148 | |
| | 42772 | 50000 | | 50000 | | 130624 | |
| | 75000 | 50000 | | 50000 | | 210179 | |
| | 42338 | 50000 | | 50000 | | 157228 | |
| | 75000 | 50000 | | 50000 | | 105306 | |
| | 70917 | 50000 | | | | 146274 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 222438 | |
| | 35173 | 50000 | | | | 215470 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 157662 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 96769 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 135166 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 197449 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 129083 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 59906 | |
| | 75000 | 50000 | | | | 116831 | |
| | | | | | | 164827 | |
| | | | | | | 99280 | |
| | | | | | | 108841 | |
| | | | | | | 167378 | |
| | | | | | | 111386 | |
| | | | | | | 39554 | |
| | | | | | | 88310 | |
| | | | | | | 195233 | |
| | | | | | | 60932 | |
| | | | | | | 0 | |
| | | | | | | 0 | |
| | | | | | | 12299 | |
| | | | | | | 76571 | |
| | | | | | | 180214 | |
| | | | | | | 97136 | |
| | | | | | | 65091 | |

*Figure 3.1 La grille d'extraction des données brutes du modèle de simulation*

## 3.6 L'évaluation des stratégies étudiées

Étant donné le nombre conséquent de stratégies simulées, il nous fallait trouver un outil pour comparer ces différentes stratégies afin de produire des analyses. Nous nous sommes donc inspirés de l'analyse de décision multicritère pour bâtir une grille d'évaluation présentée dans le tableau 3.3 ci-dessous comportant différents indicateurs de performance que nous souhaitions étudier.

Tableau 3.3 La grille d'évaluation des indicateurs de performance

| Indicateur | Résultat |
|---|---|
| **Demande perdue** | |
| Demande perdue / Demande totale | |
| **Utilisation de la réserve** | |
| Quantité commandée à la réserve / Capacité de la réserve | |
| **Répartition des commandes** | |
| Quantité commandée au fournisseur traditionnel / Quantité totale commandée | |
| Quantité commandée au fournisseur alternatif / Quantité totale commandée | |
| Quantité commandée à la réserve / Quantité totale commandée | |
| **Pénuries** | |
| Nombre de semaines en rupture de stock / Nombre de semaines total | |
| **Stock final** | |
| Valeur du stock physique à la dernière semaine de la vague de COVID-19 | |

Nous avons d'abord établi différentes catégories d'indicateurs de performance. Dans un premier temps, nous nous intéressons à la portion de la demande n'ayant pas été satisfaite, que nous qualifions de demande perdue. En réalité, elle implique la quantité de masques dont on aurait eu besoin pour fournir des soins, mais qui n'était pas disponible lorsque l'intervention nécessitant un masque N95 devait être pratiquée. Cet indicateur de performance est d'autant plus important puisque les pénuries de masques sont très graves et doivent être évitées à tout prix. Le pourcentage calculé de demande perdue doit donc idéalement être le moins élevé possible.

Par la suite, nous souhaitons aussi évaluer la gestion de la réserve lorsque cette option s'offre à nous. Pour ce faire, nous avons créé l'indicateur de performance relatif à l'utilisation de la réserve. Dans ce dernier, nous voulons connaitre le pourcentage d'utilisation de la réserve en divisant la quantité totale de masques N95 commandés à la réserve par la capacité de celle-ci. Tel que mentionné précédemment, comparativement au fournisseur alternatif, la réserve n'est pas renouvelable et s'écoule à mesure que des commandes y sont placées, d'où l'intérêt de récolter l'information sur son utilisation.

Nous avons également formulé un autre indicateur de performance, soit la répartition des commandes, qui nous permet de relever la proportion des commandes placées aux différentes sources d'approvisionnement. Cet indicateur mesure alors la source la plus sollicitée dans une stratégie donnée pour ainsi relever la dominance, voir même la dépendance à une source respective. L'allocation de la demande entre les différentes sources d'approvisionnement disponibles est calculée toujours dans le but de tirer des conclusions sur l'utilisation des sources disponibles dans les différentes stratégies.

Puis, nous avons mesuré un dernier indicateur relatif au stock physique disponible dans les établissements hospitaliers. À cet effet, nous nous sommes intéressés au nombre de semaines en pénurie de stock, soit le ratio des semaines où nous avons physiquement aucun stock par rapport au nombre de semaines total considéré dans la simulation. Il est de toute évidence que cette donnée doit également être la plus faible possible pour que la stratégie soit considérée comme efficiente dans notre contexte de crise.

Enfin, nous nous sommes intéressés au niveau de stock physique à la fin de la vague de COVID-19 dans le but de mesurer la stratégie de désactivation de la source alternative. Étant donné que les masques N95 sont périssables, nous voulons éviter les surplus qui pourraient se retrouver perdus lorsque la demande reprendra son cours normal.

En conclusion, le présent chapitre proposait le cadre conceptuel de recherche en passant par le modèle de la simulation, aux stratégies étudiées, pour enfin proposer les critères d'évaluation de ces stratégies. Dans le chapitre suivant, nous présenterons l'implémentation du modèle dans le logiciel de simulation Arena.

# Chapitre 4 Développement d'une approche de simulation : L'implémentation du modèle conceptuel

Dans ce chapitre, nous présenterons l'implémentation dans le logiciel de simulation Arena du modèle conceptuel exposé précédemment. Nous verrons dans un premier temps, le modèle initial, puis des extensions seront apportées à ce modèle initial pour ajouter les autres sources alternatives.

## 4.1 Le modèle initial

Le modèle initial représente la logique de satisfaction de la demande et d'allocation de la demande dans un contexte pré pandémie. Il s'agit ici de représenter le principe de réapprovisionnement réel lorsque l'on dispose uniquement d'une alternative, soit le fournisseur traditionnel. Nous distinguons deux parties au modèle soit la partie supérieure qui représente la logique de satisfaction de la demande, puis la partie inférieure qui elle, sera sujette à changement, car elle représente ce que nous souhaitons étudier. Nous avons donc défini cette partie comme l'allocation de la demande. Le modèle de base est alors est représenté dans la Figure 4.1.

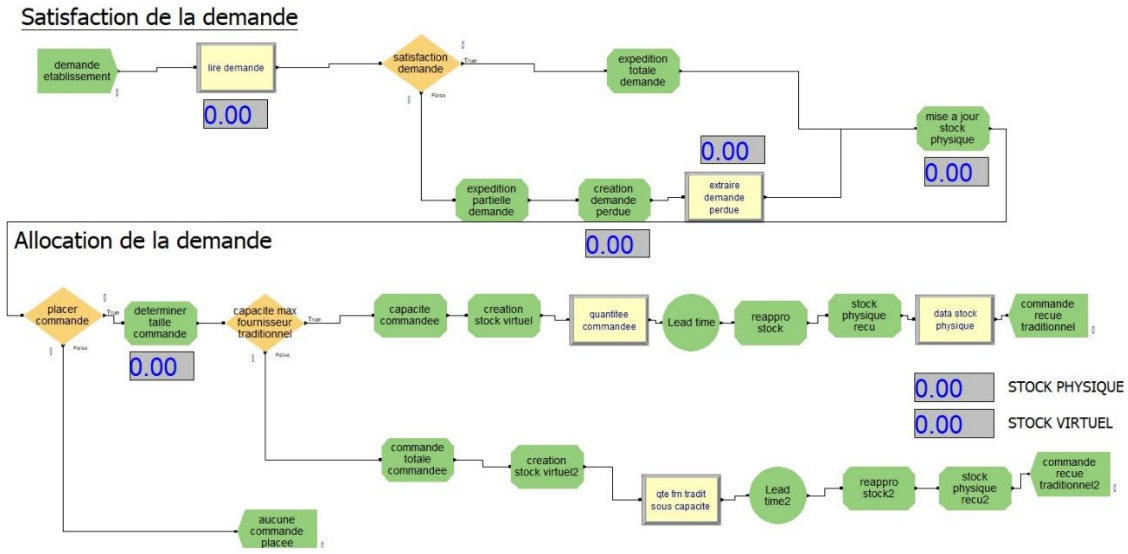



*Figure 4.1 Le modèle de simulation initial*

Dans ce modèle, nos entités de demande sont créées et lues chaque semaine. Nous déterminons ensuite si le niveau de stock disponible est suffisant pour satisfaire la demande de la semaine. Si la condition est respectée, on expédie la totalité de la demande. Dans la négative, on expédie uniquement ce qui est disponible physiquement en stock. Nous enregistrons ensuite la demande perdue n'ayant pas été satisfaite étant donné le niveau de stock insuffisant pour y satisfaire. Puis, on met à jour le niveau de stock lorsque qu'une demande est enregistrée. Nous avons distingué le stock physique du stock virtuel dans notre simulation pour différencier les quantités physiquement en main dans notre stock des quantités à venir.

Il devient ensuite primordial de décider si le niveau de stock actuel nécessite qu'une commande soit placée. Par défaut, dans notre situation initiale, le système alloue l'entièreté de la demande à notre unique option, soit le fournisseur traditionnel. La taille de la commande est ensuite déterminée en soustrayant le stock physique du niveau cible. À ce stade, le stock virtuel doit également être incrémenté par la quantité commandée pour éviter de recommander une quantité déjà en commande si le délai de livraison dépasse l'arrivée des demandes.

Puis, un autre élément entre en jeu. Au fur et à mesure que la demande augmente à travers la simulation, il est fort probable que le fournisseur ait atteint sa pleine capacité de production et qu'il ne soit plus en mesure de nous fournir l'entièreté de la quantité commandée. Alors, la quantité commandée devient la capacité de production du fournisseur. S'en suit un délai qui représente le délai de livraison de notre fournisseur qui varie selon une distribution uniforme entre le délai minimal et maximal de chaque source.

Pour finir, l'étape de la réception du stock s'impose alors qu'on doit incrémenter le stock physique et réduire le stock virtuel afin de représenter les différents flux du système. En résumé, le modèle initial représente la logique de réapprovisionnement des établissements hospitaliers hors contexte de pandémie. Dans notre contexte actuel, la recherche de nouvelles sources d'approvisionnement est nécessaire pour satisfaire la demande croissante de masques N95 et ainsi pour favoriser la délivrance des soins. Pour ce faire,

nous avons proposé des extensions à notre modèle initial afin d'analyser les différentes stratégies que nous voulons étudier.

## 4.2 L'ajout d'un fournisseur alternatif au modèle initial

Cette nouvelle variante du modèle consiste à ajouter la possibilité de s'approvisionner chez un fournisseur alternatif. Le décideur peut choisir de s'approvisionner de l'une des deux sources ou des deux simultanément, mais ce sont les différentes stratégies qui déterminent à quel moment on décide d'activer ce nouveau fournisseur et quelle quantité on décide de lui commander. Dans la Figure 4.2 est représentée la partie supérieure du modèle, la partie inférieure restant inchangée. Elle illustre d'ailleurs la 2$^{e}$ stratégie à l'étude. Dans cette stratégie étudiée, on souhaite que le fournisseur alternatif réponde à la demande n'ayant pas pu être satisfaite par le fournisseur traditionnel. Ainsi, on sollicite ce fournisseur alternatif uniquement lorsque le fournisseur traditionnel atteint sa pleine capacité, et ce, jusqu'à ce qu'il atteigne lui aussi sa capacité maximale.

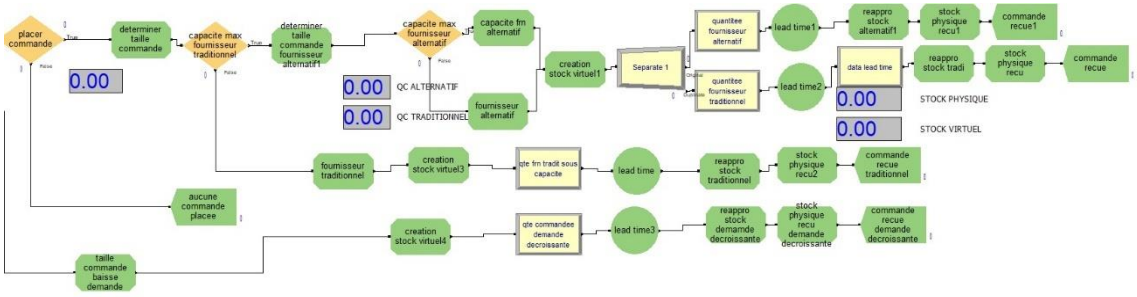



*Figure 4.2 Le modèle de simulation avec l'ajout d'un fournisseur alternatif*

L'ajout d'une source alternative implique son activation, mais aussi la décision de désactivation de cette nouvelle source. Pour prendre cette décision, nous considérons les prévisions calculées à partir de la moyenne mobile de l'historique de 6 semaines de demande. Enfin, les commandes des sources d'approvisionnement arrivent pour renflouer les stocks.

## 4.3 L'ajout d'une réserve au modèle initial

En second lieu, nous pourrions également disposer d'une autre source d'approvisionnement alternative, soit d'une réserve comportant une quantité disponible de masques N95 nous permettant de réapprovisionner notre stock physique. Nous avons

précédemment posé comme hypothèse que notre réserve d'ÉPI ne disposerait pas de réapprovisionnement, elle est donc disponible jusqu'à ce que sa quantité soit écoulée. La figure 4.3 ci-bas présente la logique d'allocation de la demande lorsqu'une réserve est disponible. Elle est sujette à changement dépendamment de la stratégie adoptée.

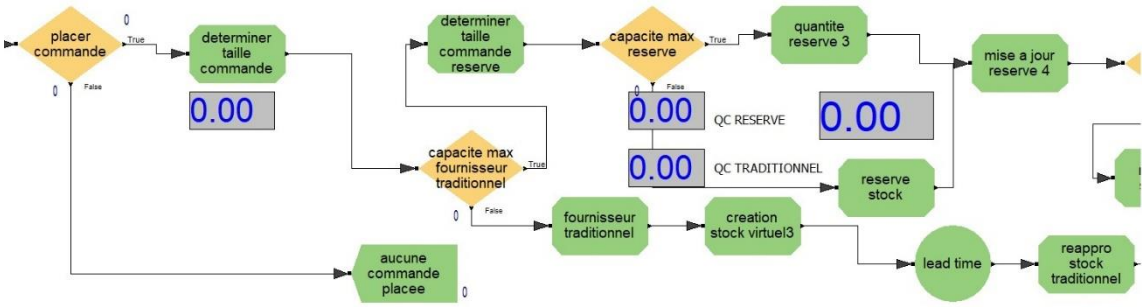



*Figure 4.3 Le modèle de simulation avec l'ajout d'une réserve d'ÉPI*

La logique d'allocation est similaire à celle du fournisseur alternatif, sauf que ce dernier dispose d'une capacité renouvelable, alors que la capacité de la réserve diminue à mesure qu'on l'utilise. Dans la stratégie 11 représentée dans la figure ci-haut, chaque semaine où le fournisseur traditionnel atteint sa pleine capacité, on décide d'allouer l'entièreté de la commande à la réserve. Cette stratégie ne comporte pas de stratégie de désactivation comme on décide de s'approvisionner auprès de la réserve jusqu'à temps que celle-ci soit vide.

## 4.4 L'ajout du fournisseur alternatif & de la réserve au modèle initial

Dans cette dernière variante du modèle, nous proposons deux sources alternatives pouvant être utilisées à différents moments pendant la simulation dépendamment de la stratégie adoptée. Nous disposons ainsi à la fois de notre fournisseur alternatif et de notre réserve de masques N95. Dans cette section, nous reprenons pratiquement les modèles présentés dans les sections 4.2 et 4.3 en leur ajoutant des extensions pour tenir compte de la nouvelle source disponible ajoutée. Dans un premier temps, nous devons prendre en compte les capacités de chacune des sources qui auront un impact clé sur l'activation de l'autre. Pour ce faire, dans la stratégie 18 présentée dans la figure 2.7, nous évaluons la quantité commandée à la source respective par rapport à ses capacités.

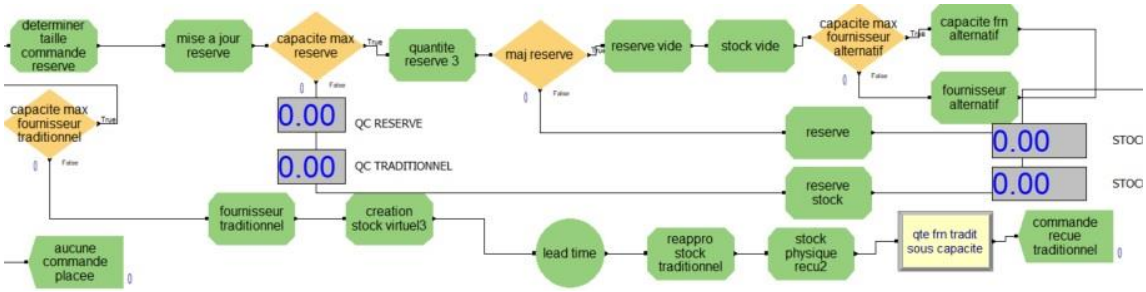



*Figure 4.4 Le modèle de simulation avec l'ajout d'un fournisseur alternatif et d'une réserve d'ÉPI*

Dans la stratégie 18, on dispose d'un fournisseur alternatif avec une grande capacité, mais d'une réserve limitée. Le gestionnaire décide donc de pallier le manque de production du fournisseur traditionnel en utilisant la réserve, puis lorsque celle-ci est vide, il comble le manque avec le fournisseur alternatif, raison pour laquelle la figure présentée s'intéresse d'abord à l'allocation de la réserve, puis à celle du fournisseur alternatif.

