

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Tlemcen.
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique

Thèse de Doctorat en Sciences en Productique

Intitulée :

**Résolution d'un problème stochastique de localisation
allocation avec gestion des indisponibilités des sites**

Présentée le :

Dimanche 14 Juin 2020

Par :

MALIKI Fouad

Devant le Jury :

Président :

MELIANI Sidi Mohamed Maître de Conférences A Université de Tlemcen, Algérie

Examineurs :

SAHNOUN M'hammed Maître de Conférences, HDR LINEACT laboratory CESI, France
GHOMRI Latéfa Maître de Conférences A Université de Tlemcen, Algérie

Directeurs :

SOUIER Mehdi Maître de Conférences A ESM de Tlemcen, Algérie
DAHANE Mohammed Maître de Conférences, HDR Université de Lorraine, France

Remerciements

L'accomplissement de cette thèse a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements les plus vifs et ma profonde reconnaissance à mes directeurs de thèse Dr. Mohammed DAHANE et Dr. Mehdi SOUIER, pour leurs patience, conseils, orientations et disponibilité.

Dr. Mohammed DAHANE m'a toujours accueilli à bras ouverts durant mes périodes de stage dans le laboratoire LGIPM à Metz en France, il a toujours fait preuve d'une grande générosité scientifique et humaine. Je salue son amabilité, sa disponibilité, sa souplesse d'esprit et son savoir.

Mes respects et ma gratitude sont aussi présentés à Dr. Mehdi SOUIER pour sa confiance et son soutien moral qui m'a toujours accordé. Je lui adresse toute ma reconnaissance pour sa patience et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je présente toute ma gratitude et mes remerciements les plus sincères à la personne qui m'a fait découvrir le monde du Génie industriel et de la Productique Pr. Zaki SARI. Qu'il trouve à travers ces lignes ma plus grande reconnaissance pour tout ce qu'il m'a appris sur le plan scientifique et personnel durant mon parcours.

Je remercie Dr. Sidi Mohamed MELIANI d'avoir accepté de faire partie de ce jury en tant que président. Je remercie aussi les examinateurs Dr. M'hammed SAHNOUN et Dr. Latifa GHOMRI d'avoir accepté d'examiner le présent travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance la plus sincère.

Je remercie mes chers parents qui ont toujours été là pour moi, vous avez fait beaucoup de sacrifices pour moi n'épargnant ni santé ni efforts. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier.

Enfin, Je clos cette page par remercier toute personne ayant participé de près ou de loin en l'accomplissement de ce travail. Mes remerciements les plus chaleureux vont aussi à tous les membres du laboratoire de productique de Tlemcen (MELT) pour leurs aides et soutient.

A mes parents

A ma conjointe et mes enfants Sohaib et Anes

A mon frère et mes sœurs

A tous les membres de ma famille

A tous les étudiants de la filière Génie industriel de l'ESSA Tlemcen

A la mémoire de mon cher ami et frère BENSMAINE Abderrahmane

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1. Contexte général et concepts de base	4
I.1 Introduction	5
I.2 La logistique	5
I.3 La chaîne logistique (la supply chain)	6
I.4 La gestion de la chaîne logistique (supply chain management)	7
I.5 Statistiques relatives aux systèmes logistiques actuels	9
I.5.1 <i>Statistiques économiques</i>	9
I.5.2 <i>Statistiques environnementales</i>	10
I.6 Les problèmes de localisation allocation (Facility Location Problems)	12
I.6.1 <i>Les problèmes déterministes</i>	13
A. <i>Le problème médian</i>	13
B. <i>Le problème de recouvrement (set covering problem)</i>	14
C. <i>Le problème de couverture maximale</i>	15
D. <i>Le problème du centre</i>	15
E. <i>Le problème de localisation des sites à deux niveaux</i>	16
I.6.2 <i>Les problèmes de localisation stochastiques</i>	17
I.6.3 <i>Les problèmes de localisation intégrant l'aspect stockage</i>	19
I.7 Conclusion	19
Chapitre 2. Méthodes d'optimisation mono et multi-objectifs	20
II.1 Introduction	21
II.2 Optimisation mono-objectif	21
II.3 Les métaheuristiques	21
II.3.1 <i>Le recuit simulé (Simulated annealing)</i>	22
II.3.2 <i>La recherche tabou (Tabu search)</i>	23

II.3.3	<i>Les algorithmes génétiques (Genetic algorithm)</i>	23
II.4	Optimisation multiobjectif	25
II.4.1	<i>Méthodes scalaires</i>	26
A.	<i>Méthode d'agrégation</i>	26
B.	<i>Programmation par but</i>	27
C.	<i>Méthode ε-constraint</i>	27
II.4.2	<i>Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)</i>	27
II.5	La méthode TOPSIS	29
II.6	Conclusion	31
 Chapitre 3. Revue de la littérature des problèmes de localisation et positionnement de la problématique de recherche		32
III.1	Introduction	33
III.2	Les problèmes de localisation	33
III.2.1	<i>Les problèmes de localisation fiables</i>	35
III.2.2	<i>Les problèmes de localisation dynamiques</i>	36
III.2.3	<i>Les problèmes de localisation mobiles</i>	39
III.2.4	<i>Les problèmes de localisation durables</i>	42
III.3	Synthèse et problématique de recherche	45
III.4	Conclusion	47
 Chapitre 4. Gestion des indisponibilités des sites lors de la conception des chaînes logistiques		48
IV.1	Introduction	49
IV.2	Problématique considérée	49
IV.3	Formulation mathématique du problème	51
IV.3.1	<i>Notations et variables utilisées</i>	51
IV.3.2	<i>Modélisation mathématique</i>	52
IV.4	Résolution du problème	53
IV.4.1	<i>Codage des solutions</i>	53
IV.4.2	<i>Approche non-intégrée</i>	54
IV.4.3	<i>Approche intégrée</i>	55
IV.5	Résultats obtenus et analyse	56
IV.5.1	<i>Résolution du problème</i>	57
IV.5.2	<i>Analyse de sensibilité</i>	58
IV.5.3	<i>Approche non-intégrée</i>	60

IV.5.4	<i>Approche intégrée</i>	62
IV.6	Conclusions et perspectives	62
Chapitre 5. Modèle multiobjectif pour un problème de localisation de sites mobiles multi-périodes avec gestion des indisponibilités et des émissions CO2		64
V.1	Introduction	65
V.2	Problématique considérée	65
V.2.1	<i>Description du problème</i>	65
V.2.2	<i>Exemple introductif</i>	66
V.2.3	<i>Hypothèses et contributions</i>	68
V.3	Formulation mathématique	69
V.4	Approche de résolution	72
V.4.1	<i>Codage des solutions</i>	72
V.4.2	<i>Approche proposée</i>	74
V.5	Analyse des résultats obtenus	75
V.5.1	<i>Les résultats obtenus de l'algorithme NSGA-II</i>	76
V.5.2	<i>Comparaison du modèle proposé avec un modèle dynamique classique</i>	79
V.5.3	<i>Comparaison du modèle proposé avec un modèle mono-objectif</i>	80
V.6	Conclusion	81
Conclusion générale		82

Liste des figures

Figure 1.1. Chaîne logistique (Supply chain)	6
Figure 1.2. Chaîne logistique (Supply chain)	7
Figure 1.3. Part des coûts logistiques dans le PIB aux États-Unis	10
Figure 1.4. Récapitulatif des émissions de CO2 à éviter à l'horizon	12
Figure 2.1. Un croisement un point	24
Figure 2.2. Exemple de mutation dans le cas d'un codage binaire	24
Figure 2.3. Solutions dominés et front Pareto	26
Figure 2.4. Crowding distance	28
Figure 4.1. Structure de la chaîne logistique étudiée	50
Figure 4.2. Exemple de chromosome	53
Figure 4.3. Nombre de CDs Vs les coûts de transport	59
Figure 4.4. Nombre de CDs Vs les coûts de stockage	60
Figure 4.5. Nombre de CDs Vs la variabilité des demandes et des délais de livraison	60
Figure 5.1. La structure initiale du réseau considéré	67
Figure 5.2. Les trois possibilités considérées	68
Figure 5.3. Représentation proposée d'une solution réalisable	73
Figure 5.4. L'évolution d'une solution réalisable à travers l'horizon de planification	74
Figure 5.5. Courbe du front Pareto pour le cas 80 nœuds	78
Figure 5.6. Comparaison des résultats obtenus pour le modèle proposés et un modèle classique pour des horizons de planification de différentes périodes	79
Figure 5.7. Le nombre de CDs ouverts pour les approches multiobjectif et mono-objectif	80
Figure 5.8. L'évolution du coût total pour les approches multiobjectif et mono-objectif	81

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Emissions de CO2 dues aux transports de marchandises aux Etats-Unis (1990-2007)	11
Tableau 3.1. Résumé des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation fiables, dynamiques et mobiles	41
Tableau 3.2. Résumé des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation durables	45
Tableau 4.1. Résultats obtenus après résolution du problème	57
Tableau 4.2. Impact des coûts de transport et des coûts de stockage	58
Tableau 4.3. Comparaison des deux stratégies pour l'approche non-intégrée	61
Tableau 4.4. Les gains engendrés par l'approche intégrée comparé à l'approche non-intégrée	62
Tableau 5.1. Les valeurs des paramètres du modèle	76
Tableau 5.2. Valeurs des paramètres de l'algorithme NSGA-II	76
Tableau 5.3. Résultats obtenus pour N = 5 en utilisant l'approche TOPSIS NSGA-II	77
Tableau 5.4. Les détails des résultats obtenus à travers l'horizon de planification pour le cas 80 nœuds	78

Liste des abréviations

CD : Centre de distribution

CFLP : Capacitated Facility Location Problem

CLSC : Closed Loop Supply Chain

DFLP : Dynamic Facility location problem

DUFLP : Dynamic Uncapacitated facility Location problem

FLP : Facility location problem

GES : Gaz à effet de serre

GrSCM : Green Supply Chain Management

IRFLP : Inventory Reliable Facility Location Problem

MCDM : Multiple criteria Decision making

MFLP : Mobile Facility location problem

MILP : Mixed Integer Linear Program

MOGA : Multi Objective Genetic Algorithm

NRGA : Non-dominated ranking genetic algorithm

NSGA-II : Non-dominated Sorting Genetic Algorithm 2

PIB : Produit Intérieur Brut

PSO : Particular Swarm Optimization

QEC : Quantité Economique de Commande

RFLP : Reliable Facility Location Problem

RUFLP : Reliable Uncapacitated facility Location problem

SCM : Supply Chain Management

SCND : Supply Chain Network Design

TOPSIS : Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

UFLP : Uncapacitated Facility Location Problem

Introduction générale

L'innovation est un aspect déterminant dans l'évolution des entreprises. L'un des axes stratégiques qui se présente comme une voie de l'innovation pour une entreprise est d'intégrer les contraintes de ses différents partenaires (fournisseurs, clients, sous-traitants, ...). Pour cela, l'entreprise se trouve obligée de mener une stratégie inter-organisationnelle par une gestion collaborative des partenaires amont, interne et aval et par conséquent considérer ses collaborateurs dans la gestion de sa chaîne logistique. En effet, émerger des marchés bénéfiques, trouver de nouvelles opportunités de développement ou encore internationaliser les fournisseurs et les clients sont des soucis majeurs de nombreux secteurs industriels dans un contexte d'une mondialisation croissante. Ces objectifs poussent à trouver des modes d'organisation efficaces, en cherchant non plus à optimiser la chaîne de la valeur d'un seul maillon uniquement, mais visant à optimiser tous les maillons de la chaîne logistique. Apparue vers le milieu des années 80 aux États-Unis (début des années 90 en France), le concept de *Supply Chain Management* peut être défini comme la gestion des flux physiques et d'information du client au fournisseur du fournisseur.

Dans ce cadre, l'architecture du réseau de distribution d'une entreprise repose en grande partie sur les décisions de localisation des différents sites (centres de distribution, entrepôts, usines, plateformes logistiques, ...). Ces décisions présentent un enjeu majeur pour les entreprises à cause du besoin en investissement et des pertes engendrées en cas d'erreurs.

En général, les décisions de localisation des sites sont stratégiques et mènent à prendre une série de décisions d'ouverture / fermeture et d'allocation à travers un horizon de planification. Étant donné que les conditions futures sont incertaines, les décideurs doivent non seulement choisir des emplacements qui répondront efficacement à l'évolution de la demande au fil du temps, mais doivent également tenir compte du calendrier des agrandissements et des délocalisations des sites à long terme. Daskin et al. (1992) et Current et al. (1998) indiquent que les modèles de localisation des sites considérant l'ouverture et/ou la

fermeture des sites à travers un horizon de planification sont dynamiques. Deux situations nécessitent l'utilisation des modèles dynamiques pour les décisions de localisation allocation: premièrement, il doit y avoir des changements au fil du temps dans les demandes ou les coûts, et deuxièmement, les coûts de relocalisation ou de redimensionnement des sites doivent être importants (Erlenkotter, 1981).

Une chaîne logistique est également sujette à des risques naturels et humains et des incertitudes qui peuvent dégrader ses performances ou perturber son fonctionnement. Ces risques peuvent entraîner l'indisponibilité d'un ou de plusieurs sites et entraîner des pertes financières importantes pour les entreprises. Par conséquent, les différentes perturbations et incertitudes doivent être prises en compte lors de la conception de la chaîne logistique. Le Forum économique mondial indique dans un rapport récent que les perturbations de la chaîne logistique réduisent le prix des actions des entreprises touchées de 7% en moyenne (Garcia-Herreros et al., 2014).

La relation entre la durabilité et les problèmes de localisation des sites mérite d'être étudiée car chaque seconde dans le monde, plus d'un million de kg de CO₂ sont émis dans l'atmosphère. Des émissions de 36,4 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère se sont produites en 2016; ces émissions sont principalement dues au transport des produits. Plusieurs paramètres sont pris en compte dans le calcul du taux d'émission de gaz à effet de serre (CER), notamment les émissions de CO₂.

Ce travail considère un problème de conception d'une chaîne logistique avec gestion des indisponibilités des sites, où l'objectif est de trouver la meilleure localisation des centres de distribution (CDs) afin de satisfaire les demandes des clients. Sachant que les CDs sont sujets à des indisponibilités aléatoires, des approches efficaces permettant une gestion optimale des indisponibilités afin de concevoir une chaîne logistique fiable et robuste doivent être développées.

Deux problématiques relatives aux problèmes de localisation des sites sont abordées dans la cadre de cette thèse :

1. La modélisation d'un problème de localisation stochastique des sites avec gestion des indisponibilités des CDs, deux approches sont proposées, permettant la minimisation des coûts de gestion des indisponibilités des CDs grâce à l'optimisation de la réallocation des clients aux CDs opérationnels.
2. La modélisation d'un problème de localisation stochastique des sites avec gestion des indisponibilités des CDs dans un contexte dynamique et avec utilisation des sites mobiles. Notre approche multiobjectif développée consiste à utiliser les sites mobiles afin de minimiser les coûts d'ouvertures et de fermetures des sites ainsi que la quantité des émissions de CO₂.