En définitive, ce chapitre conclut la présentation du cadre conceptuel de la recherche. Nous avons d'abord présenté la méthodologie, puis nous avons passé en revue le modèle de simulation en exposant les hypothèses et les stratégies simulées pour répondre à la problématique. Finalement, nous avons présenté l'implémentation du modèle dans le logiciel de simulation utilisé. Dans le prochain chapitre, nous nous pencherons sur l'expérimentation du modèle de simulation.

# Chapitre 5 Développement d'une approche de simulation : L'expérimentation du modèle

La section qui suit présente l'expérimentation de notre modèle. Dans un premier temps, nous nous pencherons sur les données ayant servi d'intrants à notre modèle afin qu'il soit le plus représentatif de la situation que nous souhaitons étudier. Comme la simulation est une méthode permettant de représenter la réalité avec un niveau de détail considérable, nous avons cherché des données afin de peupler ce modèle de simulation.

## 5.1 La collecte de données

Pour recueillir les données ayant servi à peupler les différents paramètres de la simulation, nous avons principalement utilisé Statistiques Canada et les publications de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). Au-delà de ces sites gouvernementaux, nous avons également consulté un nombre conséquent d'articles de journaux pour recueillir des informations sur les différents paramètres.

Concernant les données relatives à la demande de masques N95, les données québécoises sont presque inexistantes sur le sujet. Pour ce qui est de la demande canadienne, Statistiques Canada recommande d'utiliser ces données avec prudence (Statistique Canada, 2022). Pourtant, en ce qui concerne d'autres ÉPI moins complexes, comme les gants en nitrile et les masques chirurgicaux, un historique plus important de données était disponible, ce qui relève entre autres les difficultés d'approvisionnement relatives au masque N95. Nous avons toutefois pris la décision de se concentrer sur le masque N95 comme cet ÉPI critique a connu le plus d'enjeux d'approvisionnement durant la crise. Dans les prochaines sections, nous présenterons en détail les données retenues relatives aux paramètres de la simulation ainsi qu'à la demande de masques N95.

## 5.2 Analyse des données recueillies

Les données peuplant le modèle de simulation recueillies dans les différents journaux consultés sont présentées dans le tableau 5.1 ci-dessous. Nous nous sommes grandement inspirés de ces données pour établir les différentes variables du modèle de simulation. Les

autres données pertinentes ayant aussi été recueillies dans la littérature, sont détaillées en annexe (Annexe 1 : Les données recueillies dans la littérature).

Tableau 5.1 Les données associées aux paramètres de la simulation

| Paramètre | Donnée recueillie | Acteur | Donnée chiffrée | Source |
|---|---|---|---|---|
| Délai de livraison | Délai de livraison accéléré entre la Chine et le Canada | | 10 jours | Gerbet (2020) |
| Réserve provinciale | Cible de la réserve pour la 2e vague de masques N95 | | 3,4 millions, soit un stock de sécurité de 6 mois | Bouchard (2020) |
| | État de la réserve de masques N95 le 5 octobre 2020 | | 1 385 497 masques, soit 40% de la cible, ou + de 2 mois de stock de sécurité | Bouchard (2020) |
| Capacités de production des fournisseurs | Production annuelle de masques 2020 | 3M | 2 milliards de masques | |
| | Production annuelle cible de masques 2021 | 3M | 2,5 milliards de masques | Gouvernement du Canada (2020) |
| | Production hebdomadaire de N95 entièrement québécois | Artofix, filiale de Duvaltex | 100 000 masques par semaine avec une augmentation souhaitée à 400 000 par semaine | Samson (2021) |
| Changements dans les capacités de production des fournisseurs traditionnels | Construction d'une nouvelle usine de fabrication | Médicom | 3 mois | Boily et Cruzille (2020) |
| | Création d'une chaine de production de masques N95 au Canada | 3M | Opérationnel 8 mois après les investissements initiaux | Gouvernement de l'Ontario (2021) |

### *5.2.1 Les paramètres de la simulation*

Dans le tableau 5.2, nous présentons les données utilisées dans la simulation. Le premier paramètre correspond au nombre de semaines total de la vague et nous permet d'établir la durée totale de la simulation. Comme nous avons ici simulé la 2e vague de COVID-19, celle-ci s'étend sur 32 semaines. Nous avons choisi de mettre l'accent uniquement sur la 2e vague comme les seules données relatives à la demande de masques que nous avons trouvé s'inscrivent dans cette période.

Ensuite, nous avons établi le stock physique initial à 150 000 unités, ce qui représente la demande dans le secteur de la santé au printemps 2020, soit lors de la première vague de COVID-19. Nous considérons donc que le niveau des stocks n'est pas vide lorsque nous commençons la simulation. On rappelle ici que le gestionnaire a la possibilité de placer une commande chaque semaine. Nous avons pu trouver un délai de livraison accéléré de 10 jours entre la Chine et le Canada. À partir de cette donnée, nous avons pu établir pour chacune des sources d'approvisionnement des délais de livraison variant entre un nombre minimal et maximal de jours pour tenir compte des imprévus. Nous considérons un

fournisseur traditionnel avec un délai de livraison suivant une distribution uniforme entre 3 et 10 jours et un fournisseur alternatif, qui lui a un délai de livraison suivant également une distribution uniforme, mais entre 7 et 14 jours. En effet, le fournisseur traditionnel se situe principalement au Canada, mais délocalise une partie de sa production en Chine alors que le fournisseur alternatif se situe en Chine, d'où son délai de livraison plus important. Pour ce qui est de la réserve, nous avons établi un délai de livraison de 1 à 2 jours étant donné que nous disposons de réserves provinciales. Les délais de livraison suivent une distribution uniforme afin que chaque délai ait une probabilité égale de se produire. Contrairement à la distribution normale où les données sont plutôt regroupées autour de la moyenne, nous avons plutôt utilisé une distribution nécessitant moins d'hypothèses étant donné le manque d'information sur les des délais de livraison en temps de pandémie.

Tableau 5.2 Les paramètres de la simulation

| Paramètre | Valeur |
|---|---|
| Nombre de semaines total à la vague | 32 semaines |
| Stock initial | 150 000 masques |
| Délai de livraison du fournisseur traditionnel | 3 - 10 jours |
| Délai de livraison du fournisseur alternatif | 7 - 14 jours |
| Délai de livraison de la réserve | 1 - 2 jours |
| Capacité de production hebdomadaire du fournisseur traditionnel | 50 000 masques |
| Capacité de production hebdomadaire du petit fournisseur alternatif | 75 000 masques |
| Capacité de production hebdomadaire du grand fournisseur alternatif | 150 000 masques |
| Capacité de la grande réserve | 1 360 000 masques |
| Capacité de la petite réserve | 500 000 unités |

D'autre part, nous avons aussi dû attribuer à chacune des sources d'approvisionnement des capacités de production. Ainsi, les données trouvées dans la littérature nous ont permis de déterminer quelle capacité donner à chaque source. Nous avons d'abord considéré un fournisseur traditionnel dont la capacité de production répondait à la demande de masques N95 avant la pandémie. Puis, la capacité du fournisseur alternatif est supérieure, car les producteurs chinois disposent de capacités de production plus importantes étant donné qu'ils sont spécialisés dans la production de matériel médical. De plus, le fournisseur traditionnel ne peut augmenter sa capacité de production dans un horizon de court terme. Il devra ainsi effectuer certains changements pour être compétitif dans le temps. En effet,

durant la pandémie, les fournisseurs ont dû trouver des manières d'augmenter leurs capacités de production pour répondre à la demande exponentielle d'ÉPI. Médicom a réussi à mettre en place une nouvelle usine de fabrication en 3 mois, puis 3M a créé une chaîne de production de masques N95 au Canada en l'espace de 8 mois. C'est grâce à ces observations que nous avons créé la stratégie d'allocation complète de la demande à la source alternative. En effet, comme nous savions que nous pouvions espérer une amélioration des capacités d'un fournisseur en 3 mois, nous avons proposé cette stratégie pour permettre au fournisseur traditionnel de se rétablir en s'approvisionnement auprès de sources alternatives. Le fournisseur alternatif peut quant à lui nous fournir une quantité plus importante, mais à un prix beaucoup plus élevé que notre fournisseur traditionnel, raison pour laquelle nous souhaitons l'utiliser uniquement au besoin. Notre gros fournisseur a une capacité de production représentant le double d'un petit fournisseur comme nous voulions mesurer l'impact relatif à la taille d'un fournisseur alternatif.

Enfin, la grande réserve comporte une quantité de 1 360 000 masques N95, ce qui se rapproche de la quantité disponible de masques dans la réserve canadienne en octobre 2020. Pour ce qui est de la petite réserve, nous lui avons attribué une quantité de 500 000 unités pour étudier l'utilisation d'une réserve dotée d'une capacité limitée. Tous les paramètres constituant notre réserve sont modifiables. Au-delà des différents paramètres qui délimitent le modèle, nous avons cherché des données quant à l'utilisation de masques N95 dans les établissements hospitaliers. Comme les données n'étaient pas abondantes, nous avons décidé de baser notre courbe de demande sur les hospitalisations en lien avec la COVID-19 à travers le pays afin que la courbe de demande suive la courbe des hospitalisations.

### *5.2.2 L'évolution des hospitalisations en lien avec la COVID-19*

La figure 5.1 présente l'évolution des hospitalisations de COVID-19 entre juillet 2020 et juin 2021. Nous nous intéressons à la 2$^{e}$ vague de COVID-19 au Canada qui s'étend de septembre 2020 à la mi-février 2021 (Gouvernement du Canada, 2021). Il est toutefois possible de représenter l'évolution des hospitalisations tout au long de la pandémie. Les données recueillies représentent l'ensemble des provinces canadiennes à l'exception du

Québec. On remarque une tendance similaire entre les hospitalisations et les admissions aux soins intensifs en liens avec la COVID-19. Le nombre de cas hospitalisé est un bon indicateur, mais le nombre de cas aux soins intensifs reste plus représentatif de la situation étant donné qu'on s'intéresse à l'utilisation de masques N95 et que les procédures où l'utilisation est requise sont surtout pratiquées aux soins intensifs.

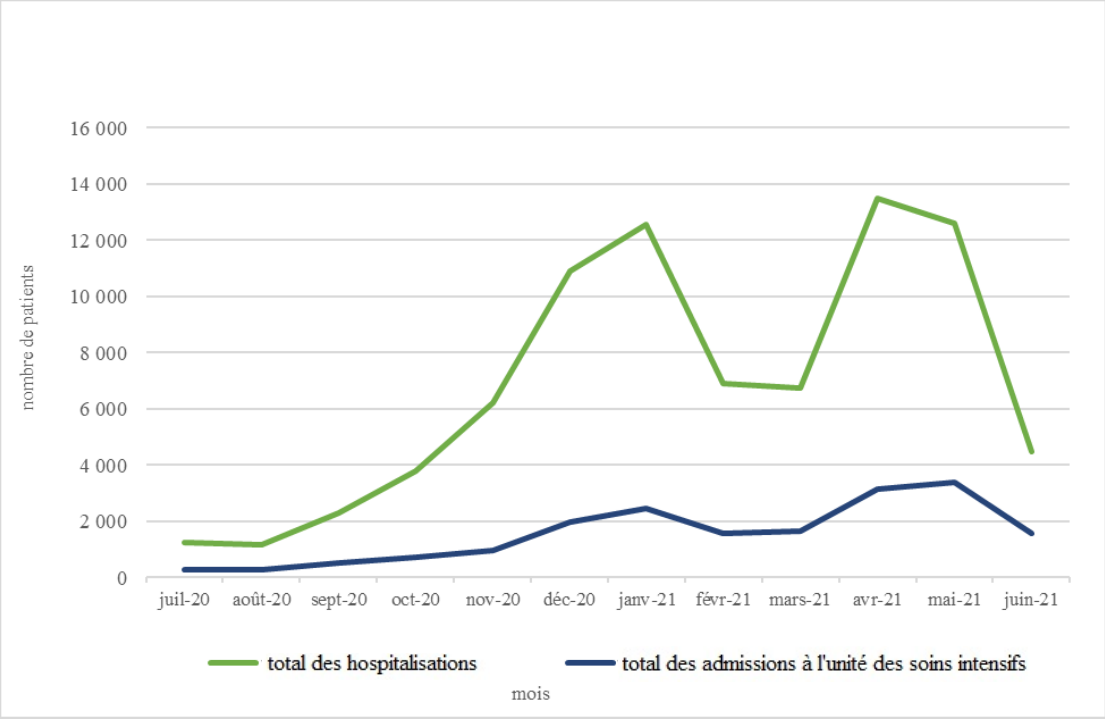



*Figure 5.1 Évolution du nombre total de cas hospitalisés et admis aux soins intensifs avec un diagnostic de COVID-19 au Canada hors Québec entre juillet 2020 et juin 2021*

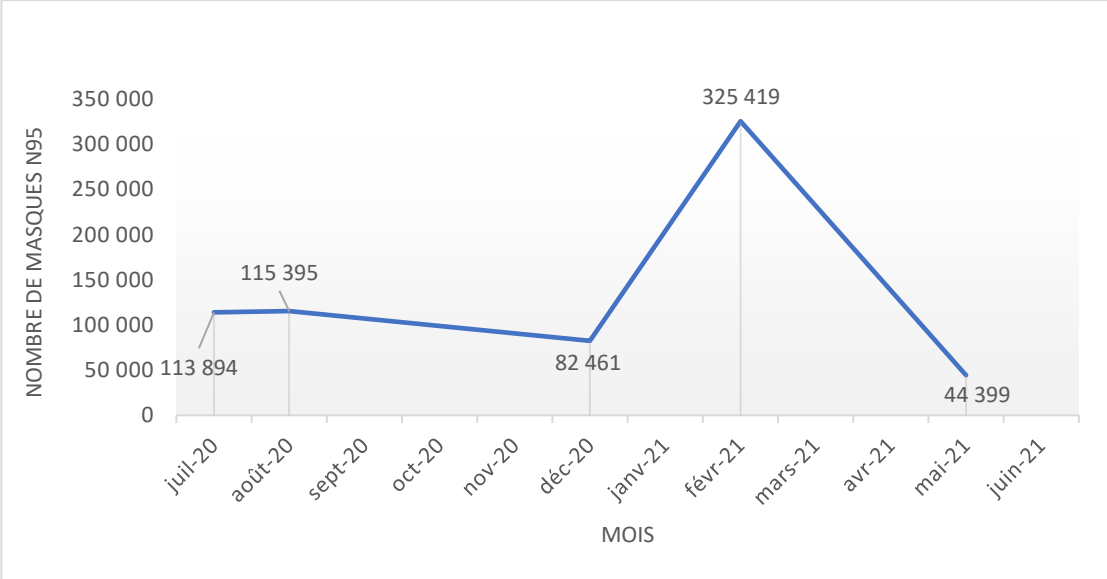
Source : Institut canadien d'information sur la Santé 2021 https://www.cihi.ca/fr/statistiques-sur-les-hospitalisations-et-les-visites-au-service-durgence-liees-a-la-covid-19

Par rapport à ce graphique, on remarque deux courbes épidémiques, soit une entre août 2020 et février 2021 et une autre entre mars et juin 2021 avec des pics aux mois de décembre et de janvier, puis d'avril et de mai respectivement. Nous souhaitions représenter l'évolution des admissions aux soins intensifs dans le but d'avoir une idée de la demande de masques N95 étant donné que les données recueillies sur la consommation de Statistique Canada comportaient des données manquantes. Cet enjeu sera adressé dans la section suivante. Nous serons ainsi en mesure d'estimer les données manquantes en respectant la courbe de l'évolution des admissions aux soins intensifs. Néanmoins, les

données quant aux hospitalisations et aux admissions aux soins intensifs ne seront pas utilisés dans le modèle de simulation.