Ce manuscrit de thèse est structuré en cinq chapitres, comme suit :

Le premier chapitre présente les concepts de base relatifs à la logistique et à la conception des chaînes logistiques. Nous détaillons les problèmes de localisation de base en présentant leur modèle mathématique. Des statistiques liées aux objectifs considérés dans cette thèse à savoir les coûts logistiques et la quantité des émissions de CO₂ sont présentées afin de montrer leur impact sur les systèmes logistiques.

Dans le chapitre 2, nous décrivons les méthodes d'optimisation mono et multiobjectif utilisées et adaptées dans cette thèse. Plusieurs métaheuristiques, à savoir la recherche tabou, le recuit simulé et les algorithmes génétiques, sont présentées pour le cas mono-objectif et l'algorithme NSGA-II (*Non-dominated sorting genetic algorithm II*) pour le cas multiobjectif. D'autre part, la méthode TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) est décrite comme technique d'aide à la décision, permettant la sélection de la meilleure solution parmi l'ensemble des solutions formant le front Pareto pour le cas multiobjectif.

Le chapitre 3 est consacré à la présentation de la revue de la littérature, à travers laquelle nous présentons les problématiques abordées et les méthodes de résolution proposées liées aux problèmes de localisation fiables, dynamiques, mobiles et durables. Ce chapitre est conclu par une synthèse montrant le positionnement de notre problématique de recherche par rapport aux travaux rapportés.

Le chapitre 4 présente un problème de localisation des sites stochastique avec une gestion des indisponibilités des CDs. Deux approches sont proposées afin de minimiser le coût total généré, la première consiste à déterminer la structure de la chaîne logistique dans une première étape et de gérer les indisponibilités lors de la deuxième étape. La deuxième approche consiste à concevoir la chaîne logistique et gérer les indisponibilités des sites simultanément, en utilisant une technique de réallocation à chaque indisponibilité de CD. Des résultats numériques sont présentés afin de comparer les performances des deux approches proposées.

Dans le chapitre 5, nous exposons un problème de localisation stochastique des sites avec gestion des indisponibilités des CDs, une approche basée sur l'algorithme NSGA-II est proposée permettant de minimiser à la fois les coûts logistiques et la quantité des émissions de CO₂. L'approche multiobjectif proposée considère un horizon de planification composé de plusieurs périodes où les CDs sont sujets à des indisponibilités à chaque période. De ce fait, un CD peut être ouvert, fermé et rouvert plusieurs fois dans l'horizon de planification où les coûts d'ouvertures et de fermetures des CDs sont minimisés par le déplacement des CDs d'un emplacement à un autre. Les résultats du modèle développé sont présentés et comparés à un modèle dynamique classique et un modèle mono-objectif.

Cette thèse est clôturée par une conclusion générale décrivant la synthèse de notre travail et des perspectives à considérer à court et moyen terme.

Chapitre I.

Contexte général et concepts de base

Nombreux sont les modèles relatifs aux problèmes de localisation des sites présentés dans la littérature, permettant de concevoir des chaînes logistiques hospitalières, pharmaceutiques, agroalimentaires, pétrolières, durables,.... Ces modèles s'inspirent des modèles de base développés lors du vingtième siècle. Dans ce chapitre nous rappelons les différentes définitions et concepts de base relatifs à la logistique, nous présentons quelques statistiques afin de montrer l'importance des systèmes logistiques actuelles dans l'économie mondiale. Enfin, nous listons les différents problèmes de localisation de base figurant dans la littérature ainsi que leur modélisation mathématique respective.

I.1 Introduction

L'économie mondiale actuelle est en pleine mutation à cause de l'instabilité du marché. De ce fait, toute entreprise est obligée d'être de plus en plus compétitive en offrant des produits de meilleure qualité avec des prix concurrentiels et dans les meilleurs délais, d'où la nécessité de considérer toute la chaîne logistique de l'entreprise. Une chaîne logistique peut être vue comme étant l'ensemble des maillons composant le processus de fabrication de produits depuis l'approvisionnement des matières premières jusqu'à la livraison des produits finis aux clients. Actuellement, la concurrence n'est plus entre différentes entreprises mais entre différentes chaînes logistiques.

La conception des chaînes logistiques présente actuellement un enjeu majeur pour toute entreprise. Comme la complexité technologique a augmenté, cette conception est devenue de plus en plus complexe et dynamique. Par conséquent, les concepteurs logistiques se posent fréquemment les questions suivantes: dans quelle usine et dans quel pays est-il le plus rentable de fabriquer un produit spécifique? Quels modes de transport répondent le mieux aux points de demande des clients (situés dans le monde entier)? Quels sont l'emplacement et la capacité de stockage optimaux d'un CD? (Chopra et Meindl, 2003).

Dans ce contexte, nous consacrons principalement ce chapitre à la description des différents concepts et notions utilisés dans cette thèse à savoir : la conception des chaînes logistiques, la localisation des sites et la gestion des indisponibilités des sites.

I.2 La logistique

Le mot logistique est apparu en 1836 et surtout utilisé initialement dans le domaine militaire, recouvre toujours des fonctions de transport, stockage et manutention et, dans les entreprises de production, tend à élargir son domaine en amont vers l'achat et l'approvisionnement, et en aval vers la gestion commerciale et la distribution. On cite souvent la définition d'origine militaire : « *La logistique consiste à apporter ce qu'il faut, là où il faut et quand il faut* » (Pimor et Fender, 2004).

L'*American Marketing Association* proposa en 1935 dans *Marketing Vocabulary*, l'une des premières définitions stipulant que : « *la logistique regroupe les différentes activités réalisées par une entreprise, y compris les activités de service, durant le transfert d'un produit du site de production jusqu'au site de consommation* » (Le Moigne, 2017).

Le *National Council of Physical Distribution Management* (NCPDM), qui deviendra en 1985 le *Council of Logistics Management* (CLM) puis, en 2004 le *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP), proposa une définition plus large incluant les approvisionnements et le transport : « *Le processus de planification, d'exécution et de contrôle des procédures de transport et de stockage des biens (et des services) efficace et efficient, et des informations associées, du point d'origine au point de consommation dans le but de répondre aux besoins du client* » (Le Moigne, 2017).

Suite à la recherche de normalisation de la définition de la logistique par plusieurs organisations, le Conseil économique et social des Nations unies (ECOSOC) proposa de définir la logistique comme le « processus de conception et de gestion de la chaîne d'approvisionnement dans le sens le plus large. Cette chaîne peut comprendre la fourniture de matières premières nécessaires à la fabrication, en passant par la gestion des matériaux sur le lieu de fabrication, la livraison aux entrepôts et aux centres de distribution, le tri, la manutention et la distribution finale au lieu de consommation » (Le Moigne, 2017).

Le terme logistique regroupe donc toutes les activités de transformation d'un produit depuis les matières premières jusqu'au produit fini, incluant les différents services d'approvisionnement, de transport, de stockage et de livraison ainsi que les flux d'information et de service qui lui sont associées.

I.3 La chaîne logistique (*Supply chain*)

La "*supply chain*" est une notion relativement récente qui est devenu très utilisée de nos jours, où toute entreprise cherche à optimiser sa chaîne logistique afin qu'elle soit de plus en plus performante. Les grands groupes industriels cherchent même à développer leurs propres plateformes logistiques afin d'avoir plus de flexibilité et d'autonomie dans la gestion de leur système logistique.

Une "*supply chain*" est un réseau d'organisations (fournisseurs, usines, distributeurs, clients, prestataires logistiques...) qui participent à la fabrication, la livraison et la vente d'un produit à un client (Le Moigne, 2017). Ces organisations échangent entre elles des produits, des flux d'information et de l'argent.

On définit assez souvent la "*supply chain*" comme (définition du *Supply chain Council*) : « la suite des étapes de production et distribution d'un produit depuis les fournisseurs des fournisseurs du producteur jusqu'aux clients de ses clients » (Fender et Pimor, 2016) (Voir **figure I.1**).

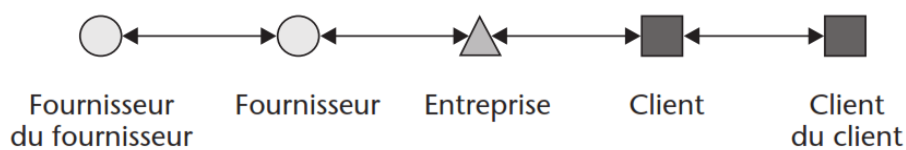


Figure I.1. Chaîne logistique (*Supply chain*)

Exemple :

Dans une chaîne logistique du secteur alimentaire, un producteur agricole envoie des fraises à une entreprise de transformation de fruits qui expédie, à son tour, du concentré de fraise à un fabricant de yaourt. Ce dernier livre des palettes de yaourts à la fraise à l'entrepôt d'un distributeur pour être vendues dans une grande surface.

Une chaîne logistique est donc un ensemble d'organisations complexes responsables des différentes opérations qui participent dans la transformation et le transport des produits, ainsi que les informations échangées représentées par les commandes, les bons de livraison, les factures ou encore les plannings de production et de transport (voir **figure I.2**).

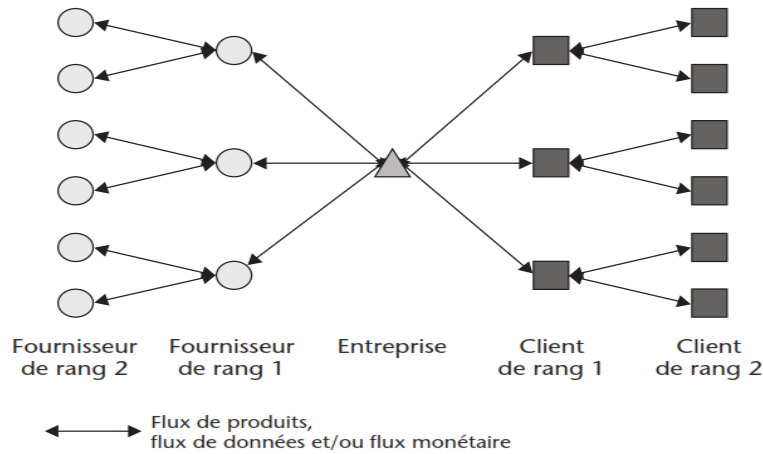


Figure I.2. Chaîne logistique (Supply chain)

I.4 La gestion de la chaîne logistique (*supply chain management*)

Historiquement, le terme "*supply chain management*" est apparu en 1958, lorsque Jay Wright Forrester écrivait: « Le management est à la frontière d'un changement majeur en comprenant comment le succès des sociétés industrielles dépend de l'interaction entre les flux d'information, de produits, d'argent, de main-d'œuvre et de biens d'équipement ». Le terme *supply chain management* apparaîtra vingt-quatre années plus tard, en 1982, dans un article d'Oliver et Webber : « *Supply chain Management : Logistics Catches Up With Strategy* » (Le Moigne, 2017).

En 1998, Le *Council of Supply Chain Management Professionals* modifie sa définition de la logistique afin d'indiquer que la logistique est un sous-ensemble de la gestion de la chaîne logistique et que les deux termes ne sont pas équivalents (Verter, 2011), et propose ainsi la définition suivante : « *le supply chain management (SCM) comprend la planification et la gestion de toutes les activités impliquées dans le sourcing et l'approvisionnement, la transformation et toutes les activités logistiques. Il inclut également la coordination et la collaboration avec des partenaires qui peuvent être des fournisseurs, des intermédiaires, des prestataires et des clients. Le SCM est une fonction d'intégration dont le rôle principal est d'intégrer les différents métiers et les différents processus dans et entre les entreprises au sein d'un modèle cohérent et performant. Il inclut toutes les activités de gestion de la logistique citées ci-dessus ainsi que les opérations de production, et il pilote la coordination des processus et des activités au sein et entre le marketing, les ventes, le développement produit, la finance et les technologies de l'information* » (Le Moigne, 2017).

La gestion de la chaîne logistique est reconnue de plus en plus comme la gestion des processus opérationnels clés à travers le réseau des organisations composant la chaîne d'approvisionnement. La définition suivante de la supply chain management développée et utilisée par le *Global Supply Chain Forum* est recommandée : « *La gestion de la chaîne logistique est l'intégration des principaux processus commerciaux depuis l'utilisateur final jusqu'aux fournisseurs d'origine, qui fournissent des produits, des services et des informations à valeur ajoutée pour les clients et les autres parties prenantes* » (Verter, 2011). Une définition, qui présente le supply chain management en termes d'objectif, est fréquemment utilisée : « *Le processus pour obtenir le bon produit au bon endroit au bon moment et au meilleur coût* » (Le Moigne, 2017).

La conception d'une chaîne logistique nécessite la prise d'un ensemble de décisions réparties selon leur portée temporelle et leur influence sur la stratégie concurrentielle de l'entreprise en trois niveaux hiérarchiques : stratégique, tactique et opérationnel. Les décisions stratégiques sont à long terme et sont celles qui déterminent la structure de la chaîne. Ils englobent tout ce qui est localisation et choix des entités (fournisseurs, usines, entrepôts, centres de distribution...) et des différents modes de transport utilisés (camions, trains, avions...). Les entreprises cherchent à optimiser les décisions stratégiques en premier, cette optimisation est traditionnellement axée sur les coûts, est rendue difficile à cause de l'introduction de nouveaux critères de décisions, telles que la satisfaction des clients (délai et qualité) et la prise en compte explicite des différents risques (sociaux et économiques). Les décisions tactiques et opérationnelles sont respectivement à moyen et court terme, les décisions tactiques couvrent les décisions d'allocation et le choix de la politique de gestion des stocks, quant aux décisions opérationnelles, elles couvrent toutes les décisions reliées au fonctionnement quotidien de la chaîne logistique, tels que l'ordonnancement de la production et celui du transport. L'optimisation complète de la chaîne logistique s'effectue en intégrant la prise de décision stratégique, tactique et opérationnelle en termes de conception, de gestion et de contrôle des activités (Gebennini et al., 2009).

Une question importante dans la phase de conception d'une chaîne logistique est la suivante : comment peut-t-on s'assurer que les décisions stratégiques soient réellement efficaces aux niveaux tactique et opérationnel ? Des modèles déterministes et stochastiques d'optimisation de la chaîne logistique ont été développés dans la littérature, mais à cause de leur complexité, rares sont les modèles qui considèrent simultanément des décisions des trois niveaux ainsi que les aléas et la dynamique de la chaîne logistique. Nous présentons dans les sections suivantes les problèmes de localisation allocation existants ainsi que leur modèle mathématique.

I.5 Statistiques relatives aux systèmes logistiques actuels

Cette section présente quelques statistiques et indicateurs relatifs aux systèmes logistiques actuels, ces chiffres sont basés sur des rapports établis par des départements de transport et de logistique à travers le monde, notamment le *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP).