### *5.2.3 La demande de masques N95*

Dans un second temps, les données relatives à la consommation d'ÉPI dans les établissements ont été recueillies afin d'en ressortir les tendances. Dans la Figure 5.2, la consommation réelle, soit l'utilisation estimée de masques N95 dans les établissements hospitaliers canadiens de l'été 2020 à l'été 2021 est reflétée à partir de données recueillies provenant de Statistiques Canada (2020). Il est important de constater que les données collectées sont uniquement disponibles pour les mois de juillet, août et décembre pour l'année 2020 et pour les mois de février, mai et août 2021. Le graphique d'évolution de la consommation nous permet néanmoins d'avoir une idée de la consommation lors de la 2$^{e}$ vague de COVID-19. On remarque une consommation plutôt stable entre les mois de juillet et de novembre 2020, puis une augmentation fulgurante entre les mois de décembre 2020 et de février 2021. Cette période coïncide avec la période des fêtes où beaucoup de canadiens ont voyagé à l'étranger et ont pu contracter le virus. Enfin, on remarque une diminution graduelle de la consommation de masques N95 entre mars et mai 2021.




Source : Demande et offre d'équipement de protection individuelle (statcan.gc.ca)

*Figure 5.2 L'évolution de la consommation réelle de masques N95 dans les établissements hospitaliers canadiens de juillet 2020 à Juin 2021*

Ainsi, à l'aide des figures 5.1 et 5.2, nous avons une meilleure idée de l'évolution de la demande à travers le temps. Si on compare l'évolution des cas par rapport aux données de la consommation présentées, on remarque que l'augmentation de la consommation de masques coïncide sensiblement avec les données recueillies quant aux hospitalisations du virus. Par conséquent, on en conclut que lorsque les cas hospitalisés de COVID-19 augmentent, l'utilisation de masques croît puisque les procédures nécessitant l'utilisation d'un N95 sont également en croissance. Grâce à ce constat, nous serons en mesure d'estimer la demande malgré les données manquantes relatives à la consommation de masques N95 recueillies de Statistique Canada.

Dans le modèle de simulation, le calcul des prévisions de la demande est nécessaire à son élaboration, car c'est l'intrant qui alimente les décisions de la simulation. L'institut canadien de l'information sur la santé a rapporté que dans 60% des cas, les travailleurs de la santé dans les établissements hospitaliers du Canada avaient un masque N95 sous la main lorsqu'ils devaient pratiquer une procédure nécessitant l'utilisation de cet ÉPI (Institut canadien d'information sur la santé, 2022). Ainsi, les données recueillies sur la consommation de masques N95 ne peuvent être utilisées telles quelles comme elles ne représentent pas la demande réelle de cet ÉPI dans l'ensemble des établissements hospitaliers au pays. Pour ce faire, nous avons converti nos données en les divisant par 60% dans le tableau 5.3 ci-bas pour considérer cette demande réelle.

Tableau 5.3 La consommation et la demande réelle de masques N95

| Mois | consommation réelle | demande réelle |
|---|---|---|
| 20-Jul | 113,894 | 189,823 |
| 20-Aug | 115,395 | 192,325 |
| 20-Sep | | |
| 20-Oct | | |
| 20-Nov | | |
| 20-Dec | 82,461 | 137,435 |
| 21-Jan | | |
| 21-Feb | 325,419 | 542,365 |
| 21-Mar | | |
| 21-Apr | | |
| 21-May | 44,399 | 73,998 |
| 21-Jun | | |
| 21-Jul | | |
| 21-Aug | 212,631 | 354,385 |

Source : Demande et offre d'équipement de protection individuelle (statcan.gc.ca)

Les données relevées suivent relativement la tendance sauf la consommation du mois de décembre qui présente une diminution inattendue. Nous avons donc pris la décision d'omettre cette donnée dans le calcul de la demande afin de respecter l'évolution des hospitalisations qui est plus représentative de la situation épidémiologique.

En ce qui concerne les données manquantes, nous les avons estimés en générant des nombres aléatoires suivant une progression linéaire pour les mois de septembre, octobre, novembre, décembre 2020 et janvier, mars 2021. Comme les données recueillies étaient mensuelles, nous avons généré des données hebdomadaires aléatoires qui se retrouvent dans un intervalle prédéterminé, par exemple entre 45 000 et 50 000 masques par semaine en septembre 2020. Au nombre aléatoire généré, est multiplié un facteur aléatoire suivant une progression linéaire, par exemple entre 0 et 15% pour septembre 2020. Entre août et décembre 2020, les données suivent une progression linéaire croissante, puis, une progression linéaire décroissante est appliquée pour les 3 mois suivants de 2021 pour respecter une courbe épidémique. Puis, nous nous sommes assurés de respecter la consommation totale du mois lorsque celle-ci était disponible. Par exemple, pour août 2020, la demande réelle calculée s'élevait à 192 325 masques. Ainsi, les demandes hebdomadaires générées se situent entre 40 000 et 50 000, suivent une progression aléatoire entre -5 et 10 % et leur somme totalise 192 325 masques. De cette manière, nous avons utilisé les données trouvées dans la littérature tout en générant des données pour les mois où l'information n'était pas disponible. Ces données correspondent ainsi à la consommation réelle.

Comme nous ne disposons pas d'information parfaite de la demande, nous avons appliqué une moyenne mobile à cette consommation réelle pour générer nos prévisions de la demande. Ces prévisions correspondent donc à la demande de masques N95 considérés dans la simulation ou au nombre de masques N95 demandés chaque semaine. Un horizon de 3 semaines de demande est considéré pour l'activation d'une source alternative alors qu'un horizon de 6 semaines est considéré pour sa désactivation, comme on veut s'assurer qu'une tendance à la baisse est enregistrée sur un laps de temps plus important avant de désactiver la source alternative.

La figure 5.3 ci-bas représente la consommation et la demande durant la 2e vague. La demande est donc introduite dans la simulation à partir d'un fichier Excel et constitue les demandes hebdomadaires pour l'ensemble des 32 semaines relatives à la 2e vague. Lorsque les demandes entrent dans la simulation, elles ont un impact décisif pour la suite des actions.

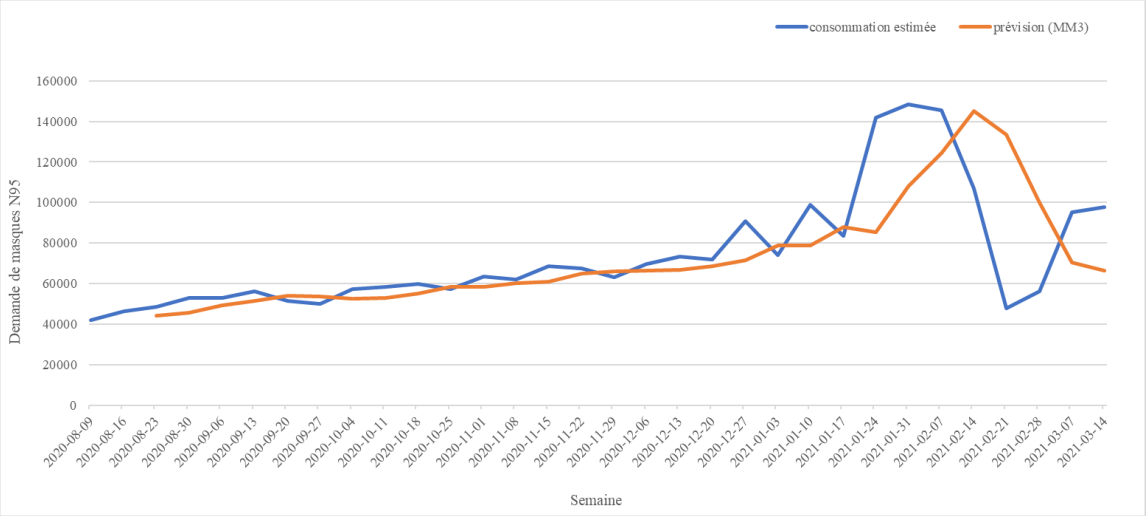



*Figure 5.3 La consommation de masques N95 et les prévisions de la demande lors de la 2e vague de COVID-19*

En résumé, les données recueillies dans la littérature nous ont permis d'établir les paramètres fixes de notre simulation, entre autres, les capacités de production et les délais de livraison. Pour ce qui est des paramètres dynamiques, comme la demande de masques N95, nous avons généré des données aléatoires, pour combler les données manquantes, qui ont constitué les demandes hebdomadaires des établissements hospitaliers dans le modèle de simulation.

C'est ainsi que se conclue le cadre expérimental combinant les données recueillies aux données créées dans le but de créer un modèle de simulation le plus représentatif de la situation d'intérêt. La section qui suit représente le cœur de notre travail et viendra nous permettre de répondre à notre question de recherche.

# Chapitre 6 Développement d'une approche de simulation : La présentation des résultats

Dans ce chapitre, nous vérifierons d'abord le modèle de simulation puis nous présenterons les résultats obtenus. Nous passerons en revue les différents indicateurs de performance afin de soulever la position de chaque stratégie par rapport à chaque indicateur respectif. Nous analyserons dans un premier temps les stratégies dotées d'une source alternative, puis dans un second temps de celles qui disposent de deux sources alternatives. Nous serons ensuite en mesure de tirer des conclusions et de répondre à notre question de recherche.

## 6.1 La vérification des résultats

Selon Law (2015), la vérification s'intéresse à déterminer si les hypothèses établies ont bien été transmises dans notre modèle de simulation. Il s'agissait donc de vérifier que le cadre conceptuel soit bien traduit dans l'application logicielle du modèle. Nous avons donc consulté les modules utilisés pour vérifier que l'action leur étant attribuée ait bien été effectuée. Pour ce faire, nous avons observé le déplacement des entités à travers le modèle pour s'assurer qu'elles respectent le chemin leur étant désigné pour toutes nos stratégies étudiées. Nous avons également utilisé la fonction d'animation pour ajouter des endroits dans le modèle où s'affichent les quantités qui passent par certains modules. Par exemple, nous avons ajouté une animation sur le stock virtuel pour s'assurer qu'il est bien incrémenté lorsqu'on place une commande et qu'on lui soustrait cette quantité lorsque la commande est reçue. Les quantités commandées sont également visibles à des moments clés de la simulation pour qu'on s'assure de respecter les capacités des différentes sources d'approvisionnement disponibles. Nous avons également calculé manuellement certains résultats pour voir si le modèle de simulation proposait un résultat similaire.

Des tests préliminaires ont également été effectués afin de déterminer le nombre d'itérations enregistrant des résultats significatifs. Ainsi, nous avons testé plusieurs nombres d'itérations jusqu'à ce que la variabilité des résultats soit minimisée pour que nos résultats soient considérés comme statistiquement significatifs. Nous avons statué le nombre d'itération statistiquement significatif à 100 itérations et pouvons affirmer que la

moyenne d'un indicateur est vraie dans un intervalle de confiance de 95%. Ainsi, nous pouvons affirmer à 95% de chance que la valeur d'un indicateur de performance pour une stratégie donné se trouve entre les bornes des intervalles présentés. Les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance présentés ont été calculés en utilisant la formule suivante :

$$CI = \bar{x} \pm z \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Où $CI$ correspond à l'intervalle de confiance, soit 95 % dans notre cas, $\bar{x}$ à la moyenne de l'échantillon, $z$, la valeur du niveau de confiance, soit dans notre cas 1,96 relatif à l'intervalle de confiance de 95% $s$, l'écart-type de l'échantillon, et $n$, la taille de l'échantillon, soit 100 itérations qui propose des résultats statistiquement significatifs (Law 2015).

Enfin, nous pouvons affirmer que la majorité de nos résultats sont statistiquement significatifs, car chacune de nos stratégies propose un intervalle de confiance distinct pour chacun des indicateurs de performance. Ainsi, l'indicateur relatif au stock physique est le seul qui ne peut être considéré comme statistiquement significatif comme les intervalles s'entrecoupent.

## 6.2 Les stratégies disposant d'une source d'approvisionnement alternative

Avec nos différentes stratégies, nous souhaitions tester plusieurs décisions pouvant être prises par un gestionnaire concernant l'allocation de la demande entre les différentes sources d'approvisionnement. Dans les stratégies 2 à 17, il s'agit de représenter les différentes décisions pouvant être adoptées en présence d'un fournisseur traditionnel, mais également d'une source alternative qui pourrait correspondre, soit à une réserve, soit à un fournisseur alternatif de masques N95. Comme nous évaluons les différentes stratégies à l'aide d'indicateurs de performance, les points suivants exposent nos analyses par rapport à chaque indicateur respectif.

### *6.2.1 La demande perdue*

Premièrement, il est primordial que la stratégie choisie par le gestionnaire minimise la demande perdue. En guise de rappel, lorsque notre niveau de stock n'est pas suffisant pour satisfaire l'entièreté de la demande, nous commandons uniquement la quantité disponible en stock. C'est donc la portion n'ayant pas pu être satisfaite qui nous intéresse ici, soit la différence entre la demande hebdomadaire et la quantité expédiée. Pour calculer le pourcentage de demande perdue de chaque stratégie, nous avons donc divisé cette quantité par la demande totale. Les implications d'avoir des demandes perdues sont importantes, car elles signifient que les travailleurs de la santé ne disposent pas du matériel nécessaire à la délivrance des soins. Le tableau 6.1 ci-bas représente le pourcentage enregistré de demande perdue sur l'ensemble des stratégies à une source alternative.

Tableau 6.1 Proportion de la demande perdue des stratégies à une source alternative avec intervalle de confiance de 95%

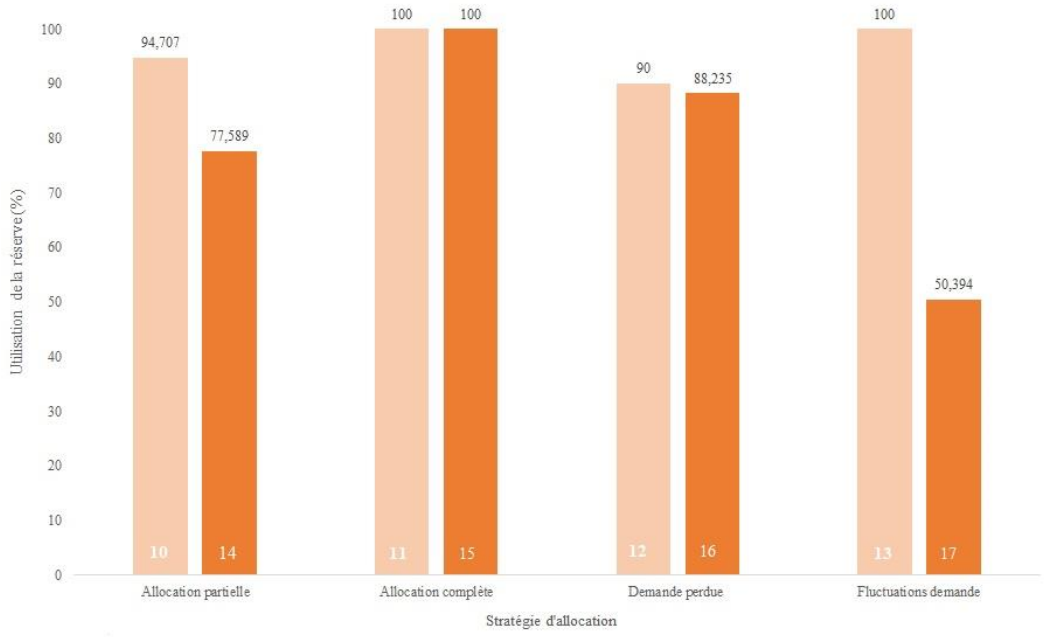
| Nom de la stratégie | **Modèle initial** | **Allocation Partielle** | | | | **Allocation complète** | | | | **Demande perdue** | | | | **Fluctuations demande** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Numéro de la stratégie | 1 | 2 | 6 | 10 | 14 | 3 | 7 | 11 | 15 | 4 | 8 | 12 | 16 | 5 | 9 | 13 | 17 |
| Fournisseur traditionnel | **31,922** (31,919 ; 31,924) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Grand alternatif | | **14,727** (14,720 ; 14,734) | | | | **17,582** (17,579 ; 17,585) | | | | **15,370** (15,363 ; 15,377) | | | | **5,685** (5,680 ; 5,689) | | | |
| Petit alternatif | | | **16,838** (16,832 ; 16,845) | | | | **26,516** (26,515 ; 26,518) | | | | **18,291** (18,285 ; 18,296) | | | | **7,295** (7,290 ; 7,299) | | |
| Petite réserve | | | | **22,295** (22,292 ; 22,299) | | | | **28,867** (28,866 ; 28,869) | | | | **25,490** (25,486 ; 25,493) | | | | **12,662** (12,659 ; 12,665) | |
| Grande réserve | | | | | **6,715** (6,709 ; 6,721) | | | | **15,412** (15,411 ; 15,414) | | | | **10,071** (10,067 ; 10,075) | | | | **3,190** (3,188 ; 3,192) |

Le modèle initial enregistre la demande perdue la plus élevée, soit 31,922% en moyenne, étant donné l'accès à une seule source d'approvisionnement. La stratégie minimisant la demande perdue, toutes sources alternatives confondues, est la stratégie d'allocation selon les fluctuations de la demande avec moins de 13% de demande perdue enregistrée. La stratégie qui suit en termes de demandes perdues, toutes sources confondues, est la stratégie relative à l'allocation partielle à la source alternative. Cependant, la demande perdue augmente considérablement, autour de 10% de plus par rapport à la stratégie précédente, sauf pour la réserve de grande taille. L'activation de la source alternative basée sur l'enregistrement de demande perdue oscille autour des mêmes résultats que la stratégie d'allocation partielle. Enfin, en allouant l'entièreté de la demande à la source

alternative, on épuise complètement ses capacités ce qui ne permet pas de pallier le manque de production du fournisseur traditionnel, d'autant plus dans le cas où nous faisons face à une réserve avec des capacités limitées.