I.5.1 Statistiques économiques

Les dépenses logistiques représentent une part importante et pertinente des coûts opérationnels. Au niveau de l'entreprise et pour de nombreux produits, 20% à 40% du coût total des produits sont liés à la logistique. Selon Rodrigues et al. (2005), le système logistique économique mondial a coûté environ 6732 milliards de dollars en 2002, ce qui correspond à 13.8 % du produit intérieur brut mondial (PIB).

Les coûts logistiques totaux comprennent tous les coûts associés aux opérations logistiques relatives au: transport, entreposage, stockage, administration, emballage et frais de traitement des commandes (coût d'entrée / service à la clientèle, tarifs et droits). Les frais d'administration et de traitement des commandes sont liés au volume total traité. Cependant, pour un même volume traité, les coûts de transport et de stockage varient en fonction des stratégies de distribution adoptées (Lambert et al., 1998).

Étant l'économie mondiale la plus puissante, les États-Unis représentent un exemple frappant en terme de logistique. En effet, selon le 29^{ème} rapport annuel sur l'état de la logistique du CSCMP établie en 2018, qui mesure les dépenses totales de transport et de stockage des entreprises américaines, les chiffres présentés en milliards de dollars montrent que les coûts de transport représentent 64.59 % des dépenses, 28.53 % est le pourcentage des coûts de stockage et 6.78 % des dépenses restent pour les coûts dus aux autres opérations.

Autre signe indiquant la part élevée de la logistique dans la production économique globale. La **figure I.3** montre les coûts de logistique aux États-Unis en pourcentage du PIB au cours des 10 dernières années (*A.T. Kearney analysis*), les coûts totaux en 2017 sont passés à 7,7 % du PIB contre 7,6 % en 2016. Ces coûts devraient continuer d'augmenter pour les années à venir, et selon le département américain des transports, environ 6 à 7 % de ces taux annuels du PIB sont dépensés pour le transport de marchandises (National Transportation Statistics, 2005). Ce constat montre parfaitement l'impact de la logistique sur l'économie mondiale.

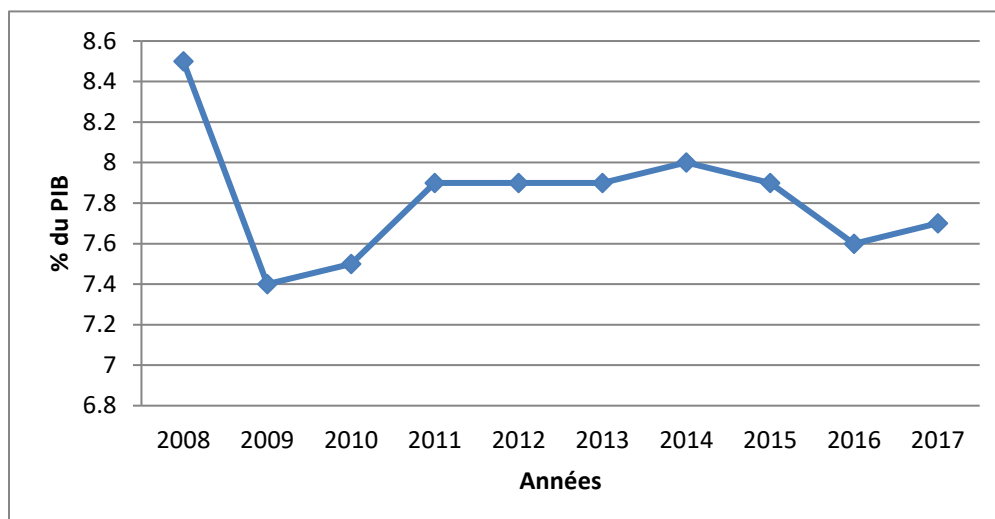


Figure I.3. Part des coûts logistiques dans le PIB aux États-Unis

Avec des coûts totaux de logistique arrivant jusqu'à 1,6 milliards de dollars et 16% du PIB en 2016, la Chine est devenu le plus grand marché de la logistique dans le monde en dépassant les États-Unis et malgré, la banque mondiale a positionnée la Chine à la 27^{ème} place en terme d'Index international de performance logistique en 2016 et cela à cause des coûts logistiques élevés qui ont d'ailleurs augmenté de 2,8% en 2015. Ces chiffres ont poussé les vendeurs en ligne de s'investir en logistique afin d'améliorer les performances logistiques du pays avec la localisation de 49 plateformes logistiques, environ 200 centres de distribution régionaux et 1000 centres de distribution secondaires par les six premiers sites e-commerce du pays à la fin de 2015 (JustLogsit, 2016).

Les coûts logistiques en Algérie représentent actuellement 35% du coût d'un produit selon le SITTEM 2017, ce qui augmente considérablement son coût de revient. Afin de palier ce problème, plusieurs entreprises spécialisées dans le domaine de logistique ont été créées lors des dernière années à l'image de NUMILOG, MARS LOGISTIQUE et Bèjaïa Logistique. L'objectif est de réduire ces coûts à la norme mondiale qui est de 15% du coût d'un produit à l'horizon 2025.

1.5.2 *Statistiques environnementales*

Selon l'Agence internationale d'Énergie (AIE), la quantité des émissions CO₂ a atteint les 37.1 milliards de tonnes en 2018 dans le monde avec une augmentation de 55% lors des 20 dernières années. Ces émissions proviennent principalement de la Chine, des États-Unis, de l'Union européenne et de l'Inde avec 57% de la quantité totale. Ces émissions sont principalement dues aux opérations de transport et de production.

Le transport de marchandises contribue largement aux émissions des gaz à effet de serre (GES). La majorité de ces émissions sont du Dioxyde de carbone (CO₂) avec un pourcentage de 23%, résultant de la combustion de produits à base de pétrole comme l'essence, en plus de petites quantités de méthane (CH₄),

de protoxyde d'azote (N₂O) et d'hydrofluorocarbure (HFC) représentant environ de 15% des émissions globales de GES (National Transportation Statistics, 2009). Il est bien connu que ces émissions de GES sont naturellement à l'origine des problèmes de réchauffement et de changement climatiques.

La consommation de carburant volumineuse est également une source principale de pollution et d'émissions de (GES), le transport de marchandises (y compris ferroviaire, routier, l'air et les expéditions nationales et internationales vers les États-Unis) est responsable d'environ 470 millions de tonnes métriques (MMT) de CO₂ par an aux États-Unis, soit environ de 7,8% des émissions CO₂ total aux États-Unis (National Transportation Statistics, 2009). Le **tableau I.1** présente les émissions CO₂ des États-Unis provenant du transport intérieur de marchandises par mode de transport entre 1990 et 2007 (Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks, 2009).

Tableau I.1. Émissions de CO₂ dues aux transports de marchandises aux États-Unis (1990-2007)

Mode de transport de marchandise	1990	1995	2000	2005	2006	2007
Camions	228.8	272.7	344.2	395.1	404.5	410.8
Ferroviaire	34.1	39.6	44.9	50.4	52.8	51.6
Bateaux et navires	32.8	40.1	50.6	33.2	36.8	39.1
Avions commerciaux	36.2	38.5	35.2	32.4	32.4	34.6
Pipelines	23.7	24.8	29	25.5	24.5	22.6
Total	355.7	415.6	504.0	536.6	551.2	558.7

La France est un autre exemple typique, dans lequel le trafic marchandises a connu et devrait connaître une croissance rapide de l'ordre de 37% de tonnes-kilomètres de 2005 à 2025. Le transport de marchandises génère 14% des émissions de GES en France, avec un taux de croissance annuel de 23% de 1990 à 2006. L'objectif de ce pays est de réduire ces taux de 20 % en 2020 et de 75 % à l'horizon 2050 (Duong et al., 2008). Ces chiffres montrent l'importance qu'il faut donner aux contraintes environnementales afin de réduire les émissions CO₂ à travers le monde où l'objectif est d'atteindre un pourcentage de réduction de 55% de la quantité totale à l'horizon 2030.

En Algérie, et selon le ministère de l'énergie, les autorités locales s'engagent dans le plan national du climat à réduire les émissions des gaz à effet de serre de 193.3 millions de tonnes soit 1.1 milliards de dollars à l'horizon 2030. La **figure I.4** représente les pourcentages de réduction des émissions CO₂ de 2015 à 2030.

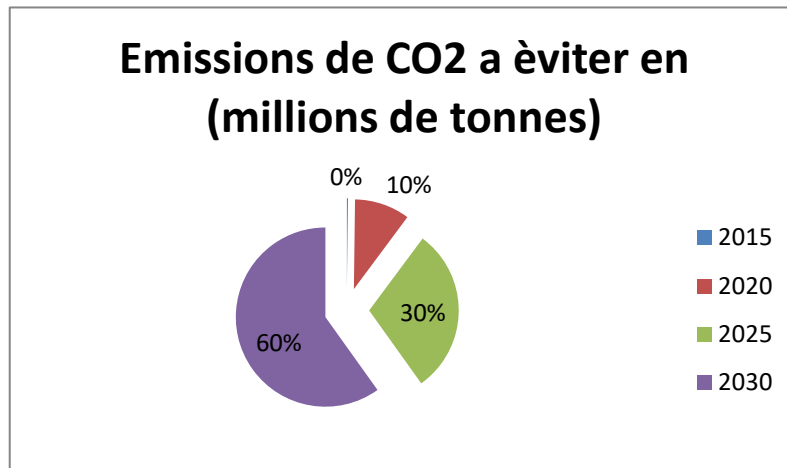


Figure I.4. Récapitulatif des émissions de CO2 à éviter à l’horizon 2030

I.6 Les problèmes de localisation allocation (*Facility Location Problems*)

Un problème de localisation consiste à déterminer l’emplacement d’un ou de plusieurs sites dont l’objectif est d’optimiser une fonction mathématique dépendante des distances entre ces sites et un ensemble d’utilisateurs potentiels. Le premier problème de localisation revient au mathématicien Camille Jordan lorsqu’il étudia un problème concernant les formes quadratiques. Toutefois, l’origine des modèles de localisation-allocation revient au problème d’Alfred Weber lorsqu’il considère un problème de localisation d’un entrepôt afin de minimiser la distance totale entre cet entrepôt et plusieurs clients (Weber, 1929).

"Comment localiser un centre de production de manière à minimiser la distance pondérée entre ce centre et les sources de matières premières?" Le principe des modèles de localisation-allocation est: "on va déterminer tous les sites disponibles simultanément avec l’évaluation de la demande dans ces sites dans une zone géographique donnée et on va sélectionner le site (ou les sites) qui optimise la performance de la firme qui va créer les nouveaux magasins". On peut dire que l’objectif des modèles de localisation-allocation est d’optimiser: le nombre et la localisation des points de vente; l’allocation des consommateurs vers ces points de vente afin de déterminer la capacité d’offre des points de ventes.

Dans un problème de localisation-allocation, on distingue le terme localisation qui fait référence à la détermination des emplacements des sites qui peuvent être des sites de production ou de distribution de l’entreprise et le terme allocation qui fait référence à l’affectation des activités aux sites de production ou des clients aux centres de distribution.

Nombreux sont les domaines de la recherche opérationnelle nécessitant l’utilisation de la théorie de localisation, comme la localisation des antennes de téléphonie mobile, la conception des plateformes logistiques ou encore la localisation des hôpitaux, des écoles et des sites mobiles comme les postes et les véhicules de don de sang. Nous présentons en ce qui suit les différents modèles relatifs aux problèmes de localisation rapportés dans la littérature.

1.6.1 Les problèmes déterministes

Un problème de localisation-allocation revient à deux problèmes de prise de décision à différents niveaux : décision de localisation au niveau stratégique et décision d'allocation au niveau tactique. Nous présentons en ce qui suit les problèmes déterministes qui considèrent des paramètres d'entrées connus et constants et donne une seule solution au problème considéré. Dans ces problèmes les décisions de localisation et les décisions d'allocation doivent être prises simultanément.

A. Le problème médian

L'un des tous premiers problèmes de localisation déterministes est le problème médian. Ce problème introduit par (Hakimi, 1964) consiste à localiser P usines dont l'objectif est de minimiser la distance totale entre les usines et les zones de demande. Les notations suivantes sont utilisées pour la représentation mathématique du problème sont suit :

I : Ensemble des zones de demandes (Clients).

J : Ensemble des places potentiels pour localiser les usines.

h_i : La demande du client i .

P : Nombre d'usine à localiser.

d_{ij} : Le coût de transport du produit entre l'usine j et le client i , qui peut se définir comme la distance entre le client i et l'usine j .

Les variables de décisions associées au problème sont :

X_j : 1 si l'usine j est localisée, 0 sinon.

Y_{ij} : 1 si le client i est affecté à l'usine j , 0 sinon.

En se basant sur les notations ci-dessus, ce problème est modélisé comme suit :

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (1.1)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1.2)$$

$$\sum_{j \in J} X_j = P \quad (1.3)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.4)$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.5)$$

La fonction objectif consiste à minimiser la distance totale entre les usines et les clients, la contrainte (1.2) assure que chaque client i soit servi par une et une seule usine j , la contrainte (1.3) impose la localisation de P usines, la contrainte (1.4) permet d'affecter les clients aux usines localisées et la contrainte (1.5) détermine la nature binaire des variables de décision. (Garey et Johnson, 1979) ont montré que le problème médian est NP- difficile.

B. Le problème de recouvrement (Set covering problem)

Une demande client est dite couverte si elle est servie par une usine dans un temps déterminé, l'objectif de ce problème est de minimiser les coûts de localisation des usines tout en satisfaisant toutes les demandes. Ce problème dont la formulation mathématique nécessite la définition des termes suivants a été formulé pour la première fois par Toregas et al. (1971). La formulation mathématique de ce problème nécessite la définition des termes suivants :

f_j : Le coût de localisation d'une usine à la région j .

MAX : Distance maximale pour un temps de service acceptable.

N_i : L'ensemble des usines j qui peuvent desservir le client i , c'est-à-dire $N_i = \{j \in J / d_{ij} \leq MAX\}$

Ce problème est modélisé comme suit :

$$\min \sum_{j \in J} f_j X_j \quad (1.6)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (1.7)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (1.8)$$

La fonction objectif minimise le coût de localisation des usines, dans la majorité des cas, le coût f_j est identique pour toutes les usines j . Par conséquent, l'objectif revient à minimiser le nombre des usines localisées. La contrainte (1.7) assure que chaque client i soit servi par au moins une usine avec une distance de service acceptable.

C. Le problème de couverture maximale

Le problème de recouvrement permet de déterminer le nombre d'usines nécessaires pour garantir la couverture de l'ensemble des clients. Parfois, les décideurs cherchent à maximiser les demandes couvertes avec la localisation d'un nombre fixe d'usines, ce problème est connu sous le nom de problème de couverture maximale "*maximal covering problem*". Pour la formulation mathématique de ce problème, les mêmes notations précédentes sont gardées, avec l'utilisation d'une nouvelle variable de décision $Y_i = 1$ si la zone de demande i est couverte, 0 sinon.

Le modèle de ce problème proposé pour la première fois par (Church et ReVelle, 1974) se présente comme suit :

$$\max \sum_{i \in I} h_i Y_i \quad (1.9)$$

Sous les contraintes :

$$Y_i \leq \sum_{j \in N_i} X_j \quad \forall i \in I \quad (1.10)$$

$$\sum_{j \in J} X_j \leq P \quad (1.11)$$

$$X_j, Y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.12)$$

L'objectif de ce problème est de maximiser les demandes couvertes, la contrainte (1.10) impose qu'une zone de demande i ne peut être couverte ($Y_i = 1$) que s'il existe au moins une usine j ouverte à une distance de service inférieure à MAX ($\exists j \in J / X_j = 1$ et $j \in N_i$). Si aucune usine n'est ouverte alors aucune zone de demande ne sera couverte. La contrainte (1.11) limite le nombre d'usine à ouvrir.

D. Le problème du centre

Le problème du centre ou encore « *minmax problem* » se présente comme une extension du problème médian dont l'objectif est de minimiser le maximum des distances entre les clients et les usines, On désigne par D la distance maximale entre une zone de demande et l'usine la plus proche, ainsi ce problème se présente comme suit:

$$\min D \quad (1.13)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j \in J} X_j = P \quad (1.14)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1.15)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.16)$$

$$D \geq \sum_{j \in J} d_{ij} Y_{ij} \quad \forall i \in I \quad (1.17)$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.18)$$

Les contraintes (1.14), (1.15) et (1.16) sont identiques aux contraintes (1.2), (1.3) et (1.4) du problème médian. La contrainte (1.17) définit la distance maximale entre la zone de demande i et l'usine la plus proche j . (Kariv et Hakimi, 1979) ont démontré que ce problème est NP difficile.

E. Le problème de localisation des sites à deux niveaux

Constituant la base de plusieurs modèles de localisation, le problème de localisation des sites à deux niveaux appelé aussi dans la littérature « *Fixed Charge Facility Location Problem* » consiste à trouver la meilleure localisation des sites (CDs, usines ou entrepôts) à utiliser pour servir un ensemble de clients en minimisant les coûts fixes de localisation des sites ainsi que les coûts de transport des sites vers les clients tout en assurant que toutes les demandes des clients soient satisfaites. Ce problème existe en deux versions : les problèmes où la capacité des sites est limitée (*Uncapacitated fixed charge facility location problem* - UCFLP)" et les problèmes où les sites ont une capacité finie (*Capacitated plant location problem* - CPLP)". La modélisation du problème (UCFLP) donnée pour la première fois par (Manne, 1964) est la suivante :

$$\min \sum_{j \in J} f_j X_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (1.19)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1.20)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.21)$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.22)$$

Il est clair que le problème (UCFLP) est formulé en ajoutant à la fonction objectif du problème médian le coût fixe total de localisation des sites. Dans ce problème le nombre de site à localiser n'est pas fixé a priori d'où la suppression de la contrainte limitant le nombre de sites à localiser. Les contraintes (1.20), (1.21) et (1.22) sont identiques aux contraintes du problème médian.

Pour le problème (CPLP), nous considérons des sites potentiels avec une capacité limitée, ce problème est modélisé comme suit :

$$\min \sum_{j \in J} f_j X_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (1.23)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1.24)$$

$$\sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} \leq \text{MAX}_j X_j \quad \forall j \in J \quad (1.25)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (1.26)$$

$$0 \leq Y_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.27)$$

Où MAX_j désigne la capacité maximale de l'usine j et Y_{ij} représente la fraction (pourcentage) de la demande du client i livrée à par l'usine j . La contrainte (1.24) permet la satisfaction des demandes pour tous les clients. La contrainte (1.25) assure que la somme des demandes couvertes par l'usine j ne dépasse pas la capacité maximale de cette usine.

1.6.2 Les problèmes de localisation stochastiques

Malgré la grande importance donnée aux modèles de localisation déterministes qui supposent que tous les paramètres sont connus et déterministes et leurs larges utilisations dans la conception des chaînes logistiques, nombreux sont les auteurs qui considèrent des problèmes avec des paramètres aléatoires vu la difficulté de les définir à priori, tels que la demande, le délai d'approvisionnement ou encore l'indisponibilité des sites. Ces chercheurs ont introduit d'autres paramètres liés à l'incertitude puisque les modèles déterministes ne reflètent pas vraiment les problèmes rencontrés dans la vie réelle.

Il existe deux types de problèmes de localisation stochastique dans la littérature, ceux basées sur des variables aléatoires (modèles probabilistes) et ceux basée sur des scénarios. Dans les deux cas n'importe quel nombre de paramètres peut être aléatoire.

Les modèles probabilistes considèrent des distributions de probabilité pour les paramètres aléatoires tandis que les modèles basés sur des scénarios considèrent un ensemble de valeurs possibles des paramètres. Un modèle médian stochastique basé sur des scénarios est présenté ci-dessous en utilisant les notations suivantes :

k : Index des scénarios possibles.

h_{ik} : La demande du client i sous le scénario k .

d_{ijk} : La distance entre le client i et l'usine j sous le scénario k .

\widehat{V}_k : La solution optimale du problème médian sous le scénario k .

q_k : La probabilité d'occurrence du scénario k .

X_j : 1 si on localise l'usine j , 0 sinon.

Y_{ijk} : 1 si le client i est servi par l'usine j sous le scénario k , 0 sinon.

Le regret associé au scénario k est défini par $R_k = V_k - \widehat{V}_k$ où V_k est la fonction objectif du problème médian sous le scénario k c'est-à-dire :

$$V_k = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_{ijk} d_{ijk} Y_{ijk} \quad (1.28)$$

Ainsi, le problème est formulé comme suit :

$$\min \sum_k q_k R_k \quad (1.29)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j \in J} X_j = P \quad (1.30)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I, \forall k \quad (1.31)$$

$$Y_{ijk} \leq X_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \quad (1.32)$$

$$R_k - \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_{ijk} d_{ijk} Y_{ijk} - \widehat{V}_k \right) = 0 \quad \forall k \quad (1.33)$$

$$X_j, Y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \quad (1.34)$$

La fonction objectif minimise le regret total défini pour chaque scénario par l'équation (1.33), les contraintes (1.30), (1.31) et (1.32) sont identiques à celles du problème médian. Notons que la localisation des sites est effectuée avant la connaissance des scénarios, cette localisation est donc identique pour tous

les scénarios. Par contre, les sites localisés sont affectés aux différents clients en fonction du scénario produit.

Nous pouvons aussi minimiser le regret maximum à travers les scénarios. Pour ce faire, les mêmes contraintes précédentes sont utilisées avec la fonction objectif suivante :

$$\min \max_k \{R_k\} \quad (1.35)$$

1.6.3 Les problèmes de localisation intégrant l'aspect stockage

L'une des opérations opérationnelles à laquelle les entreprises donnent énormément d'importance à court et moyen terme est la gestion des stocks. De ce fait, l'entreprise se trouve obligée de prendre en considération ces décisions opérationnelles lors de la conception de sa chaîne logistique au niveau stratégique.

Nombreux sont les chercheurs qui ont lié les problèmes de localisation à la gestion des stocks par l'intégration de fonctions représentant le stock dans la fonction objectif des différents modèles de base cités précédemment. Ceci est dû au fait que la problématique consistant à déterminer la quantité des produits à stocker et du niveau des stocks de sécurité à maintenir dans les entrepôts est d'une très grande importance pour les entreprises. Le lecteur peut se référer aux travaux suivants pour plus de détails ((Nozick et Turnquist, 2001); Daskin et al. (2002); Shen et al. (2003); Tanonkou et al. (2005); Tanonkou et al. (2008)).

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles utilisés dans la théorie de la localisation des sites. Plusieurs méthodes et outils basés sur des heuristiques et des métaheuristiques ont été développés et utilisés pour la résolution de ces problèmes. Concevoir des chaînes logistiques fiables rapides et rentables nécessite la prise en considération des paramètres stochastiques et de l'aspect stockage afin de répondre efficacement aux demandes clients.

En outre, un intérêt particulier a été donné aux statistiques liées aux coûts logistiques et aux contraintes environnementales afin de montrer l'impact de ces derniers sur la performance globale des systèmes logistiques et l'économie mondiale. Ces deux critères sont considérés comme fonctions objectifs dans la problématique de recherche traitée dans cette thèse.

Chapitre II.

Méthodes d'optimisation mono et multi-objectifs

Utilisée pour la modélisation et la résolution de nombreux problèmes en recherche opérationnelle et en mathématiques appliquées, l'optimisation se trouve comme base de résolution de plusieurs modèles analytiquement ou numériquement. Ce chapitre est dédié à la présentation des méthodes d'optimisation mono et multi-objectifs utilisées dans le cadre de cette thèse. Les adaptations des métaheuristiques mono-objectif à savoir la recherche tabou, le recuit simulé et les algorithmes génétiques sont présentées. Nous détaillons aussi l'adaptation de l'algorithme NSGA-II pour le cas multiobjectif. De plus, la méthode TOPSIS est décrite comme méthode de sélection de la meilleure solution, parmi l'ensemble des solutions formant le front Pareto pour le cas multiobjectif.

II.1 Introduction

Les décideurs sont souvent confrontés à des problèmes technologiques de complexité grandissante liés à des applications surgissant de divers domaines. Ces problèmes sont souvent formulés sous forme de problèmes d'optimisation qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction tout en respectant un ensemble de contraintes.

De nombreuses méthodes classiques peuvent être utilisées pour résoudre ces problèmes, mais cela reste soumis à certaines conditions mathématiques. Malheureusement, nombreuses sont les situations rencontrées dans la réalité qui nécessitent des outils de résolution plus performants comme la non-linéarité de la fonction objectif ou la considération de plusieurs objectifs contradictoires limitant fortement le recours aux méthodes classiques.

Des méthodes mono et multi-objectifs basées principalement sur les métaheuristiques sont proposées dans le cadre de cette thèse. Par conséquent, nous consacrons ce chapitre à la présentation des concepts de base de l'optimisation, tout en donnant une attention particulière aux métaheuristiques.

II.2 Optimisation mono-objectif

Un problème d'optimisation peut être défini comme la recherche des valeurs des variables de décision permettant de minimiser ou de maximiser une fonction objectif. Cette fonction peut représenter des coûts, une consommation d'énergie, la distance d'un chemin parcouru... La forme mathématique d'un problème d'optimisation se présente sous la forme suivante:

$$\min f(X)$$

Sous les contraintes

$$g(X) \leq 0$$

$$h(X) = 0$$

Ce modèle optimise la fonction $f(X)$, où X est un vecteur représentant l'ensemble des variables de décisions. Les fonctions $g(X)$ et $h(X)$ sont les contraintes du modèle.

II.3 Les métaheuristiques

Les métaheuristiques permettent d'obtenir des solutions de bonne qualité sans garantie d'optimalité mais au profit d'un temps de calcul réduit. Présentées sous forme de concept, les métaheuristiques sont des méthodes générales de recherche dédiées aux problèmes d'optimisation difficile (Sait et al., 1999). Ces méthodes s'inspirent généralement de phénomènes naturels, elles sont le plus souvent itératives et offrent la possibilité d'éviter les minimaux locaux au cours de leur progression grâce au principe de

diversification. Ce principe offre la possibilité de garder les mauvaises solutions et continuer la recherche du minimum global.

Les métaheuristiques peuvent être classifiées de différentes façons. On peut distinguer celles manipulant plusieurs solutions comme les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules et les algorithmes de colonies de fourmis et celles qui se basent sur une seule solution comme la recherche tabou et le recuit simulé.

II.3.1 Le recuit simulé (*Simulated annealing*)

Introduit par Kirkpatrick et al. (1983) comme une méthode de recherche locale normale tout en utilisant une stratégie permettant d'éviter les minimaux locaux. Cette métaheuristique s'inspire d'une technique utilisée par les métallurgistes qui utilisent un réchauffement lent afin d'obtenir un alliage sans défaut.

L'algorithme du recuit simulé commence sa recherche dans l'espace des solutions par une solution aléatoire S_0 pour laquelle correspond une énergie E_0 et une température initiale T_0 . A chaque itération une modification élémentaire sur la solution est effectuée ce qui fait varier l'énergie d'une valeur ΔE . La nouvelle solution est acceptée si elle améliore l'énergie du système. Le cas échéant, la solution est acceptée avec une probabilité $\exp^{-\frac{\Delta E}{T}}$.

Les étapes de l'algorithme du recuit simulé sont décrites ci-dessous :

Algorithme II.1 Recuit simulé

1. Générer une solution initiale S_0 aléatoirement $S = S_0$
 2. Initialiser la température T
 3. Répéter
 4. Engendrer un voisin aléatoire S' de S par modification élémentaire
 5. Calculer $\Delta E = f(S') - f(S)$
 6. Si $\Delta E \leq 0$ alors $S = S'$
 7. Sinon accepter la solution S' avec la probabilité $\exp^{-\frac{\Delta E}{T}}$
 8. Réduire la température (Schéma de refroidissement)
 9. Jusqu'à la condition d'arrêt
 10. Retourner la meilleure solution trouvée
-

II.3.2 La recherche tabou (Tabu search)

Introduite principalement par (Glover, 1987), la recherche tabou est une méthode de recherche locale qui évite de tomber sur un minimum local ou la répétition d'un cycle. En outre, cette méthode démarre par une solution initiale aléatoire S et génère un ensemble de solutions $N(S)$ voisines à S . La prochaine étape retient la solution améliorant au mieux la fonction objectif de l'ensemble $N(S)$. Une liste tabou de taille limitée est mise en œuvre contenant les dernières solutions visitées et gérée en FIFO ce qui permet d'éviter de stocker des solutions déjà visitées. Les étapes de l'algorithme de recherche tabou se présentent comme suit:

Algorithme II.2 Recherche tabou

1. Initialisation :

S_0 : solution initiale générée aléatoirement

$S = S_0, S^* = S_0, C^* = f(S_0)$

$T = \emptyset$

2. Générer un ensemble de solutions voisines à S

Choisir $S' \in N(S)$ tel que $\forall x \in N(S), f(S') \leq f(x)$ et $S' \notin T$

Si $f(S') \leq C^*$ alors $S^* = S', C^* = f(S')$

Mettre à jour la liste T

3. Revenir à l'étape 2 jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt

4. Retourner la meilleure solution trouvée

II.3.3 Les algorithmes génétiques (Genetic algorithms)

Fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique, les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique adaptés à l'optimisation par (Holland, 1975) et enrichi par les travaux de David Goldberg (Goldberg, 1989) et (Goldberg et Holland, 1989).

Le vocabulaire utilisé est identique à celui de la théorie de la génétique, on emploie le terme individu (solution potentielle), population (ensemble de solutions), génotype (une représentation de la solution), gène (une partie du génotype), parent, enfant, reproduction, croisement, mutation, génération, etc.