### *6.2.2 L'utilisation de la réserve*

Comme la réserve dispose d'une capacité non renouvelable, nous avons créé un indicateur de performance relatif à l'utilisation de cette réserve. Idéalement, nous voulons que l'utilisation de la réserve soit inférieure à 100% pour qu'elle puisse répondre aux variations de la demande tout au long de la vague. L'utilisation de la réserve mesure la quantité commandée à la réserve en fonction de sa capacité. La figure 6.1 représente la répartition des stratégies disposant d'une réserve selon leur pourcentage d'utilisation.




| Stratégie | Petite réserve | Grande réserve |
|---|---|---|
| Allocation partielle | **94,707** (94,700 ; 94,713) | **77,589** (77,581 ; 77,596) |
| Allocation complète | **100,00** (100,00 ; 100,00) | **100,00** (100,00 ; 100,00) |
| Demande perdue | **90,000** (90,00 ; 90,00) | **88,235** (88,227 ; 88,244) |
| Fluctuations demande | **100,00** (100,00 ; 100,00) | **50,394** (50,389 ; 50,399) |

*Figure 6.1 Proportion de l'utilisation moyenne de la réserve des stratégies à une source alternative avec intervalle de confiance de 95%*

La stratégie d'allocation partielle permet à la réserve d'être disponible tout au long de la 2e vague de COVID sans être complètement épuisée. Puis, la stratégie d'allocation

complète écoule la réserve au complet, même lorsqu'elle dispose d'une grande capacité. Dans cette stratégie, la réserve s'écoule tout de même après 24 semaines en moyenne considérant les 32 semaines relatives à la 2e vague de pandémie. Ainsi, malgré la capacité nettement supérieure de la réserve, son utilisation est tout de même complète. Puis, lorsque la réserve possède une capacité limitée, elle se vide beaucoup plus rapidement, soit en 12 semaines, ce qui donne environ 3 mois au fournisseur traditionnel pour augmenter ses capacités de production. Ainsi, la majorité des stratégies proposées utilisent la réserve dans son ensemble, ce qui peut devenir problématique dans la mesure où la capacité de la réserve est écoulée dans les premiers mois de la pandémie.

### *6.2.3 La répartition des commandes*

Le prochain indicateur s'intéresse à la répartition de la demande entre les sources d'approvisionnement disponibles dans le but de relever la dépendance à une source d'approvisionnement. En parallèle, lorsque le risque de perturbation est pris en compte dans la prise de décision, la diversification des sources d'approvisionnement est primordiale. On souhaite donc éviter toute forme de dépendance afin de limiter les conséquences liées à la perturbation d'un fournisseur. La figure 6.2 présente les stratégies selon la répartition des commandes entre le fournisseur traditionnel et le fournisseur alternatif.

Dans un premier temps, nous observons que la stratégie d'allocation partielle au fournisseur alternatif présente une répartition équitable entre les sources disponibles. En effet, en disposant d'un grand fournisseur alternatif, en moyenne 50,482% de la quantité commandée est allouée au fournisseur traditionnel contre 49,518% pour le fournisseur alternatif. Puis lorsqu'on dispose d'un petit fournisseur alternatif, c'est 55,042% qui est allouée au fournisseur traditionnel contre 44,958% au fournisseur alternatif. Ces répartitions sont celles qui se rapprochent le plus de l'équilibre ce qui nous permet de qualifier cette stratégie comme la plus efficiente selon cet indicateur de performance.

En ce qui a trait à la stratégie basée sur les fluctuations de la demande, elle alloue une plus grande partie de la demande au fournisseur traditionnel en laissant au fournisseur alternatif le rôle lui étant attribué. Dans les stratégies relatives à l'allocation de la demande

selon la demande perdue, c'est plutôt l'inverse qui se produit alors qu'on dépend en majorité du fournisseur alternatif sans utiliser le fournisseur traditionnel à bon escient. D'autre part, la stratégie relative à l'allocation complète de la demande au fournisseur alternatif délaisse le fournisseur traditionnel pour s'approvisionnement à plus de 80% auprès du fournisseur alternatif.

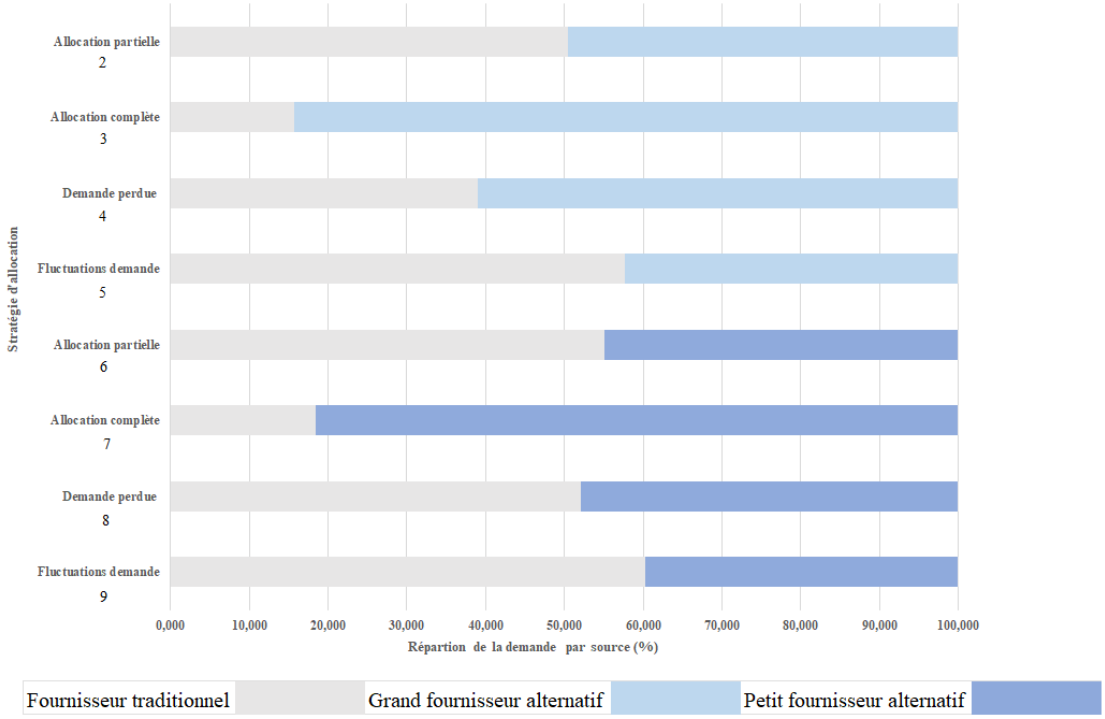



*Figure 6.2 Proportion des commandes moyennes réparties entre le fournisseur alternatif et le fournisseur traditionnel*

Dans un deuxième temps, si on s'attarde aux stratégies relatives à la réserve, toutes les stratégies disposant d'une réserve à capacité limitée lui allouent moins de 30% de la quantité totale commandée, l'allocation étant contrainte par sa capacité maximale. Les stratégies disposant d'une réserve sont présentées dans la figure 6.3 en fonction de leur répartition avec le fournisseur traditionnel.

En ce qui concerne une réserve de grande taille, la stratégie d'allocation partielle à la réserve enregistre une répartition se rapprochant de l'équilibre, soit de 51,690% au fournisseur traditionnel et 48,310% à la réserve. Puis, suit la stratégie d'allocation selon la demande perdue qui avoisine le ratio 40% au fournisseur traditionnel et 60% à la réserve. De l'autre côté se trouve la stratégie basée sur les fluctuations de la demande, qui

elle avoisine le ratio contraire. Enfin, la stratégie d'allocation complète de la demande à la réserve enregistre 73,118% à la réserve contre 26,882% au fournisseur traditionnel. Étant donné la stratégie choisie, la réserve est beaucoup plus sollicitée, c'est d'ailleurs la seule stratégie disposant d'une grande réserve qui écoule complètement la source non renouvelable.

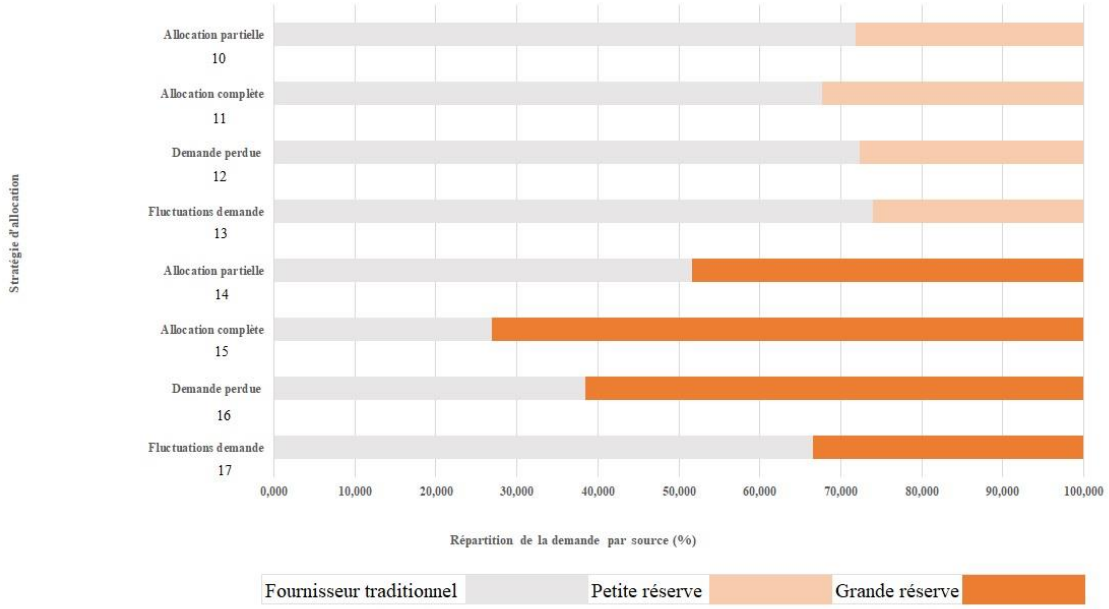



*Figure 6.3 Proportion des commandes moyennes réparties entre la réserve et le fournisseur traditionnel*

Ainsi, les stratégies disposant généralement d'une réserve comme source alternative reposent en grande majorité sur leur fournisseur traditionnel, mais disposent d'une source alternative aidant à combattre l'accroissement de la demande, ce qui est légitime étant donné qu'une réserve est mise en place dans le but de combler le manque de production pour une période limitée.

### *6.2.4 Les pénuries*

Le prochain indicateur s'intéresse à la présence de pénuries de stock au cours de la simulation. Nous considérons une pénurie lorsque le stock physique nécessaire au réapprovisionnement des établissements hospitaliers est vide. Ainsi, chaque semaine où le stock physique enregistre une quantité de 0 lors de la mise à jour, une occurrence de pénurie est comptabilisée. La totalité de la demande de la semaine correspondante est

donc enregistrée comme demande perdue. Dans la réalité, si le stock physique est vide, cela signifie que la demande des établissements hospitaliers ne peut être comblée en aucune partie et qu'ils devront attendre le prochain réapprovisionnement pour recevoir des masques N95. Ils devront donc se livrer à des politiques de rationnement ou de réutilisation des masques N95 pour continuer de traiter les patients, ce qui réduit leur protection et ne favorise pas la délivrance des soins.

À la figure 6.4, nous avons représenté la répartition des différentes stratégies selon le pourcentage respectif de pénuries de stock. La majorité des stratégies enregistre au moins 25% du temps en pénuries de stock, ce qui signifie 8 semaines sur les 32 relatives à la 2e vague de COVID-19. Ainsi, l'ajout d'une source alternative permet de réduire les pénuries de stock, comparativement à 56,50 %, soit 18 semaines en disposant uniquement du fournisseur traditionnel. Il est important de noter que les pénuries sont surtout enregistrées en fin de vague, soit dans les mois de février et mars 2020.

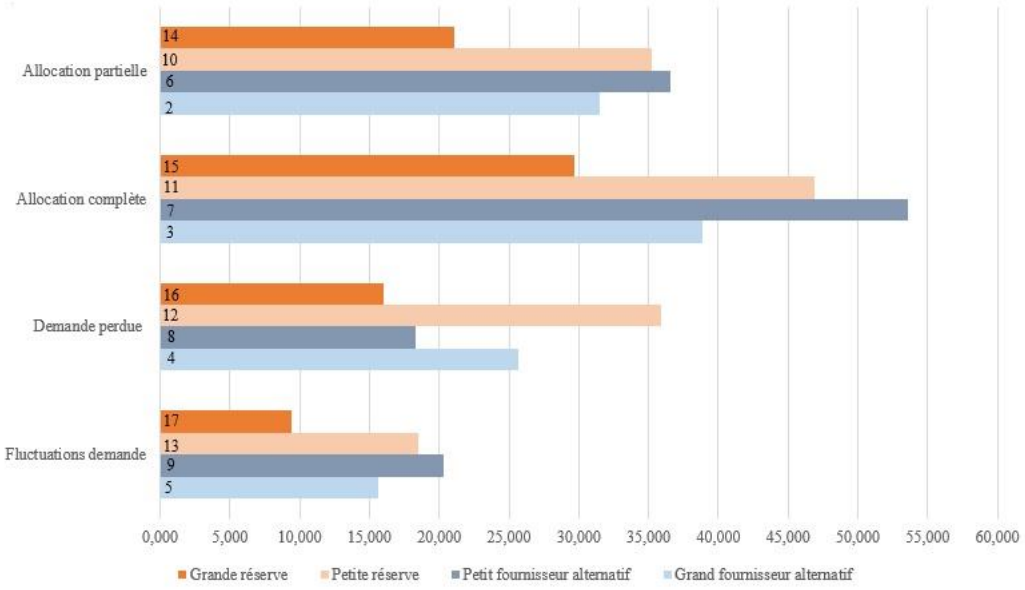



*Figure 6.4 Proportion du temps en pénurie des stratégies à une source alternative*

Si on considère uniquement les stratégies qui disposent d'une réserve, elles enregistrent généralement un niveau plus faible de pénuries que celles disposant d'un fournisseur alternatif. En effet, comme le délai de livraison de la réserve est plus court, le stock est plus rapidement renfloué, le délai de réapprovisionnement est donc diminué. En ce qui a trait au fournisseur alternatif, son utilisation selon les fluctuations de la demande est la

stratégie minimisant les pénuries avec 15,656% pour un grand fournisseur alternatif et 20,344% pour un petit fournisseur alternatif, soit environ 5 et 6 semaines.

### *6.2.5 Le stock final*

Le dernier indicateur présenté s'attarde au stock physique final, soit au stock disponible physiquement à la fin de la vague de COVID simulée. Cet indicateur a été soulevé dans le but d'évaluer l'efficience de la décision relative à la désactivation de la source alternative, le cas échéant. Comme les masques N95 que nous entreposons comportent une date de péremption, la quantité disponible ne doit pas excéder la demande de ce produit pour éviter de devoir jeter des masques N95 périmés à défaut d'avoir la demande pour cette ressource. Une stratégie efficiente éviterait les surplus afin de reprendre un approvisionnement normal de matériel médical lorsque la vague de COVID est terminée. Le tableau 6.2 ci-bas représente les différents niveaux de stock physique final dépendamment des stratégies.