Le fonctionnement des algorithmes génétiques consiste à démarrer à partir d'une population initiale générée aléatoirement. Une évaluation en termes de fonction objectif est effectuée pour chaque solution. Une nouvelle population est générée en utilisant les opérateurs de reproduction à savoir la sélection, le croisement et la mutation. Les individus les mieux adaptés sont supposés survivre. Ce cycle est répété

jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante est obtenue (voir algorithme II.3). Les différentes opérations de reproduction sont expliquées en ce qui suit :

- **Sélection:**

Utilisée pour identifier statistiquement les meilleurs individus, la sélection est un opérateur utilisé pour préparer les solutions aux opérateurs de croisement et mutation. L'opérateur de sélection doit être conçu pour donner également une chance aux mauvais éléments qui peuvent engendrer des descendants de bonne qualité après reproduction. Il existe plusieurs techniques de sélection, les principales utilisées sont (Deb, 1999) : la sélection par rang, qui consiste à choisir les individus possédant les meilleures fitness. La technique de la roulette de fortune, où la probabilité de sélection d'un individu est proportionnelle à sa fitness. La sélection par tournoi utilise la sélection proportionnelle sur des paires d'individus, puis choisi parmi ces paires l'individu ayant la meilleure fitness. La sélection uniforme se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la fitness. Chaque individu a donc une probabilité $1/P$ d'être sélectionné, où P est le nombre total d'individus de la population.

- **Croisement:**

L'opérateur de croisement favorise l'exploration de l'espace de recherche et enrichit la diversité de la population en manipulant les chromosomes, le croisement est fait avec deux parents et génère deux enfants par échange des parties de leurs chaînes (figure 2.1). Ces croisements peuvent être simples (sur un seul point de croisement) ou multiples (sur plusieurs points de croisement). Cet opérateur est effectué avec une probabilité de croisement P_c .

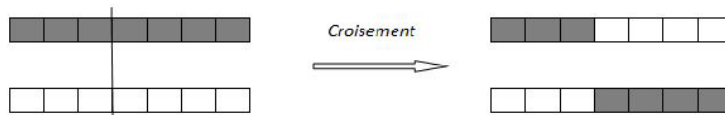


Figure II.1. Un croisement à un point

- **Mutation:**

Permettant d'introduire de la diversité et ainsi d'éviter de tomber dans des optimums locaux, l'opérateur de mutation est un processus où un changement mineur du code génétique est appliqué à un individu donné (voir la figure II.2). Cet opérateur est réalisé avec une probabilité de mutation $P_m < P_c$.

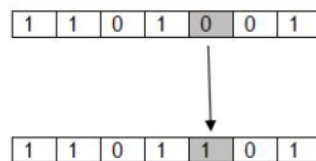


Figure II.2. Exemple de mutation dans le cas d'un codage binaire

Algorithme II.3 Algorithme génétique

1. Générer population initiale aléatoirement
 2. Répéter
 3. Calculer la fitness pour tous les individus de la population
 4. Exécuter les opérateurs de sélection, croisement et mutation
 5. Jusqu'à ce que la condition d'arrêt est atteinte
 6. Retourner la meilleure solution trouvée
-

II.4 Optimisation multiobjectif

Le modèle présenté précédemment considère une seule fonction objectif. Cependant, les décideurs sont souvent amenés à considérer plusieurs objectifs simultanément. Par exemple, on veut augmenter la qualité d'un produit tout en minimisant son coût de revient. Dans ce cas, on parle de problème d'optimisation multiobjectif ou (problème d'optimisation multicritère). Ce problème est décrit de la façon suivante :

$$\min F(X) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}$$

Sous les contraintes

$$g(X) \leq 0$$

$$h(X) = 0$$

Dans ce cas, $F(X)$ représente un ensemble de fonctions objectif à optimiser, où X est un vecteur représentant l'ensemble des variables de décisions. Les fonctions $g(X)$ et $h(X)$ sont les contraintes du modèle.

Sachant que les objectifs dans une optimisation multicritère sont souvent contradictoires, il est clair qu'atteindre un optimum pour une fonction objectif se fera en détriment des autres objectifs. Par conséquent, les solutions obtenues représentent un compromis puisqu'elles minimisent un certain nombre d'objectifs tout en dégradant les performances des autres objectifs.

Le compromis obtenu représente l'ensemble des solutions formant le front Pareto, appelées aussi solutions non dominées. Une solution x^* est dite non dominée si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

$$\forall i \in n \quad f_i(x^*) \leq f_i(x)$$

$$\exists j \in n \quad f_j(x^*) < f_j(x)$$

Pour tout x appartenant à l'ensemble des solutions réalisables.

Les solutions qui ne se dominent pas entre elles sont appelées solutions optimales au sens de Pareto, ces solutions forment le front Pareto (Voir la **figure II.3**). L'exemple illustré dans la figure II.3 minimise les fonctions f_1 et f_2 .

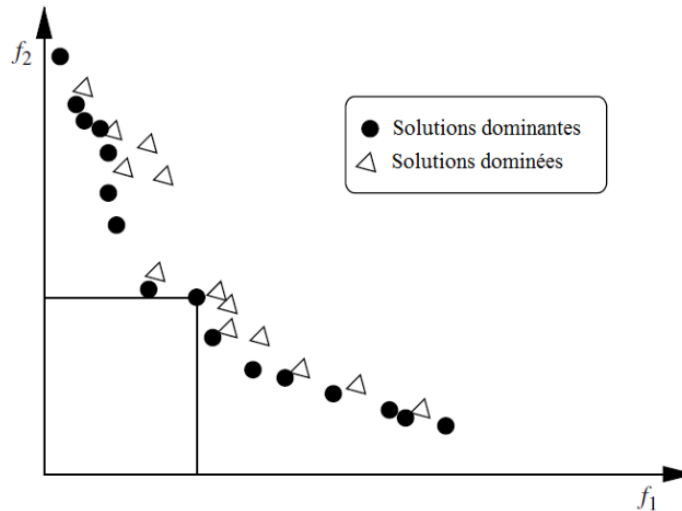


Figure II.3. Solutions dominées et front Pareto

Plusieurs méthodes d'optimisation multicritères sont rapportées dans la littérature, ces méthodes sont classées en quatre grandes familles selon la nécessité ou non d'utiliser des informations fournies par le décideur (Lu et al., 2007). La section suivante présente les méthodes basées sur la transformation de plusieurs critères en un seul critère appelées méthodes scalaires.

II.4.1 Méthodes scalaires

A. Méthode d'agrégation

Appelée aussi l'approche naïve de l'optimisation multiobjectif (Coello, 1998), cette méthode consiste à transformer plusieurs critères en un seul par l'addition de tous les objectifs après pondération de chacun par un coefficient qui représente l'importance relative attribuée à l'objectif par le décideur. Cette méthode peut être décrite comme suit :

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x)$$

Tel que $w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \geq 0$ représente le vecteur des coefficients affectés à chacun des objectifs, où les coefficients doivent vérifier la contrainte suivante : $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

Il est clair que la méthode d'agrégation est simple à mettre en œuvre dans le cas où le décideur cherche à trouver une seule solution, la seule difficulté réside dans le choix des coefficients des différents critères.

B. Programmation par but

Dans cette méthode, un but à atteindre V_i est fixé par le décideur pour chaque objectif f_i , les fonctions représentant l'écart entre f_i et V_i sont introduites dans les contraintes. Donc, l'objectif de l'optimisation multicritères est transformé en un seul objectif qui consiste à minimiser la déviation des buts (différence entre objectifs et buts). Une autre méthode similaire à la programmation par but appelée min-max consiste à minimiser le maximum de l'écart entre un objectif et son but associé. Cette méthode peut être décrite comme suit:

$$\min g(x) = \left[\sum_{i=1}^n |V_i - f_i(x)|^r \right]^{1/r} \quad r > 1$$

C. Méthode ε -constraint

Cette méthode consiste à minimiser un objectif f_i en considérant que les autres objectifs f_j ($j \neq i$) comme des contraintes du modèle. Cette méthode peut être décrite par le modèle ci-dessous:

$$\min f_i(x)$$

Sous les contraintes :

$$f_j(x) \leq \varepsilon_j \quad j = 1..n \text{ et } j \neq i$$

Cette méthode nécessite bien évidemment la connaissance à priori des intervalles appropriés pour les valeurs ε_j pour tous les objectifs.

II.4.2 *Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)*

Nombreux sont les algorithmes génétiques multicritères (MOGA) présentés dans la littérature, nous nous limitons ici à la présentation de l'algorithme NSGA-II développé par Deb et al. (2002). Cet algorithme est considéré par les praticiens comme étant le MOGA le plus performant.

L'algorithme NSGA-II génère initialement une population P de taille N, d'une manière aléatoire, l'ensemble des solutions est trié en basant sur le principe de la non-dominance, une population G de taille N est générée à partir de P en utilisant les opérateurs de sélection, croisement et mutation. De ce fait, une population R de taille $2*N$ est obtenue, les solutions de cet ensemble sont triées en basant sur le principe de la non-dominance. Une nouvelle population est créée en ajoutant les solutions du rang le plus faible à partir de la population F jusqu'à obtenir une taille de population supérieure ou égale à N.

Dans le cas où la taille de la nouvelle population est supérieure à N, les solutions du dernier front accepté sont triées en fonction de l'opérateur de densité (*Crowd comparison operator*) et les N premières

solutions sont sélectionnées. De ce fait, une nouvelle population de taille N est obtenue et l'algorithme est exécuté pour un certain nombre d'itérations. Ces étapes sont présentées dans l'algorithme 2.4.

Algorithme II.4 Algorithme NSGA-II

1. Générer population P initiale de taille N aléatoirement
 2. Répéter :
 3. Trier les solutions de P en basant sur le principe de la non-dominance
 4. Exécuter les opérateurs de sélection, croisement et mutation et générer une population G de taille N
 5. $R = P \cup G$
 6. Trier les solutions de R en basant sur le principe de la non-dominance
 7. Sélectionner les N meilleure solution de R et exécuter le « crowd comparaison operator » en cas de besoin, ces solutions sont sauvegardées dans P
 8. Jusqu'à la satisfaction de la condition d'arrêt
-

Pour chaque individu d'une population, NSGA-II détermine deux attributs, respectivement un rang de non-dominance i_{rank} et une distance "crowding" $i_{distance}$ qui représente la densité des individus sur la frontière Pareto.

Nous définissons l'opérateur \geq_n appelé Crowd comparaison operator comme suit :

$i \geq_n j$ si et seulement si $i_{rank} < j_{rank}$ ou $((i_{rank} = j_{rank}) \text{ et } (i_{distance} > j_{distance}))$

Cet opérateur signifie que la solution possédant le meilleur rang est sélectionnée. D'autre part, la solution possédant un voisinage moins dense est choisie en cas d'égalité de rang. La distance "crowding" donne priorité aux individus des zones de faible densité de population. Comme le montre l'exemple illustré dans le **figure II.4**, la distance "crowding" de la i ème solution dans cette frontière est égale à la longueur moyenne des bordures (côtés) du cube cadrant cette solution mais ne contenant aucune autre solution.

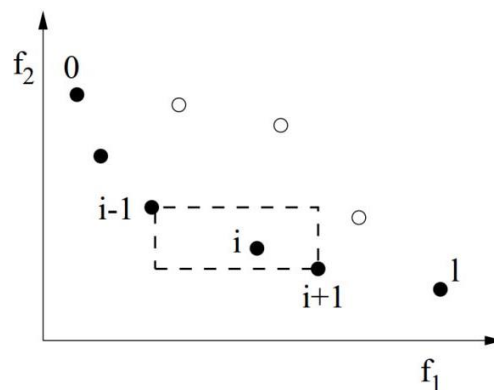


Figure II.4. Crowding distance

Le calcul de la distance "crowding" de chaque point du front est basé sur l'algorithme suivant:

Algorithme II.5 Fonction de calcul de la distance "crowding"

```

nb = | I | (Nombre de solutions sur le front I)

Pour chaque solution  $i \in I$ 
  I[i]distance = 0
  Fin pour
  Pour chaque objectif m
    Trier les solutions suivant l'objectif m
    I[1]distance =  $\infty$ 
    I[nb]distance =  $\infty$ 
    Pour i = 2 jusqu'à nb-1
      I[i]distance = I[i]distance + (I[i+1].m - I[i-1].m) / ( $f_m^{max} - f_m^{min}$ )
    Fin pour
  Fin pour

```

Où I[i].m signifie la valeur de la m^{ème} fonction objectif de l'individu i de la population I.

II.5 La méthode TOPSIS

Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) est une technique d'aide à la décision multicritères pour le classement et la sélection parmi un certain nombre d'alternatives via la distance euclidienne. Développée par (Hwang et Yoon, 1981), TOPSIS peut être utilisée comme une forme à posteriori pour aider le décideur à faire son choix parmi les solutions Pareto optimales. TOPSIS est capable de trier les solutions du front Pareto en considérant les solutions comme des alternatives et les valeurs des fonctions objectif de chaque solution comme des critères.

La méthode TOPSIS se définit en sept étapes :

1. Établir une matrice X, où un ensemble d'alternatives $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_k$ sont comparées sur des critères $c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_k$.
2. Normaliser la matrice de décision pour obtenir une nouvelle matrice R d'éléments r_{ij} tel que:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^k x_{ij}^2}}$$

3. Calculer la matrice normalisée pondérée. Les poids w_{ij} sont donnés par les décideurs pour représenter leurs préférences entre les critères, avec $\sum_{i=1}^n w_i$

$$v_{ij} = w_i * r_{ij}$$

4. Définir l'idéal positif V^+ et l'idéal négatif V^-

$$V^+ = (best_j(v_{1j}), best_j(v_{2j}), \dots, best_j(v_{nj}))$$

$$V^- = (worst_j(v_{1j}), worst_j(v_{2j}), \dots, worst_j(v_{nj}))$$

$$\text{Où } best_j(v_{1j}) = \begin{cases} \max_j(v_{ij}) & \text{Si } c_i \text{ est bénéfique} \\ \min_j(v_{ij}) & \text{Si } c_i \text{ n'est pas bénéfique} \end{cases}$$

$$\text{et } worst_j(v_{1j}) = \begin{cases} \min_j(v_{ij}) & \text{Si } c_i \text{ est bénéfique} \\ \max_j(v_{ij}) & \text{Si } c_i \text{ n'est pas bénéfique} \end{cases}$$

Un critère est bénéfique si son augmentation constitue un gain.

5. Calculer pour chaque alternative, la distance euclidienne entre l'idéal positif et l'idéal négatif, notées d_j^+ et d_j^- respectivement :

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2}$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}$$

6. Calculer le degré de proximité au positif idéal D_j^+ . Plus D_j^+ est important, plus l'alternative est proche de l'idéal positif et loin de l'idéal négatif :

$$D_j^+ = \frac{d_j^-}{d_j^- + d_j^+}$$

7. Finalement, trier les solutions par rapport à D_j^+ . Les alternatives seront alors classées par ordre de préférence.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par détailler les métaheuristiques mono-objectif utilisées dans cette thèse à savoir le recuit simulé, la recherche tabou et les algorithmes génétiques. La deuxième partie du chapitre a été consacrée à l'optimisation multiobjectif. Par ailleurs, des présentations de la métaheuristique multicritère NSGA-II et des étapes de la méthode TOPSIS utilisées dans notre approche multiobjectif proposée dans cette thèse sont détaillées, permettant une meilleure compréhension des approches proposées à travers les chapitres suivants.

Chapitre III.

Revue de la littérature des problèmes de localisation et positionnement de la problématique de recherche

Dans un contexte de conception de réseau de distribution, nombreuses sont les entreprises qui sont confrontées à des décisions stratégiques permettant de déterminer le nombre et l'emplacement des centres de distribution (CDs) à localiser. Les incertitudes et les variations stochastiques au sein des réseaux de distribution rendent ces décisions complexes, coûteuses et difficiles à modifier. En effet, les incertitudes qui affectent le système peuvent sérieusement dégrader ses performances.

Ce chapitre présente un état de l'art sur les problèmes de localisation des sites fiables, mobiles, dynamiques et durables. Nous nous intéressons particulièrement aux problématiques abordées, aux modèles développés et aux approches de résolution proposées relatives aux problèmes de localisation des sites considérés dans notre thèse. Nous montrons aussi le positionnement de notre problématique de recherche par rapport aux travaux cités ainsi que les objectifs visés.

III.1 Introduction

La notion de Supply Chain Management (SCM) est la mise en œuvre efficace de toutes les activités de la chaîne logistique et cela en tenant compte de toutes les opérations, depuis l'approvisionnement en matières premières à la distribution des produits finis, comme la conception des produits, la fabrication, les ventes, le stockage et le transport... (voir le Council of Supply Chain Management Professionals).

La SCM nécessite un ensemble de décisions réparties en fonction de leur portée temporelle et de leur influence sur la compétitivité de l'entreprise en trois niveaux: stratégique, tactique et opérationnel. Les décisions stratégiques sont sur le long terme et sont celles qui ont une grande influence sur les performances de l'entreprise. Ces décisions visent à trouver la meilleure configuration de la chaîne d'approvisionnement et couvrent le choix des emplacements des sites, le nombre et les capacités des usines et des entrepôts et les modes de transport utilisés (Simchi-Levi et al. (2004); (Meixell et Gargeya, 2005)).

La littérature consacrée aux problèmes de conception des réseaux de distribution est très riche. (Klose et Drexel, 2005) ont présenté un état de l'art étendu dédié aux modèles de localisation des sites pour la conception des réseaux de distribution. Les formulations de modèles et d'approches varient considérablement en termes d'hypothèses fondamentales, de complexité mathématique et de performances de calcul.

(Revelle et Eiselt, 2005) ont étudié un certain nombre de problèmes de décision importants qui concernent la localisation des sites. Ils ont affirmé que : «le domaine est très actif et de nombreux problèmes intéressants sont toujours à l'étude, du point de vue de l'énoncé du problème / formulation mathématique et algorithmique et résolution des problèmes. Bien que le domaine soit actif du point de vue de la recherche, en ce qui concerne les applications, il semble y avoir un déficit important, au moins par rapport à d'autres domaines similaires ».

Nous présentons en ce qui suit des travaux de recherche récents liés aux problèmes de localisation abordés dans notre thèse, nous nous intéressons particulièrement aux modèles de localisation fiables, dynamiques, mobiles et durables, un résumé des travaux de recherche cités est présenté à travers les **tableaux III.1 et III.2.**

III.2 Les problèmes de localisation

L'optimisation de la chaîne logistique est obtenue en intégrant les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles prises en termes de conception, de gestion et de contrôle des activités. Gebennini et al. (2009) et Melo et al. (2009) ont montré l'importance des décisions de localisation des sites dans la gestion de la chaîne logistique (SCM). Les auteurs ont présenté une discussion approfondie sur l'intégration de différentes décisions de planification dans les décisions classiques de localisation des sites et ont affirmé

que, malgré l'existence de plusieurs travaux qui envisagent l'intégration de tous les niveaux de décision dans les problèmes de SCND, de nombreuses recherches sont encore nécessaires pour intégrer d'autres concepts afin de se rapprocher des problèmes de la vie réelle.

Les problèmes de localisation des sites ont été largement discutés dans la littérature au cours des dernières années et ont intéressé de nombreux praticiens et académiciens en raison de leurs nombreuses applications dans le domaine de la recherche opérationnelle. Melo et al. (2009) ont présenté une revue de la littérature intéressante sur les problèmes de localisation des sites et de conception des chaînes logistiques. Daskin donne également des revues de littératures détaillées sur les modèles de localisation des sites et leurs applications voir ((Daskin, 1995); (Daskin, 2008); (Krarup, 1983); (Aikens, 1985); (ReVelle et Eiselt, 2005); ReVelle et al. (2008); (Bischoff et Kerstin, 2009)) pour plus de détails. De nombreuses variantes de ce problème ont été développées depuis l'apparition de la première formulation de (Weber, 1957), en particulier le problème P-médian, le problème du centre, le problème de couverture maximale, le problème de localisation des sites à deux niveaux avec capacités infinies (UFLP) et le problème de localisation des sites à deux niveaux avec capacités finies (CFLP) pour les cas mono et multi produits.

Introduit pour la première fois par (Manne, 1964), le problème de la localisation des sites à capacités infinies (UFLP) qui vise à trouver le nombre optimal de sites et leurs emplacements à partir d'un ensemble de sites potentiels et d'affecter des clients aux sites ouverts afin de trouver le meilleur compromis entre les coûts de localisation et les coûts de transport. Ce problème a fait l'objet de plusieurs articles et travaux de recherche ((Daskin, 1995); (Galvao, 1993); (Drezner, 1995); (Owen et Daskin, 1998); (Al-Sultan et Al-Fawzan, 1999)). Plusieurs algorithmes comme la Relaxation Lagrangienne ((Daskin, 1995); (Galvao, 1993)) et métaheuristiques ((Al-Sultan et Al-Fawzan, 1999); Maliki et al. (2017)) sont proposés pour résoudre le (UFLP). Cependant, pour une bonne gestion des stocks des sites localisés, connaître le nombre nécessaire d'entrepôts et / ou de CDs est insuffisant. En effet, déterminer la quantité de produits à stocker et le niveau du stock de sécurité à maintenir dans chaque site est d'une grande importance pour l'entreprise. Pour cette raison, certains chercheurs considèrent le UFLP avec l'intégration des décisions de gestion des stocks en ajoutant les coûts de stockage et de maintien des stocks de sécurité à la fonction objectif (Daskin et al., (2002); Shen et al. (2003)). Chen et al. (2011) ont affirmé que lorsque les coûts de stockage sont pris en compte, les clients ne peuvent pas être alloués aux sites en se basant uniquement sur leur proximité de ces derniers. (Nozick et Turnquist, 1998) ont analysé l'effet du coût de maintien des stocks de sécurité sur la localisation des CDs en se basant sur un cas d'étude d'industrie automobile. Farahani et al. (2014) ont présenté un état de l'art détaillé sur les problèmes de localisation des sites avec gestion de stock et ont proposé un modèle mathématique représentant ce problème en se basant sur le modèle du UFLP.

III.2.1 Les problèmes de localisation fiables

Compte tenu des différents paramètres considérés dans les problèmes de localisation des sites, ces derniers sont sujets à des perturbations aléatoires. (Snyder et Daskin, 2005) définissent la « fiabilité » d'un système comme la capacité de bien à fonctionner malgré l'indisponibilité de certaines de ses parties. Le concept de fiabilité est introduit dans la théorie de la conception des réseaux (Shoorman, 2002) et il est souvent considéré lorsqu'il s'agit de concevoir des réseaux de télécommunication, de transport d'énergie et des produits pétroliers ou la localisation des sites (usines, entrepôts, centres de distribution) et des véhicules des services d'urgence. Par conséquent, il est important de comprendre comment concevoir des chaînes logistiques robustes et fiables. Sachant que l'avenir de la conception des chaînes logistiques est basé sur des demandes aléatoires et des perturbations dues aux indisponibilités des sites (Klibi et Martel, 2012), la question qui se pose est comment pouvons-nous concevoir une chaîne logistique capable de rebondir rapidement lorsqu'elle est affectée par des perturbations? Cela peut être fait en concevant des structures de réseau flexibles et/ou redondantes (Sheffi, 2005) et en développant de meilleures politiques de résilience (Klibi et Martel, 2012). (Li et Ouyang, 2010) ont observé que si un site est indisponible, des coûts de transport excessifs sont générés puisque ses clients seront satisfaits par d'autres sites opérationnels. Les clients sont obligés de parcourir de longues distances pour obtenir le service souhaité d'un autre site ou de renoncer au service et encourir des pénalités en cas d'indisponibilité. Les pénalités sont dues à la non-satisfaction de la demande des clients en question.

Le concept de fiabilité est considéré par plusieurs chercheurs dans les problèmes de localisation, une même probabilité d'indisponibilité des sites est supposée par ((Snyder et Daskin, 2005); Snyder et al. (2006) et Shen et al. (2011)). (Snyder et Daskin, 2005) ont présenté deux modèles de fiabilité pour le problème P-médian et le problème UFLP. Les deux modèles affectent chaque client à un fournisseur principal et à un ensemble de fournisseurs de secours contenant au moins un fournisseur totalement fiable. Li et al. (2013) ont étendu les deux modèles en considérant des probabilités d'indisponibilité des sites hétérogènes et la fortification des sites avec budget limité. Un coût de pénalités pour les demandes non satisfaites est considéré par Snyder et al. (2006) et (Li et Ouyang, 2010). Des modèles basés sur des scénarios sont présentés par Snyder et al. (2006) et Shen et al. (2011) en considérant que tous les sites possèdent la même probabilité d'indisponibilité. Snyder et al. (2006) ont supposé que chaque client affecté initialement aux sites indisponibles doit être réaffecté à d'autres sites opérationnels. Les clients ne seront pas desservis dans le cas où tous les sites sont indisponibles. Shen et al. (2011) ont proposé un modèle mathématique stochastique en considérant deux étapes, la première étape détermine les sites ouverts et la seconde permet d'affecter tous les clients aux sites opérationnels après résolution de l'incertitude, l'ouverture de nouveaux sites dans cette étape n'est pas permise.

(Klibi et Martel, 2012) ont considéré un réseau de distribution d'une entreprise qui achète des produits de la même famille auprès d'un ensemble de fournisseurs et utilise des dépôts à capacités infinies pour servir

ses clients avec la possibilité d'indisponibilité des dépôts. Lim et al. (2010) ont considéré la possibilité de satisfaire toutes les demandes des clients en considérant deux types de sites, les premiers étant les sites non fiables qui peuvent devenir indisponibles avec une certaine probabilité, et les seconds sont des sites fiables plus coûteux pour lesquels la probabilité d'indisponibilité est nulle. Ce problème est résolu à l'aide d'un algorithme de relaxation lagrangienne qui permet d'obtenir le nombre optimal des deux types de sites. Une extension au cas de capacités finies avec probabilités d'indisponibilité corrélées est proposée par Lim et al. (2013). Peng et al. (2011) ont résolu un modèle de programmation en nombres entiers qui se présente comme une extension du problème CFLP en utilisant un algorithme génétique.

Le problème de localisation des sites fiables intégrant l'aspect stockage (IRFLP) est également pris en compte dans la littérature en ajoutant les décisions de gestion de stock au problème RFLP. Jalali et al. (2016) ont étudié une chaîne d'approvisionnement à plusieurs échelons, composée d'un fournisseur unique, de clients et de CDs possédant des capacités finies et qui sont susceptibles de devenir indisponibles. Les auteurs ont proposé un modèle de programmation non linéaire avec minimisation des coûts associés: coût d'ouverture des CDs, de transport, de stockage et de pénalité des demandes non satisfaites. Un problème de conception de chaîne logistique consistant en la sélection des CDs et de leurs capacités de stockage pour plusieurs produits est considéré par Garcia-Herreros et al. (2014) afin de minimiser la somme des coûts d'investissement, des coûts de transport de l'usine aux CDs et des CDs aux clients, des coûts d'inventaire et des pénalités dues aux demandes non satisfaites en raison des indisponibilités des sites. Chen et al. (2011) ont proposé un modèle non-linéaire en nombres entiers mixtes du problème (RFLP) avec une hypothèse stipulant que tous les sites peuvent devenir indisponibles indépendamment, avec la même probabilité et que les clients affectés à l'origine à un site indisponible seront réaffectés à un autre site opérationnel ou subiront une pénalité en raison du service perdu. Les auteurs ont supposé que chaque client peut bénéficier de son service à partir de R sites et que le client est affecté à son site de niveau 1 quand les indisponibilités n'existent pas. Les auteurs utilisent un algorithme de relaxation lagrangienne pour résoudre le problème.

III.2.2 Les problèmes de localisation dynamiques

Les problèmes de localisation des sites les plus basiques sont statiques, déterministes et à période unique. Cependant, les données (par exemple, la population, les tendances du marché, les coûts de distribution, les modèles de demande, les facteurs environnementaux, etc.) changent au fil du temps, obligeant les concepteurs de la chaîne logistique à réviser, réadapter et déplacer les sites. Dans ce contexte, l'émergence des modèles dynamiques est nécessaire pour une modélisation efficace de ces problèmes (Arabani et Farahani, 2012). Ces modèles considèrent t périodes de temps en déterminant les localisations optimales dans chaque période. Par conséquent, la relocalisation des sites apparaît dans de nombreux domaines d'application (construction d'hôpitaux, d'écoles, de barrages, de magasins, de restaurants, etc.) lorsqu'on suppose que de nouveaux sites seront ouverts ou que des sites localisés seront fermés dans l'avenir.

Thanh et al. (2008) mentionnent les situations nécessitant une planification sur plusieurs périodes en (SCM) et utilisant par conséquent des modèles de localisation des sites dynamiques:

- Une entreprise qui étend son domaine d'activité doit localiser de nouveaux sites.
- Une entreprise qui déplace son activité d'une région à une autre doit fermer et localiser de nouveaux sites.
- Lorsque la demande diminue, il est important de restructurer la chaîne d'approvisionnement et de fermer les sites qui ne sont plus en activité.
- Dans le cas de site obsolète, est-il plus rentable de le rénover ou de le fermer et le remplacer par un nouveau site?

La version dynamique du FLP a été formulée par (Wesolowsky, 1973) en se basant sur le modèle de (Weber, 1957). Le modèle proposé vise à minimiser le coût total d'expédition et les coûts de déplacement d'un emplacement à un autre et permet des changements de localisation à travers un horizon de planification. L'auteur considère un coût de déplacement indépendant de la distance et propose une méthode de résolution du problème consistant à décomposer le problème étudié en plusieurs problèmes statiques. (Wesolowsky et Truscott, 1975) ont reformulé le problème en considérant un DFLP dans lequel le nombre de sites localisés change durant chaque période en permettant l'ouverture de nouveaux sites et la fermeture de sites ouverts afin de desservir N points de demande. Les auteurs ont proposé une approche basée sur la programmation en nombres entiers mixtes et ont résolu le problème pour cinq périodes. Une deuxième méthode basée sur la programmation dynamique est aussi proposée afin de résoudre le problème pour un nombre de périodes plus important. (Erlenkotter, 1981) a comparé les performances de sept heuristiques proposées dans la littérature résolvant le DFLP avec la minimisation des coûts totaux d'investissement, de production et de transport afin de satisfaire toutes les demandes à travers un horizon de planification.