Tableau 6.2 Répartition des stratégies à une source alternative selon leur stock final moyen avec intervalle de confiance de 95%

| Stratégie | # de la stratégie | Source alternative disponible | Stock final | Intervalle inférieur | Intervalle supérieur |
|---|---|---|---|---|---|
| Modèle initial | 1 | | 5523,6 | 3873,7 | 7173,6 |
| **Allocation partielle** | 2 | GFA | 25019,2 | 19077,3 | 30961,2 |
| | 6 | PFA | 3663,1 | 2247,7 | 5078,5 |
| | 10 | PR | 6050,2 | 4432,5 | 7667,9 |
| | 14 | GR | 5415,2 | 3765,3 | 7065,2 |
| **Allocation complète** | 3 | GFA | 14333,6 | 11524,3 | 17143,0 |
| | 7 | PFA | 5941,8 | 4297,0 | 7586,6 |
| | 11 | PR | 6871,3 | 5105,7 | 8636,9 |
| | 15 | GR | 6044,1 | 4376,2 | 7712,0 |
| **Demande perdue** | 4 | GFA | 20075,2 | 15157,8 | 24992,6 |
| | 8 | PFA | 7426,3 | 5595,7 | 9256,9 |
| | 12 | PR | 6347,8 | 4590,1 | 8105,5 |
| | 16 | GR | 6239,4 | 4456,0 | 8022,8 |
| **Fluctuations demande** | 5 | GFA | 31559,6 | 25480,8 | 37638,4 |
| | 9 | PFA | 5553,8 | 3887,4 | 7220,2 |
| | 13 | PR | 7695,4 | 5829,3 | 9561,5 |
| | 17 | GR | 7800,8 | 5940,1 | 9661,4 |

Les stratégies enregistrant les niveaux de stock final les plus élevées sont celles disposant d'un grand fournisseur alternatif, étant donné sa capacité de production hebdomadaire

supérieure. Aucune stratégie n'enregistre des surplus de stock, ce qui confirme l'efficience de la stratégie de désactivation. Le réapprovisionnement auprès du fournisseur traditionnel pourra donc reprendre le rythme d'avant la pandémie sans qu'un stock important de masques doive préalablement être écoulé.

## 6.3 Les stratégies disposant de deux sources d'approvisionnement alternatives

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la possibilité d'avoir à disposition les deux sources alternatives étudiées, soit le fournisseur alternatif et la réserve. Si on fait référence aux solutions d'approvisionnement ayant été relevées lors de la deuxième vague de COVID-19, la recherche de sources alternatives a dû s'effectuer dans un court délai étant donné l'accroissement exponentiel de la demande, nous avons donc sollicité des fournisseurs alternatifs et mis en place une réserve d'ÉPI simultanément. Il devenait donc primordial d'étudier des stratégies disposant des deux sources simultanément afin d'en relever leur valeur ajoutée et de déterminer l'utilisation optimale de chaque source. Nous avons également utilisé les indicateurs de performance présentés ci-haut pour mesurer l'efficience des stratégies disposant de deux sources alternatives.

### *6.3.1 La demande perdue*

En disposant de deux sources alternatives, nous sommes donc en mesure de mieux répondre à la demande hebdomadaire des établissements hospitaliers et de détenir le matériel médical pour réaliser la délivrance des soins dans la majorité des cas. Dans la figure 6.5 ci-bas est présentée la demande perdue des différentes stratégies.

Les stratégies commençant à s'approvisionner auprès de la réserve lorsque le fournisseur traditionnel atteint ses capacités de production enregistrent un pourcentage de demande perdue nettement moins élevé que celles commençant par l'utilisation du fournisseur alternatif. Le délai de livraison de la réserve explique la divergence entre les résultats. Comme la réserve se trouve à même les provinces canadiennes, les établissements hospitaliers peuvent être livrés à l'intérieur de 2 jours alors que le fournisseur alternatif trouvé dispose d'un délai beaucoup plus important, soit de 7 à 14 jours. Ainsi,

l'accumulation de demande perdue se produit comme on se doit d'attendre le réapprovisionnement pour répondre à la demande des hôpitaux.

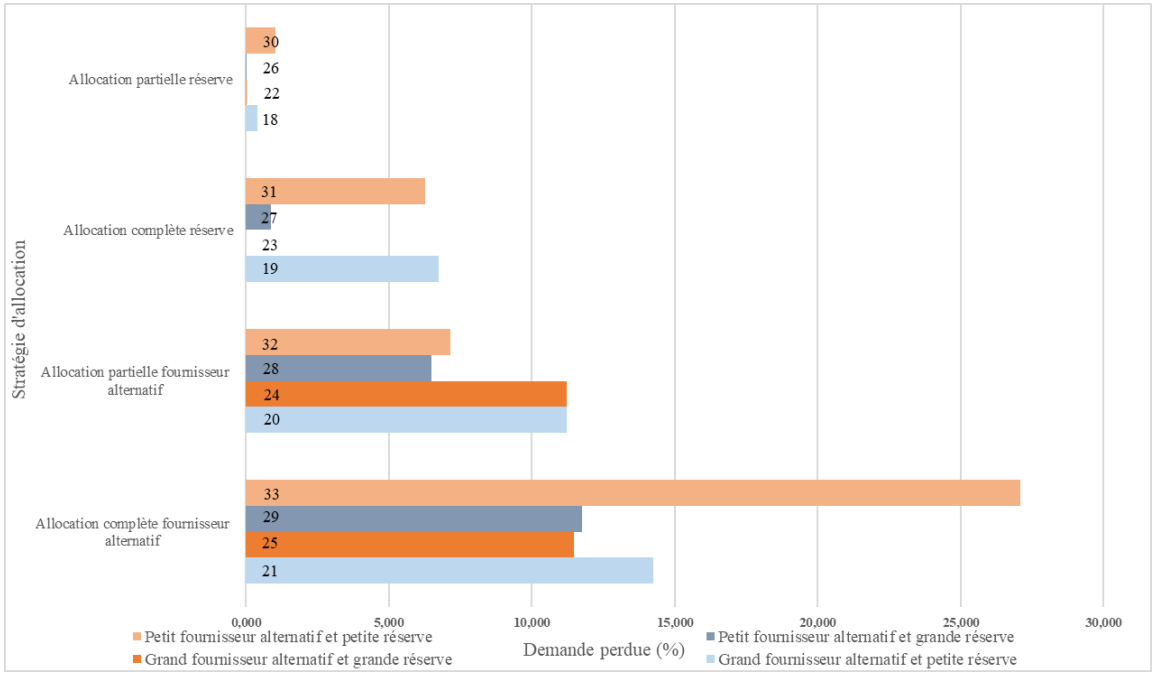



*Figure 6.5 Proportion de la demande perdue des stratégies à une source alternative*

### *6.3.2 L'utilisation de la réserve*

Les stratégies 18 à 33, représentées à la Figure 6.6 ci-bas disposent toutes d'une réserve de masques N95 avec des capacités différentes. Dans les stratégies qui sollicitent la réserve en premier, lorsque l'on dispose d'une petite réserve, c'est en moyenne en 16 semaines relatives à la 2$^{e}$ vague que la réserve s'écoule, ce qui laisse uniquement deux sources d'approvisionnement disponibles pour le reste de la vague de COVID alors que la demande continue de croitre. Par contre, lorsque la réserve dispose d'une grande capacité, elle dispose de masques N95 pendant 28 semaines.

En ce qui a trait aux stratégies sollicitant d'abord le fournisseur alternatif, comme sa capacité est renouvelable, il arrive à satisfaire en partie l'augmentation de la demande pour que la réserve soit utilisée en fin de vague, soit lorsque les fournisseurs traditionnels et alternatifs ne disposent plus de capacité disponible. De plus, lorsque nous disposons d'un grand fournisseur alternatif, la quantité commandée hebdomadaire est supérieure ce qui repousse davantage l'activation de la réserve.

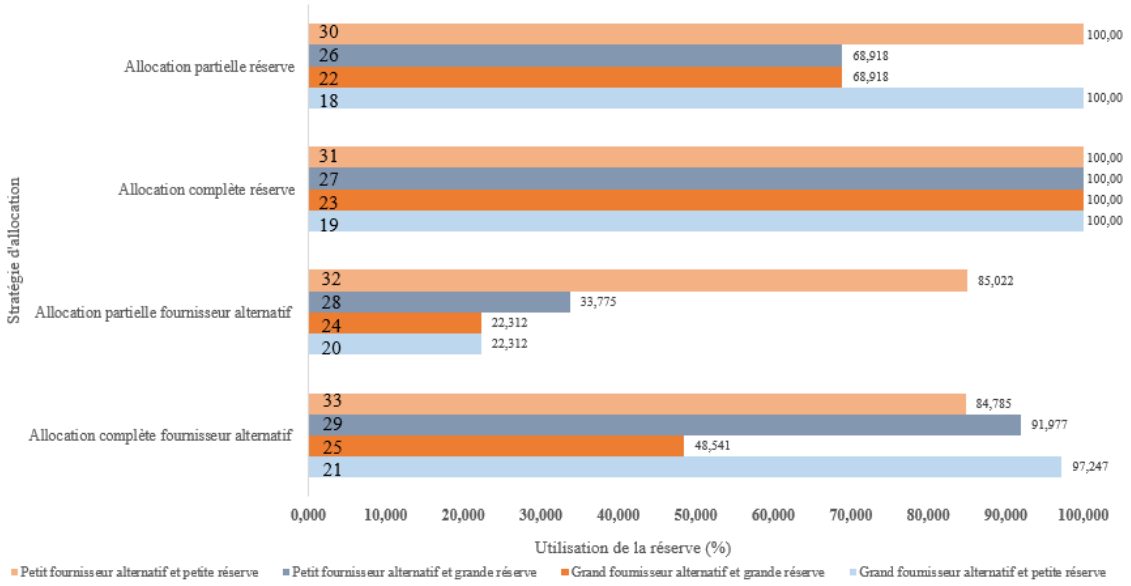



*Figure 6.6 Proportion de l'utilisation moyenne de la réserve des stratégies à deux sources alternatives avec intervalle de confiance de 95%*

### *6.3.3 La répartition des commandes*

Dans cette section, nous souhaitons étudier l'allocation de la demande entre nos différentes sources d'approvisionnement lorsque nous disposons de trois sources disponibles. Dans la figure 6.7 ci-bas est représentée l'allocation des commandes entre les différentes sources.

Dans un premier temps, nous constatons que dans la majorité des stratégies, on sollicite le fournisseur traditionnel en moyenne pour plus de 40% de la quantité commandée, ce qui représente une répartition relativement équitable entre la source d'approvisionnement traditionnelle et les sources alternatives. Deux stratégies comportent uniquement deux barres de couleur, soit celles relatives à l'allocation partielle à la source alternative en sollicitant la réserve en premier lieu. Par conséquent, la capacité disponible dans la réserve nous permet de satisfaire la demande, et ce, sans nécessiter l'utilisation d'un fournisseur alternatif.

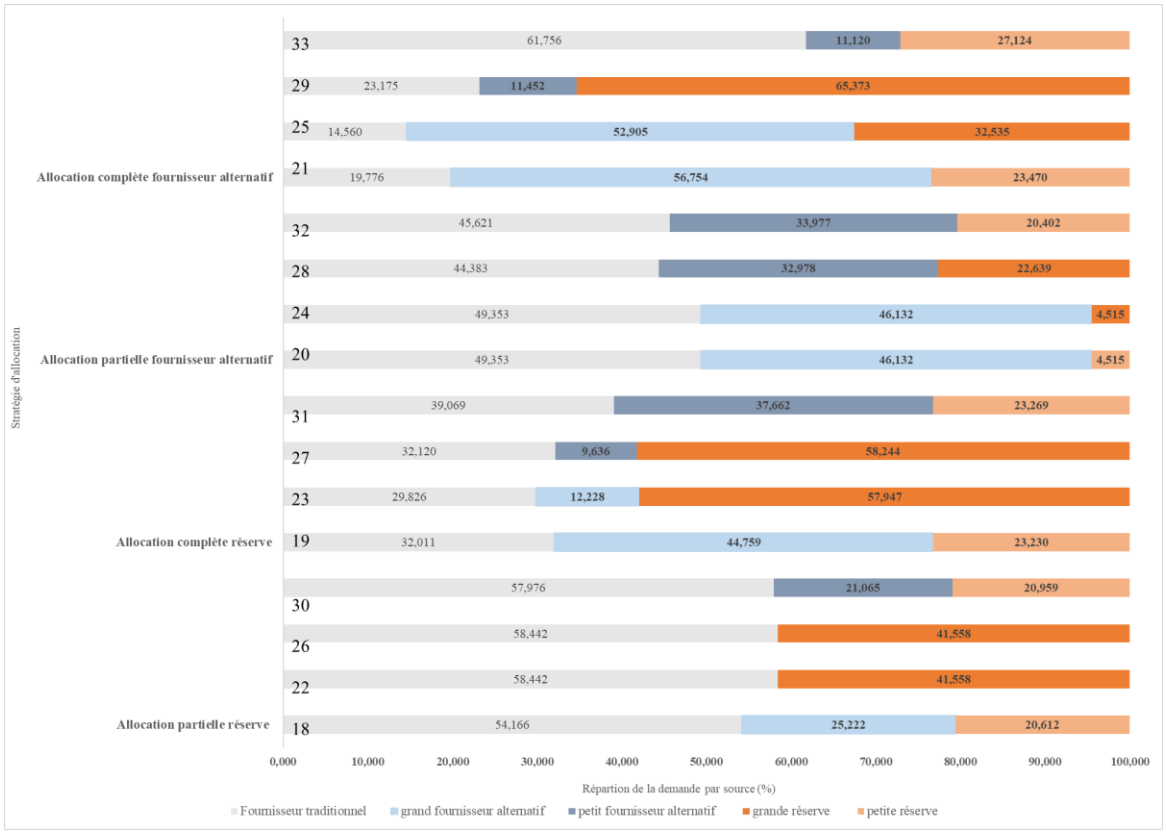



*Figure 6.7 Proportion des commandes moyennes réparties* entre le fournisseur traditionnel, le fournisseur alternatif et la réserve

La stratégie d'allocation complète en s'approvisionnant d'abord auprès du fournisseur alternatif n'est pas efficiente considérant cet indicateur, car on transfère le phénomène de dépendance à nos sources alternatives, alors que celles-ci finiront par être désactivées. Lorsque le fournisseur alternatif dispose d'une grande capacité, c'est sur lui que repose la majorité de la demande comme sa capacité renouvelable permet d'assurer une partie importante de la demande. À l'opposé, lorsque celui-ci voit sa capacité réduite de moitié, la quantité commandée dépasse sa capacité de production hebdomadaire, ce qui en résulte par une utilisation plus importante de la réserve.

### *6.3.4 Les pénuries*

Sur les 16 stratégies disposant de deux sources alternatives présentées dans la Figure 6.8, six d'entre elles enregistrent en moyenne moins de 6% du temps en pénuries de stock, ce qui signifie que lorsqu'une demande est enregistrée, le stock physique disponible réussit dans la majorité des cas à satisfaire la totalité de la demande. Parmi ces stratégies se

trouvent les stratégies qui allouent partiellement la demande à la réserve en premier lieu. Notamment, lorsqu'une grande réserve et un grand fournisseur alternatif sont disponibles, la totalité de la demande est redirigée vers la réserve avec un délai de livraison minime, ce qui permet d'éliminer complètement les pénuries.

En ce qui concerne les stratégies sollicitant plutôt le fournisseur alternatif dans un premier temps, on observe un taux de pénuries nettement plus élevé dû au délai de livraison du fournisseur alternatif. Même si la quantité lui étant commandée est conséquente, les livraisons ne sont pas assez rapides pour répondre à la croissance exponentielle de la demande. La stratégie 33 propose le pire niveau de temps de pénuries, soit 50,969% et se rapproche même au taux de temps de pénuries enregistré dans le modèle initial, qui était de 56,500%.

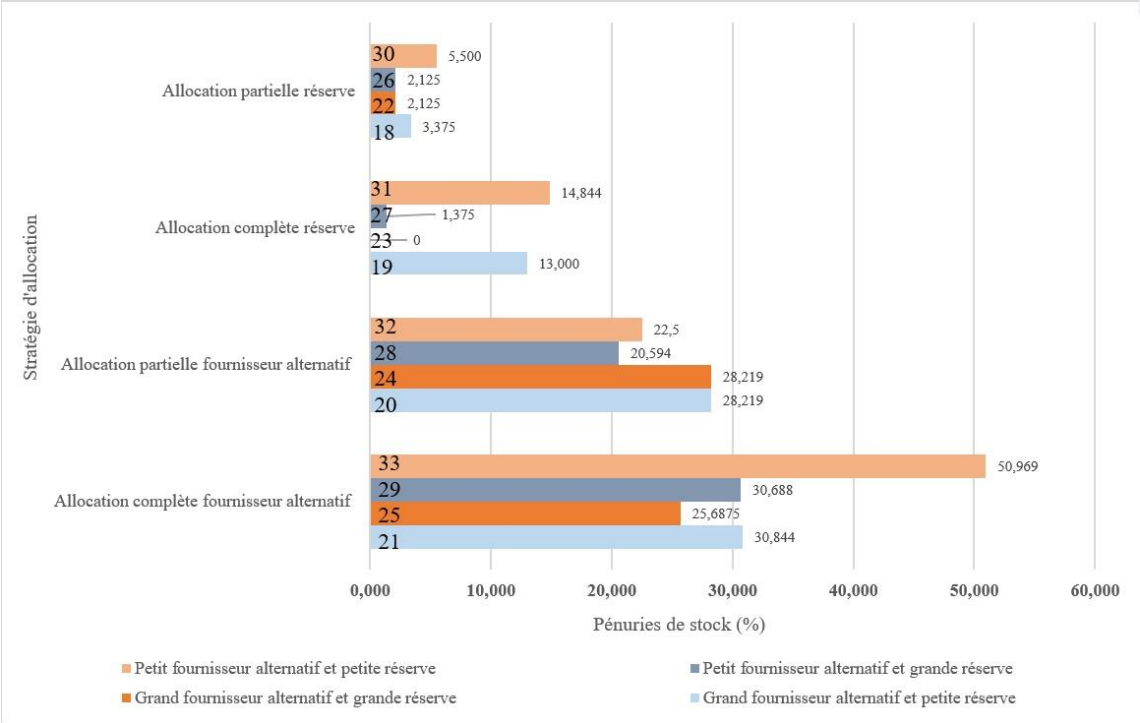



*Figure 6.8 Proportion du temps en pénurie des stratégies à deux sources alternatives*

Ainsi, les stratégies qui sollicitent le fournisseur alternatif en premier lieu enregistrent de moins bons résultats en termes de pénuries que lorsque l'on repose d'abord sur la réserve.

### *6.3.5 Le stock final*

Le tableau 6.3 représente les différents niveaux de stock physique final des stratégies à deux sources alternatives. La stratégie d'allocation complète au fournisseur alternatif en premier lieu enregistre des niveaux de stock final nettement moins élevés que les trois autres stratégies, étant donné qu'on sollicite surtout le fournisseur alternatif. Les niveaux de stock final sont généralement supérieurs aux niveaux enregistrés lorsqu'une source alternative est disponible, mais sans excéder le niveau de stock initial. Le stock physique devrait donc être en mesure de s'écouler avec la reprise normale de la demande de masques N95.

Tableau 6.3 Répartition des stratégies à deux sources alternatives selon leur stock final moyen avec intervalle de confiance de 95%

| Stratégie | # de la stratégie | Source alternative disponible | Stock final | Intervalle inférieur | Intervalle supérieur |
|---|---|---|---|---|---|
| **Allocation partielle réserve** | 18 | GFA + PR | 75302,8 | 68169,5 | 82436,1 |
| | 22 | GFA + GR | 49082,0 | | |
| | 26 | PFA + GR | 49082,0 | | |
| | 30 | PFA + PR | 67967,6 | 62230,0 | 73705,3 |
| **Allocation complète réserve** | 19 | GFA + PR | 38252,9 | 30991,7 | 45514,1 |
| | 23 | GFA + GR | 29575,0 | | |
| | 27 | PFA + GR | 2562,0 | 2114,7 | 3009,3 |
| | 31 | PFA + PR | 37954,2 | 34477,0 | 41431,5 |
| **Allocation partielle fournisseur alternatif** | 20 | GFA + PR | 24603,6 | 14884,7 | 34322,4 |
| | 24 | GFA + GR | 24603,6 | 14884,7 | 34322,4 |
| | 28 | PFA + GR | 25366,5 | 21329,1 | 29403,9 |
| | 32 | PFA + PR | 17836,4 | 13902,7 | 21770,1 |
| **Allocation complète fournisseur alternatif** | 21 | GFA + PR | 6781,7 | 4929,7 | 8633,8 |
| | 25 | GFA + GR | 9571,0 | 7404,0 | 11738,0 |
| | 29 | PFA + GR | 5616,7 | 3894,6 | 7338,7 |
| | 33 | PFA + PR | 7484,8 | 5608,5 | 9361,1 |

Pour finir, les résultats présentés dans le présent chapitre nous permettront de formuler des recommandations pour les gestionnaires du réseau de la santé. Nous discuterons ainsi dans le chapitre suivant des principaux résultats observés afin d'en tirer des conclusions.

# Chapitre 7 Développement d'une approche de simulation : La discussion des résultats

Les indicateurs de performance évalués nous ont permis de mesurer l'efficience des stratégies d'allocation de la demande choisies. Nous discuterons des principaux constats dans ce chapitre et reviendrons sur la littérature existante sur le sujet dans le but d'en tirer des généralités.

Dans un premier temps, disposer simultanément de deux sources alternatives est préférable en contexte de crise sanitaire. En effet, la probabilité que tous les fournisseurs soient perturbés au même moment est faible; le risque de perturbation est donc réduit. À première vue, les indicateurs de performance relatifs à la demande perdue et aux pénuries présentent de meilleurs résultats lorsque la réserve est utilisée en premier lieu. En effet, comme les fournisseurs et la réserve n'ont pas les mêmes délais de livraison, la réserve peut desservir les établissements hospitaliers dans un délai maximal de deux jours, alors que le fournisseur alternatif peut prendre jusqu'à deux semaines pour desservir les établissements hospitaliers. Néanmoins, comme la répartition des commandes est plus équitable, le risque est mieux partagé entre les sources d'approvisionnement lorsque le fournisseur alternatif est utilisé en premier lieu.

Lors de la recension des écrits, nous avons relevé que plusieurs fournisseurs peuvent être perturbés en même temps. Dans la situation actuelle, nous faisons face à un risque semi-super alors qu'un nombre important de fournisseurs situés en Chine ont été perturbés au même moment. Ainsi, la réserve pourrait ici servir de source d'approvisionnement le temps que les fournisseurs rétablissent leur production. Dans une logique de gestion de risque dans la chaîne d'approvisionnement, nous recommandons aux gestionnaires de la santé de ne pas épuiser complètement la réserve en premier lieu. De cette manière, nous prévenons les perturbations futures et profitons pleinement des capacités de chaque source d'approvisionnement. Enfin, lorsque la réserve est utilisée efficacement, le fournisseur traditionnel a beaucoup plus de temps pour revoir ses capacités de production et faire certains investissements pour les augmenter.

Une réserve composée d'une capacité suffisante arrive à elle seule, lorsqu'elle est utilisée adéquatement, à minimiser les demandes perdues et les pénuries. Comme la contrainte de capacité de la réserve est totale, nous ne disposons d'aucune limite quant à la quantité hebdomadaire commandée à la réserve, en autant qu'elle dispose de la quantité disponible. Certes, la capacité utilisée de la réserve sera importante, mais elle respecte l'objectif de mise en place d'une réserve. De plus, le fournisseur traditionnel reste la source d'approvisionnement principale, mais le phénomène de dépendance diminue alors qu'on dispose d'une réserve pour le réapprovisionnement de nos établissements hospitaliers. Cependant, comme une réserve possède une capacité non renouvelable, sa capacité doit être suffisante pour supporter l'accroissement de la demande sur l'ensemble d'une vague de COVID-19. Si sa capacité n'est pas suffisante, elle reste pertinente, mais doit être combinée à une nouvelle source alternative.

De plus, la réserve dispose d'un délai de livraison nettement inférieur aux fournisseurs disponibles. Elle arrive donc à répondre à la demande des établissements hospitaliers sans qu'un délai important de réapprovisionnement ne soit observé. Les travailleurs de la santé disposeront donc du matériel médical nécessaire à la délivrance des soins la majorité du temps. Ils n'auront donc pas à se livrer à des politiques de réutilisation et de rationnement des masques, ce qui limitera de concert la contamination. Ainsi, dans la mesure où les autorités sanitaires sont prêtes à assumer les investissements relatifs à la mise en place, la gestion et l'approvisionnement conséquent d'une réserve d'ÉPI, c'est une stratégie à prioriser lorsque l'on fait face à une crise sanitaire. Généralement, les stratégies disposant d'une réserve comme source alternative unique reposent en grande majorité sur leur fournisseur traditionnel, mais disposent d'une source alternative aidant à combattre l'accroissement de la demande, ce qui est légitime étant donné qu'une réserve est mise en place dans le but de combler le manque de production pour une période limitée.

D'autre part, un fournisseur alternatif seul, indépendamment de sa capacité, arrive à minimiser les pénuries et la demande perdue en plus de représenter une répartition plus équitable de la demande avec le fournisseur traditionnel que lorsque l'on dispose d'une réserve. Effectivement, comme le fournisseur alternatif dispose de capacités renouvelables, il est mieux armé pour répondre aux fluctuations de la demande. De plus,

il engendre des coûts de transaction généralement moins importants que l'instauration d'une réserve et peut être désactivé simplement en arrêtant d'y faire appel. En général, l'utilisation d'un fournisseur alternatif relève de meilleurs résultats peu importe sa capacité alors que la réserve doit forcément détenir une grande capacité pour enregistrer de bons résultats. L'approvisionnement auprès d'un fournisseur alternatif présente moins de contraintes et répartit mieux la demande entre les sources alternatives. Ultimement, nous recommandons au gestionnaire de prioriser un fournisseur alternatif s'il se trouvait face au choix d'une source alternative unique.

Dans un deuxième temps, l'analyse des stratégies d'allocation de la demande nous a permis de relever les meilleures stratégies selon le contexte de crise sanitaire. Deux stratégies peuvent être mises de l'avant, soit la stratégie d'allocation partielle de la demande à la source alternative et la stratégie d'allocation selon les fluctuations de la demande.

Intuitivement, nous sommes portés à penser que les deux stratégies présenteront des conclusions similaires alors que la stratégie d'allocation de la demande selon les fluctuations de la demande enregistre environ 10% moins de pénuries et de demande perdue que la stratégie d'allocation partielle. En effet, comme on active le fournisseur alternatif en fonction de l'observation des tendances de la demande au lieu de dépendre du niveau cible, cette contrainte additionnelle en résulte par une augmentation des commandes placées au fournisseur traditionnel. Par conséquent, comme le délai de livraison du fournisseur traditionnel est plus rapide, le stock de masques des établissements hospitaliers est plus rapidement renfloué et le stock physique se retrouve moins souvent vide que dans la stratégie d'allocation partielle. Dans la stratégie d'allocation partielle, on repose plus sur le fournisseur alternatif et on lui commande une quantité plus importante à chaque commande, certes comme le délai de livraison du fournisseur alternatif est de 7 à 14 jours, il arrive fréquemment que nous recevions une autre demande avant même qu'une commande ne soit reçue. Le niveau des stocks est donc plus à risque d'être nul en sollicitant davantage le fournisseur alternatif.

Ainsi, la stratégie d'allocation partielle propose une meilleure utilisation de la réserve et une meilleure répartition des commandes entre les sources d'approvisionnement disponibles alors que la stratégie d'allocation selon les fluctuations de la demande minimise quant à elle davantage les pénuries et la demande perdue. Il reste donc à déterminer quel indicateur de performance domine dans la prise de décision. Comme les conséquences découlant de l'accumulation de pénuries et de demande perdue peuvent avoir un impact sur la délivrance des soins, ce sont des indicateurs décisifs. Nous recommandons donc aux gestionnaires de la santé de favoriser la stratégie relative aux fluctuations de la demande dans un contexte de crise sanitaire.

D'autre part, la stratégie d'allocation complète de la demande à la source alternative proposée transfère le phénomène de dépendance aux sources alternatives. En effet, si cette source majoritairement sollicitée est perturbée, nous n'arriverons plus à répondre à la demande croissante de matériel médical. Comme l'idée dominante dans la prise de décision est plutôt de diversifier ses sources d'approvisionnement tout en sollicitant celles déjà existantes, cette stratégie ne peut être considérée comme efficiente, d'autant plus que le fournisseur alternatif sera dorénavant désactivé lorsque la demande de matériel médical reprendra son cours normal. Il est possible qu'en arrêtant de solliciter le fournisseur traditionnel pour qu'il se concentre dans l'amélioration de ses capacités, il puisse nous garantir une capacité supplémentaire sur le long terme. Par contre, dans le cas où nous faisons face à une pandémie et que nous devons répondre dans l'urgence à la montée de la demande, nous ne pouvons nous permettre de ne pas solliciter au maximum toutes les sources s'offrant à nous. Accepter la nouvelle dépendance aux sources alternatives signifierait donc qu'on devrait également accepter de poursuivre une relation avec ces sources lorsque la demande redevient normale ce qui n'est pas souhaité étant donné les coûts relatifs à ces transactions.

Au regard de la littérature, Berger et al. (2004) avaient amorcé la discussion sur l'arbitrage entre le risque et le coût auquel nous faisons également face dans notre contexte actuel. D'un côté se trouvait le coût d'opération d'interagir avec plusieurs fournisseurs et de l'autre côté se trouvait la perte financière résultant d'une perturbation des fournisseurs. Dans notre recherche, l'arbitrage central diffère un peu alors que la discussion est plutôt

entre le coût de solliciter une/des sources alternatives par rapport aux conséquences découlant d'une perturbation sur la délivrance des soins. Dans notre contexte, c'est plutôt la minimisation des risques qui devrait prôner sur la diminution des coûts. Chen et al. (2012) se sont également penchés sur l'utilisation de fournisseurs alternatifs en période de perturbation et ont stipulé que durant une période de perturbation, la capacité de production du fournisseur alternatif doit uniquement satisfaire la demande maximale et il devient de moins en moins nécessaire à mesure que les coûts relatifs à opérer ce fournisseur augmentent. Notre analyse propose des résultats similaires alors que notre fournisseur alternatif est surtout utile lorsqu'on enregistre une augmentation drastique de la demande, raison pour laquelle nous souhaitions le désactiver lorsqu'il ne devient plus nécessaire, d'autant plus qu'il propose des coûts de transactions supérieurs au fournisseur traditionnel.

Enfin, les résultats présentés nous ont permis de formuler quelques recommandations aux gestionnaires du réseau de la santé en matière d'approvisionnement en temps de crise. En résumé, autant la mise en place d'une réserve que d'un fournisseur alternatif sont des stratégies pertinentes en cas de crise d'autant plus lorsqu'il est possible de disposer de ces deux sources au même moment. La meilleure stratégie d'allocation s'est avérée l'allocation en fonction des fluctuations de la demande comme elle minimise les indicateurs primordiaux dans la prise de décision. Le mémoire comporte notamment quelques limites qui seront adressées dans la section suivante. Nous y proposerons également des pistes de recherche pour des travaux futurs.

# Conclusion

Dans ce mémoire, nous souhaitions relever les meilleures pratiques à adopter en termes d'approvisionnement stratégique en équipement de protection individuel dans le contexte d'une crise sanitaire. Dans notre cas, c'est la pandémie relative à la maladie à coronavirus qui représente la crise à l'étude. Avec les leçons tirées de la première vague de COVID-19, les autorités ont mis en place une réserve nationale d'ÉPI pour répondre aux besoins des établissements hospitaliers à travers le Canada. Par conséquent, nous souhaitions aussi analyser cette stratégie de réserve nationale afin de comprendre comment l'utiliser pour les crises à venir. Nous avons orienté nos recherches vers le masque N95 comme c'est l'ÉPI qui comporte encore aujourd'hui le plus d'enjeux d'approvisionnement.

Afin de présenter les meilleures stratégies à favoriser en contexte de crise, nous avons d'abord présenté la littérature existante sur le sujet. Nous avons ensuite établi notre cadre conceptuel dans le but de répondre à cet objectif. Nous avons pris la décision d'utiliser la simulation à évènements discrets comme outil d'analyse. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel de simulation Arena qui nous a permis de représenter 33 stratégies étudiées. Nous avons notamment collecté des données afin de peupler notre modèle de simulation. Étant donné le manque de données sur le sujet, nous avons dû en générer aléatoirement. Une fois les stratégies modélisées dans le logiciel de simulation, nous avons extraits les résultats. Afin d'analyser ces résultats, nous avons établi des indicateurs de performance pour nous permettre d'évaluer la qualité des différentes stratégies. Les résultats recueillis nous ont donc permis de formuler quelques recommandations quant aux stratégies d'approvisionnement à mettre de l'avant lorsque nous faisons face à une crise sanitaire.