Le problème de localisation dynamique des sites avec capacité infinie (DUFLP) a été introduit par (Roodman et Schwarz, 1975) en diminuant la demande à travers l'horizon de planification. Le problème consiste à fermer certains sites et de réaffecter par conséquent les clients aux sites opérationnels restants sur l'horizon de planification afin de minimiser les coûts totaux considérés, relatifs aux ouvertures et fermetures des sites et au transport. Les auteurs ont supposé qu'un site fermé ne sera plus réouvert sur l'horizon de planification et ont proposé un algorithme de séparation et évaluation pour résoudre le problème étudié. On trouve dans la littérature de nombreux autres articles sur le DULFP, comme celui de (Ballou, 1968) qui considère un réseau de distribution composé de marchés, d'usines et d'entrepôts avec une planification sur cinq ans, l'objectif est de trouver le meilleur emplacement de l'entrepôt chaque année afin de maximiser le profit. Current et al. (1998) qui étudient un problème p-médian visant à

trouver le meilleur emplacement de chaque site dans l'horizon de planification sans possibilité de relocalisation. Dans cette étude, les auteurs ont considéré qu'un site est initialement ouvert et que les sites sont ouverts un par un à travers l'horizon de planification pour répondre à la variation de la demande. Ce problème est résolu en utilisant un progiciel LP / IP. (Drezner, 1995) qui considère aussi un problème p-médian où le nombre de sites à localiser n'est pas fixé à priori avec l'hypothèse qui stipulent que les sites ouverts lors de la première période ne seront pas fermés dans le futur. (Kelly et Maruchek, 1984) propose dans leur étude de minimiser les coûts d'approvisionnement, d'ouverture, de fermeture et de maintenance afin de satisfaire les variations de la demande à travers les périodes. De plus, Canel et al. (2001) ont considéré un problème dynamique de localisation des sites internationaux à capacités infinies et supposent que si un site est ouvert au cours d'une période, il le restera pendant les périodes suivantes. (Bashiri et Badri, 2010) ont considéré des entrepôts publics (loués par l'entreprise) et privés (propriétés de l'entreprise) dans une chaîne d'approvisionnement à plusieurs échelons, composée de fournisseurs, d'usines, d'entrepôts et de clients. (da Gama et Captivo, 1998) ont supposé qu'un site supprimé ne pourra pas être établi à l'avenir, (Van Roy et Erlenkotter, 1982) ont abordé un DUFLP résolu en utilisant une procédure de séparation et évaluation incorporant une méthode de double ascension étendant les approches utilisées pour le UFLP statique. Le modèle considéré offre la possibilité d'ouvrir de nouveaux sites à chaque période et de fermer uniquement les sites ouverts initialement (première période), cette limitation qui interdit la fermeture des sites ouverts pendant l'horizon de planification est supprimée par Chardaire et al. (1996), qui supposent que les demandes varient entre les périodes et résolvent le problème en utilisant une approche basée sur le recuit simulé. Farahani et al. (2015) ont permis une et une seule relocalisation sur un horizon continu. Farahani et al. (2009) ont proposé un algorithme générique pour définir les temps et les emplacements de relocalisation optimaux pour trois types de distance. Contreras et al. (2011) ont proposé une approche de séparation et évaluation basée sur une relaxation lagrangienne pour un problème de localisation de hub multi-périodes à capacité infinie en tenant compte des coûts fixes d'ouverture, d'exploitation et de fermeture des hubs dans chaque période avec une quantité variable de produits transportés. Les performances de l'approche proposée sont testées sur les instances de l'*Australian Post* (AP). (Min et Melachrinoudis, 1999) et Srivastava et al. (2016) ont étudié et résolu des études de cas réels sur des problèmes de relocalisation d'établissements. (Manzini et Gebennini, 2008) ont résolu un problème de localisation de CDs régionaux dynamiques et multi-scénarios pour les cas mono et multi-produits. Le modèle proposé pour le cas mono-produit est étendu par Gebennini et al. (2009) avec la prise en compte des demandes stochastiques et l'optimisation de la quantité de stockage dans les CDs régionaux.

Pour la version à capacité finie du problème, Dias et al. (2006) ont envisagé la possibilité d'ouvrir, de réouvrir et de fermer un site plus d'une fois à travers l'horizon de planification avec des coûts de fermeture pour la première fois. La possibilité d'expansion et de réduction de la capacité disponible des sites est

considérée par Dias et al. (2007) avec la localisation de plusieurs sites de différentes capacités dans le même emplacement. Melo et al. (2006) ont présenté un modèle de localisation / relocalisation avec des contraintes de capacité et de budget et la possibilité de transfert de capacité d'un site indisponible vers des sites opérationnels. Thanh et al. (2008) ont considéré des capacités minimales et maximales des sites pour un modèle de réseau de production-distribution multi-échelons et multi-produits dans lequel les sites ne peuvent pas changer de statut plus d'une fois pendant l'horizon de planification. De plus, Hinojosa et al. (2008) ont considéré un modèle multi-produits à deux échelons en supposant que le coût d'ouverture et de fermeture des sites est très élevé, les sites fermés ne peuvent pas être réouverts et les sites établis restent ouverts au cours des périodes suivantes. Dias et al. (2008) ont proposé des modèles supportant l'existence de plus d'un chemin entre les mêmes sites et ont résolu le problème en utilisant une heuristique primal-dual. (Torres-Soto et Uster, 2011) ont supposé que les sites ouverts lors de la première période sont maintenus opérationnels pendant l'horizon de planification sans tenir compte des coûts de fermeture des sites. Trois statuts d'entrepôts: ouvert, fermé et libre sont considérés par (Khumawala et Whybark, 1976) qui ont supposé que les entrepôts devraient être ouverts ou fermés au début de chaque période. Marufuzzaman et al. (2016) ont proposé trois algorithmes pour résoudre un modèle à capacité finie avec un algorithme de décomposition de Benders, et ont comparé les résultats obtenus à ceux de (Torres-Soto et Uster, 2011) pour une demande constante, décroissante et croissante. Jena et al. (2016) ont considéré une capacité ouverte qui est utilisable et une capacité fermée qui est temporairement indisponible pour un problème de localisation des sites multi-produits et multi-périodes.

Certains travaux ont abordé le problème de localisation des sites dynamiques (DFLPs) en considérant plusieurs objectifs, la limitation des capacités et les contraintes budgétaires sont prises en compte par (Melachrinoudis et Min, 2000) qui ont étendu le problème considéré dans (Min et Melachrinoudis, 1999) et ont proposé un MILP multi-périodes. Un DFLP multiobjectif pour la localisation des sites de décharge est considéré par Melachrinoudis et al. (1995) avec la minimisation de quatre objectifs et en supposant qu'un site peut être déplacé d'un endroit à un autre. (Qiu et Sharkey, 2013) ont déterminé l'emplacement physique d'un site et son plan d'inventaire pour une base maritime de logistique militaire. Dias et al. (2007) ont proposé un nouvel algorithme mimétique multiobjectif pour résoudre un DFLP, le modèle proposé définit les sites ouverts à chaque période ainsi que leur durée de vie.

III.2.3 Les problèmes de localisation mobiles

Selon (Guden et Sural, 2014), la «relocalisation» et le «déplacement» sont deux termes différents dans la littérature relative aux problèmes de localisation. Les problèmes de relocalisation des sites considèrent que le site existant peut être fermé avec un transfert de son équipement vers un autre emplacement existant ou un nouvel endroit. Cependant, les problèmes de localisation mobiles considèrent qu'un site mobile peut être entièrement déplacé de son emplacement vers un nouvel emplacement. Notons que l'ouverture et la

fermeture des sites peuvent se produire plusieurs fois dans l'horizon de planification. De plus, un site mobile peut changer son emplacement plusieurs fois dans l'horizon de planification.

Introduits initialement par Demaine et al. (2009), les problèmes de localisation des sites mobiles (MFLP) est une variante du UFLP. Ce problème peu étudié dans la littérature considère l'emplacement initial des sites et l'affectation des clients aux sites localisés comme entrée du problème. L'objectif consiste à relocaliser (déplacer) chaque site de son emplacement à un autre et à affecter chaque client à un site dans les nouveaux emplacements afin de minimiser les coûts de déplacement des sites et des clients. L'une des applications importantes du MFLP est la localisation des sites en cas de catastrophe mais il est clair que le problème se pose dans d'autres contextes logistiques. Notons que dans le MFLP, deux sites peuvent être déplacés de deux emplacements différents vers le même emplacement. Un nouveau modèle évitant cette contrainte est développé par Halper et al. (2015). Plusieurs chercheurs se sont intéressés au MFLP en proposant une recherche locale (Halper et al. (2015); Ahmadjan et al. (2013)) ou une approche de filtrage combinatoire Armon et al. (2014). Raghavan et al. (2019) ont traité un MFLP avec une contrainte de capacité, ce problème est résolu en utilisant deux heuristiques proposées. D'autre part, deux modèles ont été considérés par (Landete, 2017), le premier suppose que les coûts de relocalisation et de réallocation sont proportionnels aux distances et le second concerne le cas des coûts généraux.

(Guden et Sural, 2014) se présentent comme les premiers auteurs à avoir considéré des sites mobiles et immobiliers dans le même modèle pour un projet de construction ferroviaire. Un modèle mathématique visant à déterminer le nombre et le type des sites à localiser afin de répondre à toutes les exigences concrètes des œuvres d'art est présenté. Ce modèle offre la possibilité de fermer et de réouvrir des sites immobiliers ainsi que d'abolir des sites mobiles afin de répondre aux variations de la demande dans l'horizon de planification considéré.

Un nouveau problème de localisation de P hubs est proposé par Bashiri et al. (2018) comme modèle multi-périodes de localisation de sites mobiles et immobiliers, les auteurs définissent les hubs mobiles et immobiliers lors de la première période et fixent le nombre de hubs ouverts. Les hubs mobiles sont déplacés d'un emplacement à un autre à chaque période selon une infrastructure de mobilité conçue (chemin entre sites) afin de répondre aux variations de la demande. Si l'infrastructure de mobilité n'existe pas, de nouveaux hubs sont localisés. Les résultats obtenus à l'aide d'une recherche locale et d'un algorithme génétique sont comparés à ceux obtenus à partir d'un modèle classique ne considérant que les sites immobiliers montrent les performances du modèle proposé pour un grand nombre de périodes.

À notre connaissance, très peu d'études considèrent les problèmes de localisation des sites mobiles. Les chercheurs tiennent compte des coûts de déplacement des sites et des clients. Dans notre cas, nous utilisons la mobilité des sites comme approche stratégique afin de diminuer les coûts supplémentaires engendrés par l'ouverture et la fermeture des sites dans un environnement dynamique.

Tableau III.1. Résumé des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation fiables, dynamiques et mobiles

Auteurs	Multi produits	Multi périodes	Capacité	Stockage	Fiabilités (perturbati ons)	Sites immobiliés	Sites mobiles
Jena et al.	*	*	*			*	
Gebennini et al.		*		*		*	
Torres-Soto et Uster		*	*			*	
Contreras et al.	*	*				*	
Manzini et Gebennini	*	*		*		*	
Farahani et al.		*				*	
Marufuzzaman et al.		*	*			*	
Farahani et al.		*				*	
Wesolowsky et Truscott		*				*	
Arabani et Farahani		*				*	
Snyder et Daskin		*			*	*	
Li et al.		*			*	*	
Canel et al.		*				*	
Melo et al.	*	*	*		*	*	
Snyder et al.		*			*	*	
Shen et al.		*			*	*	
Peng et al.			*		*	*	
Saldanha Da Gama et Captivo		*				*	
Hinojosa et al.	*	*	*	*		*	
Thanh et al.	*	*	*	*		*	
Dias et al.		*	*			*	
Khumawala et Whybark		*				*	
Ballou		*				*	
Mono-objectif Kelly et Marucheck		*				*	
Chardaire et al.		*				*	
Van Roy et Erlenkotter		*	*			*	
Dias et al.		*	*			*	
Dias et al.		*	*			*	
Jalali et al.		*	*	*	*	*	
Erlenkotter		*				*	
Roodman et Schwarz		*				*	
Bashiri et Badri		*	*	*		*	
Wesolowsky	*	*				*	
Srivastava et al.ç		*		*		*	
Min et Melachrinoudis		*				*	
Garcia-Herreros et al.		*	*	*	*	*	
Chen et al.	*			*	*	*	
Current et al.		*				*	
Drezner		*				*	
Klibi et Martel		*	*		*	*	
Lim et al.		*	*		*	*	
Lim et al.		*			*	*	
Li et Ouyang		*			*	*	
Demaine et al.							*
Halper et al.							*
Raghavan et al.							*
Landete							*
Ahmadjan et al.							*
Armon et al.						*	*
Güden et H. Süral		*				*	*
Bashiri et al.		*				*	*

Multiobjectif	Qiu et Sharkey	*	*	*	*	
	Melachrinoudis et Min	*	*	*	*	
	Dias et al.	*	*	*	*	
	Melachrinoudis et al.	*	*	*	*	
	Min	*	*	*	*	
Notre modèle	*	*	*	*	*	*

Les travaux présentés relatifs aux problèmes de localisation des sites fiables, dynamiques et mobiles sont résumés dans le **tableau III.1**. Nous montrons également le positionnement de notre modèle proposé dans le **chapitre V** par rapport aux références citées.

III.2.4 Les problèmes de localisation durable

Dans la plupart des modèles relatifs aux problèmes de localisation des sites, les chercheurs considèrent comme fonction objectif en général une fonction de minimisation des coûts qui combine les coûts fixes et ceux de distribution. Cependant, d'autres critères sont également pris en compte dans les FLPs: minimiser le temps moyen / la distance parcourue, maximiser le service / la réactivité, minimiser le nombre de sites localisés. Récemment, les objectifs environnementaux et sociaux qui prennent en compte le coût de l'énergie, la congestion, le bruit, la qualité de vie, la pollution, le recours aux combustibles fossiles et le tourisme sont devenus d'une importance majeure pour les FLPs. La question est de savoir comment mesurer ces critères afin de faire face à ces problèmes de nature environnementale et sociétale ? (Farahani et al., 2010). Il faut noter que les méthodes d'optimisation incluant l'émission de carbone ont progressivement augmenté lors des dernières années (Buyuksaatci et Esnaf, 2014).

(Trépanier et Coelho, 2017) ont cité les 27 facteurs influençant les émissions de gaz à effet de serre (GES) classés en quatre catégories: véhicule, trajectoire, circulation et caractéristiques environnementales. Les plus intéressants sont la catégorie et le poids du véhicule, le poids de chargement, la distance à parcourir, la vitesse moyenne, l'encombrement et l'élévation. Selon Dekker et al. (2012), les opérations de transport génèrent environ 15% des émissions mondiales totales de CO₂. Il est clair que l'impact environnemental du transport est lié à la consommation de carburant, à la vitesse et à l'accélération du véhicule, à la charge du moteur sur la distance parcourue, au type de carburant utilisé et à la taille du moteur, etc. Xifeng et al. (2013) ont affirmé que sur la base d'études de cas, quand le prix du pétrole brut augmente, les émissions de carbone diminueront et le nombre de CDs ouverts augmentera.