Ultimement, disposer d'une réserve et d'un fournisseur alternatif simultanément minimise le risque, les pénuries et les demandes perdues. Nous proposons donc au gestionnaire de solliciter toutes les sources alternatives disponibles afin de répondre à la demande croissante d'ÉPI, bien entendu lorsque le budget le permet. D'une part, si le gestionnaire trouve un fournisseur alternatif pour satisfaire la demande croissante d'ÉPI, ces capacités renouvelables seront à son avantage peu importe sa capacité. Nous recommandons donc aux gestionnaires de favoriser ce choix, le cas échéant et d'utiliser ce fournisseur alternatif

selon les fluctuations de la demande. D'autre part, les résultats nous permettent également de mettre en lumière la pertinence de détenir une réserve d'ÉPI et d'en proposer une utilisation optimale. Nous recommandons donc également aux gestionnaires d'activer la réserve selon les fluctuations de la demande. Lorsqu'utilisée de cette manière, une réserve composée d'une capacité suffisante arrive à elle seule à minimiser les demandes perdues et les pénuries. Si sa capacité n'est pas suffisante, elle reste pertinente, mais doit être combinée à une nouvelle source alternative. Ainsi, si le gestionnaire dispose de sources alternatives additionnelles, nous recommandons que la réserve soit utilisée en dernier recours, soit lorsque les sources alternatives n'arrivent elle non plus pas à satisfaire la demande croissante d'ÉPI.

Les leçons tirées de la pandémie de COVID-19 ont donc permis d'illustrer l'importance de gérer les risques dans la chaîne d'approvisionnement et permettront sans doute de revoir les critères déterminants en matière d'approvisionnement stratégique dans le secteur de la santé. Alors que le secteur de la santé québécois est souvent contraint à la minimisation des coûts aux dépens de la minimisation du risque de perturbation, il reste cependant énormément de progrès à faire dans le domaine et ce changement ne pourra se produire qu'avec un changement de mentalité et des investissements considérables en matière d'approvisionnement stratégique.

Bien entendu, notre modèle de simulation comporte certaines limites qui se doivent d'être adressées. D'abord, les données relatives aux demandes hebdomadaires de masques N95 ne sont pas réelles. Nous les avons simulées en fonction de deux types de données trouvées dans la littérature. D'une part, nous avons trouvé la consommation de masques N95 dans les établissements hospitaliers du Canada pour quelques mois entre 2020 et 2022. Pour assurer une tendance réaliste à ces données, nous nous sommes basés sur la courbe d'hospitalisations en lien avec la COVID-19 dans les établissements hospitaliers canadiens sur la même période. Ainsi, il est possible que les données simulées ne correspondent pas exactement à la demande réelle des établissements hospitaliers.

Enfin, le seul ÉPI considéré dans ce mémoire a été le masque N95, comme c'est l'ÉPI qui a rencontré le plus d'enjeux d'approvisionnement lors de la pandémie. Ainsi, nous

pouvons reprendre la même logique et l'adapter à d'autres ÉPI, mais il est possible qu'on ne désire pas des stratégies d'allocation aussi drastiques avec des ÉPI moins complexes, ce qui doit être pris en compte si on veut généraliser l'étude proposée pour l'allocation de la demande d'autres ÉPI ou de matériel médical. Les conclusions tirées de ce mémoire peuvent être appliquées à d'autres ÉPI moins complexes en modifiant certains paramètres. Par contre, comme les paramètres sont propres à la deuxième vague de COVID-19 au Canada, il est possible que les conclusions changent si ces paramètres sont modifiés.

Ultimement, il serait intéressant d'exposer les résultats obtenus à des gestionnaires du secteur de la santé pour nous assurer que ces derniers représentent bien la réalité, mais pour les fins du mémoire, les résultats n'ont pas été présentés. Pour des pistes de recherche futures, il serait pertinent de voir si les mêmes constats seraient observés avec des paramètres différents, car les stratégies dites optimales dépendent des paramètres du modèle, comme les capacités de production des fournisseurs ou encore les politiques de gestion de stock. Il serait d'autant plus intéressant de voir si en utilisant la demande d'autres vagues de COVID-19 ou d'autres crises sanitaires, les mêmes conclusions pourraient être tirées. De plus, comme il est possible que certaines stratégies d'allocation de la demande n'aient pas été abordées dans ce mémoire, rien n'empêche dans de futurs travaux de reprendre les hypothèses et le cadre conceptuel et de tester d'autres stratégies afin de voir si elles enregistreraient de meilleurs résultats.

# Bibliographie


Aguezzoul, Aicha et Pierre Ladet (2006). « Sélection et évaluation des fournisseurs: Critères et méthodes ». *Revue française de gestion industrielle*, vol. 2, p.5-27.

Alcalde, José, and Matthias Dahm. (2019). "Dual Sourcing with Price Discovery", *Games and Economic Behavior*, vol.115, p.225-246.

Alsolami, Fawaz J. (2020). "Measuring the Performance of Inventory Management System Using Arena Simulator", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no 6, p.186–193.

Axsater, Sven (2015). *Inventory Control,* 3rd Edition, Springer.

Beaulieu, Martin et al. (2021) *L'appui des fournisseurs non traditionnels pour la production d'équipement de protection individuelle : Une Enquête Québécoise,* rapport, Montréal, Centre sur la productivité et la prospérité Fondation Walter-J.-Somers, École des hautes études commerciales.

Bensaou, M. (1999). "Portfolios of buyer-supplier relationships", *MIT Sloan Management Review*, vol 40, no 4, p.35-44.

Berger, Paul D. et al. (2004). "How Many Suppliers Are Best? A Decision-Analysis Approach", *Omega,* vol 32, p.9-15.

Blanchet, Catherine (2021). « Résilience des chaînes logistiques : quelles leçons tirer du secteur de la santé? », conférence présentée par le Carrefour logistique, le Pôle Santé HEC Montréal et MEDTECH, 11 juin, Évènement Zoom.

Bohner, Christian, and Stefan Minner. (2017). "Supplier Selection under Failure Risk, Quantity and Business Volume Discounts" *Computers & Industrial Engineering*, vol 104, p.45-55.

Boily, Daniel et Florian Cruzille (2020, 27 mai). « Medicom installe son usine de masques N95 à Saint-Laurent », *Radio-Canada,* Récupéré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1706573/medicom-usine-masques-n95-saint-laurent-coronavirus-covid-19

Burke, Gerard J. et al. (2008). "Heuristics for Sourcing from Multiple Suppliers with Alternative Quantity Discounts." *European Journal of Operational Research,* vol 186, p.317-329.

Caro, Jaime J. et al. (2015). *Discrete Event Simulation for Health and technology Assessment,* First Edition, New York, CRC Press.

Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (2022). *COVID-19 et équipement de protection individuelle (ÉPI)*, Gouvernement du Canada, Récupéré le 11 avril 2022 de https://www.cchst.ca/covid19/ppe/#use-of-ppe-hdr

Chen, Junlin, Xiaobo Zhao, and Yun Zhou. (2012). "A Periodic-Review Inventory System with a Capacitated Backup Supplier for Mitigating Supply Disruptions", *European Journal of Operational Research*, vol 219, no 2, p.312-323.

Chen, Toly, Yu-Cheng Wang, and Hsin Chieh Wu (2021). "Analyzing the Impact of Vaccine Availability on Alternative Supplier Selection amid the Covid-19 Pandemic: A Cfgm-Ftopsis-Fwi Approach", *Healthcare (Switzerland*, 9, 71.

De Boer, Luitzen, Eva Labro and Pierangela Morlacchi (2001). "A Review of Methods Supporting Supplier Selection", *European Journal of Purchasing and supply management, vol* 7, p.75-89.

Dickson, Gary W (1966). "An Analysis of Vendor Selection Systems and Decisions", *Journal of Purchasing*, vol. 2, no 1, p.28-41.

Duchaine, Hugo (2020, 27 décembre). « Pas assez de masques N95 dans la réserve au Québec », Journal de Montréal, Actualité Santé. Récupéré de https://www.journaldemontreal.com/2020/12/27/pas-assez-de-masques-n95-dans-la-reserve

Dupont, Lionel, Christophe Bernard, Faiza Hamdi, and Faouzi Masmoudi. (2018). "Supplier Selection under Risk of Delivery Failure: A Decision-Support Model Considering Managers' Risk Sensitivity", *International Journal of Production Research, vol.* 56, no 3, p.1054-1069.

Esmaeili-Najafabadi, Elham et al. (2019). "A Joint Supplier Selection and Order Allocation Model with Disruption Risks in Centralized Supply Chain." *Computers and Industrial Engineering*, vol. 127, p.734-748.

Fache, James R. Francis (2020). "COVID-19: Implications for Supply Chain Management." *Frontiers of health services management*, vol. 37, no 1, p.33-38.

Fan, Di et al. (2022). "Impact of the US–China trade war on the operating performance of US firms: The role of outsourcing and supply base complexity", *Journal of Operations Management*, vol. 68, p.928-962.

Gauthier, Maxime (2022). *Nombre de personnes décédées à cause du coronavirus (COVID-19) dans le monde au 28 novembre 2022, par pays*, Statista, Récupéré le 1er décembre 2022 de https://fr.statista.com/statistiques/1101324/morts-coronavirus-monde/

Gerbet, Thomas (2020, 15 décembre), « Panique à Québec : dans les coulisses de la course aux masques », Radio-Canada, Santé, politique provinciale, Récupéré de

https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1757147/chronologie-quebec-pandemie-penurie-ministere-arruda

Gereffi, Gary. (2020). "What Does the COVID-19 Pandemic Teach Us about Global Value Chains? The Case of Medical Supplies." *Journal of International Business Policy*, vol. 3, p.287-301.

Görener, Ali. (2012). "Comparing AHP and ANP: An Application of Strategic Decisions Making in a Manufacturing Company*", International Journal of Business and Social Science*, vol. 3, no. 11, p.194-208.

Gouvernement de l'Ontario (2021). *Les masques N95 fabriqués en Ontario commencent à émerger de la chaîne de production de l'usine 3M de Brockville*, Récupéré de https://news.ontario.ca/fr/release/61028/les-masques-n95-fabriques-en-ontario-commencent-a-emerger-de-la-chaîne-de-production-de-lusine-3m-de-brockville

Gouvernement du Canada (2021*). Prévention de la propagation des variantes de la COVID-19*, Récupéré de https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/rapports-publications/releve-maladies-transmissibles-canada-rmtc/numero-mensuel/2021-47/numero-7-8-juillet-aout-2021/covid-19-variantes.html

Gouvernement du Canada (2022). *Masques médicaux et respirateurs utilisés pour la lutte contre la COVID-19 : Renseignements pour les professionnels de la santé*, Récupéré de https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/medicaments-produits-sante/covid19-industrie/instruments-medicaux/equipement-protection-individuelle/masques-medicaux-respirateurs/professionnels-sante.html

Gouvernement du Québec (2022). *Ligne du temps COVID-19 au Québec*, Institut national de santé publique du Québec, Récupéré de https://www.inspq.qc.ca/covid-19/donnees/ligne-du-temps

Hamdi, Faiza, Ahmed Ghorbel, Faouzi Masmoudi, and Lionel Dupont. (2018). "Optimization of a Supply Portfolio in the Context of Supply Chain Risk Management: Literature Review", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 29, no 4, p.763-788.

Hamdi, Faiza. (2017). *Optimisation et Planification de l'approvisionnement en présence du risque de rupture des fournisseurs*, [thèse de doctorat], Toulouse, Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées.

Ho, William et al. (2015). "Supply chain risk management : a literature review", *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 16, p.5031-5069.

Hosseininasab, Amin and Abbas Ahmadi. (2015). “Selecting a Supplier Portfolio with Value, Development, and Risk Consideration”, *European Journal of Operational Research,* vol. 245, no 1, p.146-156.

Hu, Shaolong, and Zhijie Sasha Dong. (2019). “Supplier Selection and Pre-Positioning Strategy in Humanitarian Relief”, *Omega*, vol. 83, p.287-298.

Ivanov, Dmitry. (2020). “Predicting the Impacts of Epidemic Outbreaks on Global Supply Chains: A Simulation-Based Analysis on the Coronavirus Outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) Case”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 136.

Kabadayi, Nihan, and Mohammad Dehghanimohammadabadi. (2022). “Multi-Objective Supplier Selection Process: A Simulation–Optimization Framework Integrated with MCDM”, *Annals of Operations Research,* vol 319, p.1607-1629.

Kalwani, Manohar U, and Narakesari Narayandas. (1995). “Long-Term Manufacturer-Supplier Relationships: Do They Pay Off for Supplier Firms?”, *Journal of Marketing,* vol.59, no 1, p.1-16.

Kelton, David, Randall Sadowski and Nancy Zupick. (2015). *Simulation with Arena,* 6th Edition, McGraw Hill Education.

Labrecque, Annie (2020, 11 mars). « COVID-19 : L’OMS déclare l’état de pandémie », *Québec Science*, Santé, Récupéré de https://www.quebecscience.qc.ca/sante/covid-19-oms-pandemie/?doing_wp_cron

Laing, Scott, et Ellen Westervelt (2020). « Réserve nationale stratégique d’urgence du Canada : Une nouvelle stratégie à long terme s’impose », *Canadian Medical Association Journal,* vol. 192, no 47, p.810-811.

Larousse (2021). *Pandémie*, Encyclopédie Larousse, Récupéré le 12 juin 2022 de https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/pand%C3%A9mie/15117

Larson, Paul D. and Jack D. Kulchitsky (1998). “Single sourcing and Supplier Certification: Performance and Relationship Implications”, *Industrial Marketing Management,* vol. 27., no 1, p.73-81.

Law, Averill M. (2015). *Simulation modeling and analysis,* 5th Edition, Mc Graw Hill Education.

Li, Pengfei (2020). *INTE60016.H202 – Gestion des réseaux d’affaires internationaux,* Séance 2, Chaîne de valeur, [présentation PowerPoint], HEC Montréal.

Mavi, Reza Kiani, Mark Goh and Neda Kiani Mavi. (2016). “Supplier Selection with Shannon Entropy and Fuzzy TOPSIS in the Context of Supply Chain Risk Management”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. p.*216-225.

Meena, P L, and S P Sarmah. (2013). “Multiple Sourcing under Supplier Failure Risk and Quantity Discount: A Genetic Algorithm Approach”, *Transportation Research Part E,* vol.50, p.84-97.

Meena, P L, S P Sarmah, and A Sarkar. (2011). “Sourcing Decisions under Risks of Catastrophic Event Disruptions”, *Transportation Research Part E,* vol. 47, no 6, p.1058-1074.

Meena, Purushottam Lal, and Sarada Prasad Sarmah. (2016). “Supplier selection and demand allocation under supply disruption risks”, vol. 83, p.265-274.

Nekooie, Mohammad Ali et al. (2015). “Supplier Selection Considering Strategic and Operational Risks: A Combined Qualitative and Quantitative Approach.” *Production Engineering* vol. 9, p.665-673.

Pazhani, Subramanian, José A. Ventura and Abraham Mendoza (2016). “A serial inventory system with supplier selection and order quantity allocation considering transportation costs”, *Applied Mathematical Modelling,* vol. 40, p.612-634.

Ravindran, A Ravi, R Ufuk Bilsel, Vijay Wadhwa, and Tao Yang. (2010). “Risk Adjusted Multicriteria Supplier Selection Models with Applications”, *International Journal of Production Research,* vol. 48, no 2, p.405-424.

Rédaction de Futura (2021). *Crise sanitaire : qu’est-ce que c’est?,* Futura Sciences, Récupéré le 15 septembre 2021 de https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/pandemie-crise-sanitaire-19283/

Rockwell Automation. (2017). “Getting Started with Arena”, guide d’utilisation, *Rockwell Automation*.

Ruiz-Torres, Alex J, and Farzad Mahmoodi. (2007). “The Optimal Number of Suppliers Considering the Costs of Individual Supplier Failures”, *Omega,* vol. 35, p.104-115.

Sarkar, Ashutosh and Pratap K.J. Mohapatra (2009). “Determining the optimal size of supply base with the consideration of risks of supply disruptions”, *International Journal of Production Economics,* vol. 119, p.122-135.

Sarkar, Ashutosh et al. (2013). “Single or Multiple Sourcing: A Method for Determining the Optimal Size of the Supply Base”, *Technology Operation Management,* vol. 3, p.17-31.

Sarkar, Ashutosh, Pratap K.J. Mohapatra and Anurag Chaudhary (2013). “Single or Multiple Sourcing: A Method for Determining the Optimal Size of the Supply Base”, *Technology Operation Management,* vol. 3, p.17-31.

Schniederjans, Marc J, Ashlyn M Schniederjans and Dara G Schniederjans (2005). *Outsourcing and Insourcing in an International Context*, First Edition, New York, M.E. Sharpe.

Services publics et Approvisionnement Canada (2020). *Approvisionnement : Les comité plénier – juin 17 2020*, Récupéré de https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/trans/documentinfo-briefingmaterial/lcp-cow/2020_06_17/p3-fra.html

Shah, Bhavin, Pankaj Dutta, Angappa Gunasekaran, and Surendra Kansara. (2022). “Guest Editorial: Sourcing Strategies and Supply Chain Operations under the Impact of COVID-19”, *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, vol. 15, no 2, p.145-150.

Snowdon, Anne W. et al. (2021). “Key Characteristics of a Fragile Healthcare Supply Chain: Learning from a pandemic”, *Healthcare Quarterly,* vol. 24, no 1, p.36-43.

Vonderembse, Mark, A. (1999). “The Impact of Supplier Selection Criteria and Supplier Involvement on Manufacturing Performance”, *Journal of Supply Chain Management*, vol. 35, no 3, p.33-39.

Vonderembse, Mark, Michael Tracey, Chong Leng Tan and Edward J. Bardi (1995). “Current purchasing practices and JIT: some of the effects on inbound logistics”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics,* vol. 25, no 3, p.33-48.

Weber, Charles A, John R. Current and W. C. Benton (1991). “Vendor selection criteria and methods”, *European Journal of Operational Research*, vol. 50, no 1, p.2-18.

Wu, Desheng. (2009). “Supplier Selection: A Hybrid Model Using DEA, Decision Tree and Neural Network.” *Expert Systems With Applications*, vol. 36, no 5, p.9105-9112.

Wu, Teresa, Jennifer Blackhurst, and Vellayappan Chidambaram. (2006). “A Model for Inbound Supply Risk Analysis”, *Computers in industry,* vol. 57, p.350-365.

Xiao, Tiaojun et al. (2010). “Ordering, Wholesale Pricing and Lead-Time Decisions in a Three-Stage Supply Chain under Demand Uncertainty”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 59, no 4, p.840-852.

Yin, Zhe, and Chen Wang. (2018). “Strategic Cooperation with a Backup Supplier for the Mitigation of Supply Disruptions.” *International Journal of Production Research,* vol. 56, no 12, p.4300-4312.

Yu, Haisheng, Amy Z Zeng, and Lindu Zhao. (2009). “Single or Dual Sourcing: Decision-Making in the Presence of Supply Chain Disruption Risks”, *Omega,* vol. 37, p.788-800.

# Annexes

Annexe 1 : Les données recueillies dans la littérature

| Paramètre | Donnée | Source |
|---|---|---|
| Demande N95 Printemps 2020 Réseau de la santé | 20 000 masques / jour<br>OU<br>140 000 masques / semaine | Duchaine, Hugo (2020, 27 décembre). « Pas assez de masques N95 dans la réserve au Québec », *Journal de Montréal*, Actualité Santé. Récupéré de https://www.journaldemontreal.com/2020/12/27/pas-assez-de-masques-n95-dans-la-reserve |
| Demande perdue 2e vague | 40% de demande perdue dans la 2e vague (dans 60% des cas, les travailleurs qui avaient besoin de N95 en avaient de disponible | Institut canadien d'information sur la santé (2020). *Nombre de cas et de décès liés à la COVID-19 chez les travailleurs de la santé au Canada — infographie* , Récupéré de Nombre de cas et de décès liés à la COVID-19 chez les travailleurs de la santé au Canada — infographie \| ICIS (cihi.ca) |
| Prix unitaire N95 avant-pandémie<br><br>Prix unitaire pendant la crise (avril 2020) | 0,60 – 0,85 USD<br><br>7 – 7,50 USD | De Montigny, Philippe (2020, 8 avril). « De zéro à héros : la production canadienne de masques médicaux », *Radio-Canada,* Récupéré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1691985/masques-medicaux-woodbridge-doug-ford |
| Ligne du temps :<br>Durée de la première vague (Québec) | Entre le 1er mars et le 27 juillet 2020 (5 mois) | Institut national d'excellence en santé et services sociaux (2020). *Première vague de la pandémie de COVID-19 au Québec : regard sur les facteurs associés aux hospitalisations et aux décès,* Récupéré de https://www.inesss.qc.ca/fileadmin/doc/INESSS/COVID-19/COVID-19_INESSS_EP_Portrait_cohorte_COVID.pdf |
| Durée de la 2e vague (Québec) | Entre le 23 août 2020<br>et le 20 mars 2021 (7 mois) | Institut national de santé publique du Québec (2021). *Ligne du temps COVID-19 au Québec,* Récupéré de https://www.inspq.qc.ca/covid-19/donnees/ligne-du-temps |
| Pic de la pénurie de N95 (Québec) | Entre mars et juin 2020 (4 mois) | Shochat, Gil et Chantal Lavigne (2021, 27 mars). « La bataille du N95 », *Radio-Canada,* Récupéré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1780285/masque-n95-aerosol-tribunal-enquete-eclosion-protection-personnel |

| | | |
|---|---|---|
| Durée de la 2e vague (Canada) | Entre septembre 2020 et mi-février 2021 | Gouvernement du Canada (2021). *Prévention de la propagation des variantes de la COVID-19*, Récupéré de *https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/rapports-publications/releve-maladies-transmissibles-canada-rmtc/numero-mensuel/2021-47/numero-7-8-juillet-aout-2021/covid-19-variantes.html* |
| Délai de livraison | Lead time rush Chine -Canada 10 jours | Gerbet, Thomas (2020, 15 décembre), « Panique à Québec : dans les coulisses de la course aux masques », *Radio-Canada*, Santé, politique provinciale, Récupéré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1757147/chronologie-quebec-pandemie-penurie-ministere-arruda?fbclid=IwAR3tISXNuPeOqKgIIyxrCXFSNLdaDXYAjN5n-iXtqxJ_ueYbXcU4PbZdBCk |
| Réserve provinciale | 2e vague : 3,4 millions<br>Ce qui représente un SS de 6 mois ou 140 000 masques par semaine pendant 24 semaines<br><br>État de la réserve le 5 octobre 2020 : 1 385 497 masques N95 soit 40 % de l'objectif que le gouvernement s'était fixé<br>Ce qui représente un stock d'un peu plus de deux mois<br><br>État de la réserve provinciale Décembre 2020 N95 : 1,4 million ou 42 %<br><br>On a une réserve avec une cible, mais elle uniquement remplie à 40 %.<br><br>Fréquence de livraison de la réserve aux établissements :<br>2 fois par semaine | Bouchard, Marie-Pier (2020, 5 novembre). « La réserve provinciale de N95 à seulement 40 % de l'objectif », *Radio-Canada*, Santé Coronavirus, Récupéré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1747225/inventaire-reserve-quebec-masques-n95-gouvernement-quebec<br><br>Duchaîne, Hugo (2020, 27 décembre). « Pas assez de masques N95 dans la réserve au Québec », *Journal de Montréal*, Actualité Santé. Récupéré de https://www.journaldemontreal.com/2020/12/27/pas-assez-de-masques-n95-dans-la-reserve |
| Capacité de production des fournisseurs | Contrat 3M: Investissement entre 3M, gouvernement du Canada et gouvernement de l'Ontario pour agrandissement d'une usine de fabrication de N95 à Brockville (août 2020) :<br>L'usine assurera une production de 25 millions de N95 au gouvernement du Canada et 25 millions de N95 au gouvernement de l'Ontario chaque année pendant 5 ans | Gouvernement du Canada (2020). *Un nouvel investissement pour garantir l'approvisionnement en respirateurs N95 fabriqués au Canada afin de protéger nos travailleurs de la santé*, Récupéré de https://pm.gc.ca/fr/nouvelles/communiques/2020/08/21/nouvel-investissement-garantir-lapprovisionnement-respirateurs-n95 |

| | | |
|---|---|---|
| | Accord avec Medicom (Pointe-Claire, Qc) (été 2020) :<br>20 millions de N95 et 24 millions de masques chirurgicaux par an pendant 10 ans pour le gouvernement du Canada | Services publics et Approvisionnement Canada (2020). *Approvisionnement : Les comité plénier – juin 17 2020,* Récupéré de https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/trans/documentinfo-briefingmaterial/lcp-cow/2020_06_17/p3-fra.html |
| | Artofix, filiale de Duvaltex :<br>Production hebdomadaire de N95 entièrement québécois :<br>100 000 unités par semaine, souhaite augmenter sa capacité de production à 400 000 unités par semaine | Samson, Fanny (2021, 7 février). « Un masque N95 québécois obtient l'aval de Santé Canada », *Radio-Canada,* Récupéré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1769063/masque-n95-covid-beauce-duvaltex-sante-canada |
| Augmentation des capacités de production | Construction d'une nouvelle usine :<br>3 mois – usine de Medicom à Montréal | Boily, Daniel et Florian Cruzille (2020, 27 mai). « Medicom installe son usine de masques N95 à Saint-Laurent », *Radio-Canada,* Récupéré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1706573/medicom-usine-masques-n95-saint-laurent-coronavirus-covid-19 |
| | 3M :Création d'une chaîne de production de N95 au Canada (Brockville, Ontario)-Opérationnel 8 mois après les investissements | Gouvernement de l'Ontario (2021). *Les masques N95 fabriqués en Ontario commencent à émerger de la chaîne de production de l'usine 3M de Brockville*, Récupéré de https://news.ontario.ca/fr/release/61028/les-masques-n95-fabriques-en-ontario-commencent-a-emerger-de-la-chaîne-de-production-de-lusine-3m-de-brockville |

Annexe 2 : Le tableau d'expérimentation des stratégies d'allocation de la demande

| | tendance demande | fournisseur traditionnel | fournisseur alternatif avec grande capacité | fournisseur alternatif avec petite capacité | réserve de petite taille | réserve de grande taille | décision d'allocation de la demande | décision d'activation 1ère source alternative ( quand ? ) | décision d'activation ( combien ? ) | décision de désactivation 1ère source (quand ?) | décision d'activation 2e source alternative (quand ? ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | ↑ | x | | | | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale | - | - | - | |
| | ↓ | x | | | | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale | - | - | - | |
| **2** | ↑ | x | x | | | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | - | |
| | ↓ | x | x | | | | arrêter de commander $frn_2$ | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **3** | ↑ | x | x | | | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | - | |
| | ↓ | x | x | | | | arrêter de commander $frn_2$ | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **4** | ↑ | x | x | | | | commander capacité $frn_1$jusqu'à demande perdue, puis si demande perdue, ajouter capacité frn $frn_2$ | demande perdue > 0 | QC = capacité $frn_2$ | - | |
| | ↓ | x | x | | | | ici, pas vraiment de désactivation, on l'active uniquement au besoin | | | | |
| **5** | ↑ | x | x | | | | commander Qt $frn_1$jusqu'à tendance à la hausse, puis commander différence $frn_2$ | tendance ↑ 6 sem de suite | différence (NC - SP - $QC_1$) | - | |
| | ↓ | x | x | | | | commander Qt au $frn_1$ lorsque tendance à la baisse | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **6** | ↑ | x | | x | | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | - | |
| | ↓ | x | | x | | | arrêter de commander $frn_2$ | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **7** | ↑ | x | | x | | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | - | |
| | ↓ | x | | x | | | arrêter de commander $frn_2$ | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **8** | ↑ | x | | x | | | commander capacité $frn_1$jusqu'à demande perdue, puis si demande perdue, ajouter capacité $frn_2$ | demande perdue > 0 | QC = capacité $frn_2$ | - | |
| | ↓ | x | | x | | | ici, pas vraiment de désactivation, on l'active uniquement au besoin | | | | |
| **9** | ↑ | x | | x | | | commander Qt $frn_1$jusqu'à tendance à la hausse, puis commander différence $frn_2$ | tendance ↑ 6 sem de suite | différence (NC - SP - $QC_1$) | - | |
| | ↓ | x | | x | | | commander Qt au $frn_1$ lorsque tendance à la baisse | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **10** | ↑ | x | | | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | - | |
| | ↓ | x | | | x | | arrêter de commander R | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **11** | ↑ | x | | | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt R | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | - | |
| | ↓ | x | | | x | | désactivation lorsque vide | - | - | - | |
| **12** | ↓ | x | | | x | | commander capacité $frn_1$jusqu'à demande perdue, puis si demande perdue, commander 75000 unités réserve | demande perdue > 0 | QC = 75000 | - | |
| | ↑ | x | | | x | | ici, pas vraiment de désactivation, on l'active uniquement au besoin | | | | |
| **13** | ↓ | x | | | x | | commander Qt $frn_1$jusqu'à tendance à la hausse, puis commander différence R | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| | ↑ | x | | | x | | commander Qt au $frn_1$ lorsque tendance à la baisse | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **14** | ↑ | x | | | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | - | |
| | ↓ | x | | | | x | arrêter de commander R | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |

| | tendance demande | fournisseur traditionnel | fournisseur alternatif avec grande capacité | fournisseur alternatif avec petite capacité | réserve de petite taille | réserve de grande taille | décision d'allocation de la demande | décision d'activation 1ère source alternative ( quand ? ) | décision d'activation ( combien ? ) | décision de désactivation 1ère source (quand ?) | décision d'activation 2e source alternative (quand ? ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **15** | ↑ | x | | | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt R | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | - | |
| | ↑ | x | | | | x | ici, pas vraiment de désactivation, on l'active uniquement au besoin | - | - | - | |
| **16** | ↓ | x | | | | x | commander capacité $frn_1$jusqu'à demande perdue, puis si demande perdue, commander 150 000 unités réserve | demande perdue > 0 | QC = 150 000 | - | |
| | ↑ | x | | | | x | ici, pas vraiment de désactivation, on l'active uniquement au besoin | | | | |
| **17** | ↑ | x | | | | x | commander Qt $frn_1$jusqu'à tendance à la hausse, puis commander différence R | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| | ↑ | x | | | | x | commander Qt au $frn_1$ lorsque tendance à la baisse | - | QC = capacité $frn_1$ | tendance ↓ 6 sem de suite | |
| **18** | ↑ | x | x | | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | réserve vide | si réserve vide = commander différence $frn_2$ |
| | ↓ | x | x | | x | | désactivation lorsque réserve vide | | | | |
| **19** | ↑ | x | x | | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt R | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | réserve vide | si réserve vide = commander Qt $frn_2$ |
| | ↓ | x | x | | x | | désactivation lorsque réserve vide | - | - | - | |
| **20** | ↑ | x | x | | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander différence $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R |
| | ↓ | x | x | | x | | | | | | |
| **21** | ↑ | x | x | | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander Qt $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence Qt R |
| | ↓ | x | x | | x | | | | | | |
| **22** | ↑ | x | x | | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | réserve vide | si réserve vide = commander différence $frn_2$ |
| | ↓ | x | x | | | x | | | | | |
| **23** | ↑ | x | x | | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt R | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | réserve vide | si réserve vide = commander Qt $frn_2$ |
| | ↓ | x | x | | | x | désactivation lorsque réserve vide | - | - | - | |
| **24** | ↑ | x | x | | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander différence $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R |
| | ↓ | x | x | | | x | | | | | |

| | tendance demande | fournisseur traditionnel | fournisseur alternatif avec grande capacité | fournisseur alternatif avec petite capacité | réserve de petite taille | réserve de grande taille | décision d'allocation de la demande | décision d'activation 1ère source alternative ( quand ? ) | décision d'activation ( combien ? ) | décision de désactivation 1ère source (quand ?) | décision d'activation 2e source alternative (quand ? ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **25** | ↑ | x | x | | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander Qt $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence Qt R |
| | ↓ | x | x | | | x | | | | | |
| **26** | ↑ | x | | x | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | réserve vide | si réserve vide = commander différence $frn_2$ |
| | ↓ | x | | x | | x | | | | | |
| **27** | ↓ | x | | x | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt R | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | réserve vide | si réserve vide = commander Qt $frn_2$ |
| | ↑ | x | | x | | x | désactivation lorsque réserve vide | - | - | - | |
| **28** | ↑ | | | x | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander différence $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R |
| | | | | x | | x | | | | | |
| **29** | | | | x | | x | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander Qt $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence Qt R |
| | ↑ | x | | x | x | | | | | | |
| **30** | ↓ | x | | x | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | réserve vide | si réserve vide = commander différence $frn_2$ |
| | ↑ | x | | x | x | | | | | | |
| **31** | ↓ | x | | x | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt R | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | réserve vide | si réserve vide = commander Qt $frn_2$ |
| | | | | | | | désactivation lorsque réserve vide | - | - | - | |
| **32** | ↑ | x | | x | x | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | différence (NC - SP - $QC_1$) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander différence $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence R |
| | ↑ | x | | x | x | | | | | | |
| **33** | ↑ | | | | | | commander Qt $frn_1$ jusqu'à capacité maximale, puis Qt $frn_2$ | QC≥ capacité maximale | quantité totale (NC- I) | QC≥ capacité maximale $frn_2$ | commander Qt $frn_2$ jusqu'à capacité maximale, puis différence Qt R |
| | | x | | x | x | | | | | | |

| Abbréviation | Définition |
|---|---|
| **D** | demande de la semaine dernière |
| **$frn_1$** | fournisseur traditionnel |
| **$frn_2$** | fournisseur alternatif |
| **I** | niveau d'inventaire |
| **NC** | niveau cible |
| **Qc** | quantité à commander |
| **Qt** | quantité totale |
| **R** | réserve |
| **SP** | stock physique |