Les émissions issues des entreprises proviennent de sources directes et indirectes et des différents niveaux de leur chaîne logistique. Cependant, les décisions relatives à la localisation des sites sont également influencées par les émissions CO₂ générées par les opérations de production et d'entreposage. Des revues de la littérature sur le développement des FLPs durables ont été réalisées par Terouhid et al. (2012) et

Eskandarpour et al. (2015) qui ont affirmé que de nombreux efforts restent à fournir afin d'intégrer les trois aspects de la durabilité (économique, social et environnemental) dans les modèles de localisation des sites. Une revue de la littérature présentant des articles publiés entre les années 1990 et 2011 sur la durabilité et les FLPs est présentée par Chen et al. (2014). La revue conclut que peu d'études traitent explicitement la durabilité lors de la prise de décisions sur la localisation des sites et proposent une plateforme qui peut être utilisée par les entreprises industrielles comme synthèse des différentes perspectives sur la durabilité et la localisation des sites de fabrication. Banasik et al. (2018) ont examiné l'utilisation des approches (MCDM) pour la conception des chaînes logistiques vertes (GrSCM) pour quantifier les compromis entre les critères économiques, sociaux et environnementaux sur la base de 188 publications et ont conclu que peu de modèles environnementaux considèrent le stockage et la majorité se concentre sur la production et la distribution. Les auteurs signalent aussi le besoin de plus de modèles multicritères avec des paramètres incertains.

Marti et al. (2015) ont proposé un modèle pour la conception d'un réseau de distribution qui prend en compte l'incertitude de la demande et vise à montrer l'effet de différentes politiques carbone: plafonnement des empreintes carbone de la chaîne logistique, plafonnement des empreintes carbone du marché et taxes carbone sur les coûts logistiques et la structure du réseau. Zhiyong et al. (2014) ont présenté un modèle d'empreinte carbone prenant en compte les opérations de transport et de stockage. Le modèle considère l'empreinte carbone comme objectif et la quantité commandée comme variable de décision. Un UFLP avec la minimisation de la quantité des émissions CO₂ entre les points de demande et les sites est résolu par (Buyuksaatci et Esnaf, 2014) pour le réseau de distribution d'une entreprise en Turquie et cela en utilisant une méthode de centre de gravité basée sur les émissions.

Xifeng et al. (2013) ont considéré la quantité de marchandises transportées et la distance parcourue comme facteurs influençant les niveaux des émissions pour un UFLP étendu. (Elhedhli et Merrick, 2012) ont étudié un problème de conception de réseau de distribution vert en utilisant une fonction concave pour modéliser la relation entre les émissions CO₂ et le poids du véhicule, le problème est résolu en utilisant une heuristique Lagrangienne. Les auteurs ont utilisé Matlab et le solveur Cplex afin d'implémenter l'approche proposée sur la base d'exemples tirés de la littérature et montrent que l'ajout des coûts relatifs aux émissions CO₂ dans la fonction objectif pourra changer la configuration optimale de la chaîne d'approvisionnement. Un nouveau modèle basé sur le problème p-médian est proposé par Velazquez Martinez et al. (2014) qui cherche à déterminer un site durable en considérant les émissions de carbone dues au nombre de déplacements et à la consommation de carburant calculés en fonction des unités transportées. Ce modèle est appliqué sur une entreprise de biens de consommation d'emballages opérant à Mexico afin de localiser 10 CDs à partir de 18 emplacements candidats.

Des modèles de réseaux de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (CLSC) durables avec un niveau d'impact environnemental et une minimisation des coûts logistiques sont étudiés en utilisant une approche ε -constraint (Talaie et al., 2016), une Relaxation Lagrangienne (Zhen et al., 2019) et une heuristique basée sur les essaims de particules (PSO) (Kang et al., 2017). Paksoy et al. (2010) ont étudié un réseau CLSC essayant d'encourager les clients à utiliser des matériaux recyclables pour éviter plus d'émissions CO₂.

Plusieurs travaux ont étudié les problèmes de localisation multiobjectif en étudiant le compromis entre les coûts logistiques et la quantité des émissions CO₂ liées aux opérations de transport et / ou de fabrication / dépôts (Harris et al. (2009); Li et al. (2008); Manupati et al. (2019); Chaabane et al. (2011)). Le problème est résolu en utilisant une approche basée sur l'algorithme NSGA-II (Harris et al. (2009); Manupati et al. (2019)). L'impact de la variation du prix du pétrole brut sur les décisions de localisation des sites est illustré par Li et al. (2008) qui concluent que lorsque le prix du pétrole brut augmente, les bénéfices diminuent et plus de CDs doivent être ouverts afin de ralentir la baisse des bénéfices. Chaabane et al. (2011) résout le problème pour une entreprise canadienne opérant dans l'industrie métallurgique afin de faire face à une nouvelle législation plafonnant les émissions de carbone. Pasandideh et al. (2015) ont proposé un algorithme génétique multiobjectif (NSGA-II) pour résoudre un problème multiobjectif, multi-produits et multi-périodes de conception de chaîne logistique visant à minimiser simultanément la moyenne et la variance du coût total du réseau. Les résultats obtenus sont validés à l'aide d'un algorithme génétique modifié appelé Non-dominated Ranking Genetic Algorithm(NRGA).

Les DFLPs sont également abordés dans la littérature avec la minimisation des coûts totaux et la quantité des émissions CO₂, (Zhen, 2017) a supposé que les demandes de différents produits changent d'une période à l'autre et a introduit une nouvelle variable qui représente le niveau de protection de l'environnement dans les sites. Le modèle proposé a été résolu en utilisant une approche de Relaxation Lagrangienne pour une société de logistique automobile en Chine qui fournit des services logistiques aux fabricants de pièces détachées. Les résultats obtenus démontrent que les émissions CO₂ et le coût total peuvent être réduits en améliorant la capacité des CDs et la stratégie de stockage. Peng et al. (2016) ont considéré une pénalité relative aux demandes non satisfaites et ont supposé que les émissions de carbone dues au transport sont proportionnelles au poids de la charge et à la distance parcourue, tandis que celles provenant des entrepôts sont proportionnelles aux niveaux de stockage. Le modèle développé est testé sur un exemple de fabrication d'appareils électroménagers en Chine et résolu à l'aide des méthodes de la somme pondérée et ε -constraint. Hammami et al. (2015) ont intégré les émissions de carbone avec des contraintes de délais. Le modèle vise à minimiser les coûts et la quantité des émissions CO₂ dues aux opérations de fabrication, de transport et de stockage pour deux types de réglementations environnementales: la taxe sur les émissions de carbone et le plafond des émissions de carbone. Les auteurs ont expliqué comment les contraintes de délais, la politique de gestion de stock et le contexte

multi-échelons affectent la quantité des émissions CO2 et ont étudié l'effet des plafonds des émissions individuelles sur chaque site par rapport à un plafond global sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Afshari et al. (2014) ont tenu compte des contraintes environnementales liées à l'élimination des déchets pour la refonte d'un réseau de distribution des pièces automobiles avec des capacités d'entrepôts flexibles. Le modèle proposé est validé par une étude de cas réel visant à repenser un réseau de distribution de pièces automobiles et résolu à l'aide du solveur Lingo montrant les bénéfices réalisés par l'entreprise en appliquant le modèle vert proposé.

Le **tableau III.2** résume les travaux de recherche présentés et liés aux problèmes de localisation des sites durables. Nous montrons également le positionnement de notre modèle proposé dans le **chapitre V** par rapport aux références rapportées.

Tableau III.2. Résumé des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation durables

	Auteurs	Émissions dues aux sites	Émissions dues au transport	Fonction coût	Multi-périodes	
Mono-objectif	Buyuksaatci et Esnaf	*	*			
	Zhiyong et al.		*			
	Peng et al.	*	*	*	*	
	Velazquez Martinez et al.		*	*		
	Li et al.	*	*	*		
	Harris et al.	*	*	*		
	Manupati et al.	*		*		
	Zhen	*	*	*		
	Afshari et al.	*	*	*	*	
	Xifeng et al.			*	*	
Multiobjectif	Talaei et al.		*	*		
	Kan et al.		*	*		
	Elhedhli et Merrick		*	*		
	Zhen et al.	*	*	*		
	Chaabane et al.	*	*	*		
	Marti et al.	*	*	*		
	Hammami et al.	*	*	*		
	Paksoy et al.		*	*		
	Notre modèle		*	*	*	*

III.3 Synthèse et problématique de recherche

Les problèmes de localisation des sites ont reçu beaucoup d'attention par les chercheurs et les praticiens lors des dernières années, ceci est dû en grande partie au nombre d'applications importantes de la recherche opérationnelle nécessitant l'utilisation de ces modèles dans plusieurs domaines comme les

réseaux de télécom, les réseaux informatiques, les réseaux de distribution etc. Ces modèles visent à localiser des points de vente, des centres commerciaux, des entrepôts, des usines, des hôpitaux et d'autres types de site.

L'objectif de cette thèse est à contribuer dans la résolution des problèmes de localisation avec gestion des indisponibilités des sites. Des approches basées sur les algorithmes génétiques sont proposées et testées pour les deux problèmes traités dans le cadre de cette thèse pour des cas mono et multi-objectifs:

1. Le premier problème consiste à considérer des indisponibilités des sites temporaires où un CD peut devenir indisponible pour une certaine durée contrairement à ce qui est considéré dans la littérature où l'indisponibilité d'un site est définitive. Ce problème est résolu en utilisant deux approches (non-intégrée et intégrée) basées sur un algorithme génétique. Les approches proposées permettent une réallocation (réaffectation) des clients impactés par les indisponibilités en minimisant les coûts de gestion des indisponibilités des CDs dans le réseau de distribution considéré. Les détails des approches proposées et les résultats obtenus sont présentés dans le **chapitre IV**.
2. Dans le deuxième problème, les indisponibilités des sites sont traitées en utilisant des sites mobiles dans un environnement dynamique avec prise en compte des contraintes environnementales. La revue de la littérature présentée dans cet axe de recherche montre un manque d'utilisation de modèles de localisation des sites mobiles dynamiques avec considération des contraintes environnementales. Les travaux cités dans ce chapitre présentent des modèles basés sur le problème P-médian fixant le nombre de sites à ouvrir durant chaque période à priori. De plus, les travaux qui étudient les problèmes de localisation des sites dynamiques (DFLPs) considèrent la relocalisation des sites pour répondre aux variations de la demande et non pas pour la gestion des indisponibilités des sites. Les documents relatifs aux problèmes de localisation avec gestion des indisponibilités des sites (RFLPs) supposent que si un site est indisponible il ne sera plus rouvert dans l'horizon de planification. De plus, la majorité des travaux liés à l'empreinte carbone prennent en compte les émissions générées par les opérations de transport et d'exploitation des sites et ne tiennent pas compte des émissions générées par le déplacement des sites. Notons aussi que les émissions dues au déplacement des sites sont considérées pour la première fois dans le cadre de cette thèse. Nous présentons donc un modèle non linéaire en variables binaires permettant la gestion des indisponibilités des CDs ainsi que la réallocation des clients affectés par les indisponibilités. Ce modèle vise à trouver le meilleur compromis entre les coûts de localisation, de transport, d'ouverture, de fermeture et de déplacement des sites ainsi que les émissions de CO₂ générées par les opérations de transport,

les CDs et le déplacement des sites. Ce problème est résolu en utilisant un algorithme NSGA-II, les résultats obtenus sont présentés, validés et détaillés dans le **chapitre V**.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue globale et générale sur les problèmes de localisation des sites. Nombreux sont les chercheurs qui ont abordé ce domaine, la littérature est donc très riche en travaux consacrés au FLP. Par ailleurs, nous avons montré l'apport apporté par notre problématique au domaine de localisation des sites par rapport aux travaux de recherches existants et aux thématiques abordées dans la littérature.

Des travaux considérant des modèles de localisation permettant de représenter aux mieux les problèmes réels comme la possibilité d'avoir des sites indisponibles, l'ouverture et la fermeture des sites plusieurs fois dans un horizon de planification ou encore l'utilisation des sites mobiles ont été présentés tout en mettant l'accent sur les contributions proposées. Ces modèles ne cessent pas d'être développés et améliorés afin d'intégrer des aspects environnementaux et sociétaux.

Chapitre IV.

Gestion des indisponibilités des sites lors de la conception des chaînes logistiques

Une chaîne logistique est un ensemble de sites reliés entre eux dans le but de fournir des produits aux clients. La chaîne logistique est sujette à des défaillances aléatoires causées par différents facteurs ce qui engendre l'indisponibilité de certains sites. Dans ce sens, la gestion de ces indisponibilités s'impose comme un choix stratégique afin de garantir les seuils requis de fiabilité et de disponibilité des différents sites de la chaîne logistique.

Nous traitons dans ce chapitre un problème de conception de chaînes logistiques avec la prise en compte de l'indisponibilité d'un ou de plusieurs sites. Nous considérons un réseau de distribution stochastique avec une prise en compte intégrée des décisions de localisation des centres de distribution (CDs), d'affectation des clients et de gestion des indisponibilités des CDs. Deux approches de simulation sont réalisées. Dans la première approche, étude est réalisée en deux étapes et consiste à trouver d'abord la meilleure structure de la chaîne, ensuite, de simuler le comportement de la chaîne logistique face à la présence d'éventuelles défaillances de CDs. La deuxième approche consiste à considérer le problème de conception de la chaîne logistique et de gestion des défaillances de CDs dans un même modèle. Les résultats des deux approches sont détaillés et comparés en remplaçant chaque CD indisponible par un autre CD opérationnel en effectuant une réallocation basée sur un AG pour les deux approches proposées.

IV.1 Introduction

Dans la plupart des problèmes de conception des réseaux de distribution, les différents risques ou incertitudes pouvant affecter le réseau sont le plus souvent négligés. Ces risques peuvent entraîner l'indisponibilité d'un site (centre de distribution, fournisseurs, etc.) et peuvent être la conséquence d'un événement externe tel qu'une catastrophe naturelle (Tsunami), une épidémie, une guerre (invasion militaire), ou un problème interne (grève du personnel, incendie, etc.). L'indisponibilité d'un ou de plusieurs sites logistiques a des conséquences désastreuses sur l'ensemble du système et entraîne des pertes liées à la demande des clients et d'autres pertes telles que le manque des matières premières et des modes de transport moins avantageux. Pour cela, il est indispensable de tenir compte ces risques et incertitudes lors de la modélisation et la résolution des problèmes de conception afin d'approcher le plus possible de la réalité (Tanonkou, 2007).

Une fois la structure du réseau est fixée, suite à l'apparition d'un ou de plusieurs événements incertains, un ou plusieurs sites (centres de production, entrepôts, centres de distribution, etc.) peuvent devenir indisponibles pour une durée souvent aléatoire. L'indisponibilité d'un centre de distribution, d'un fournisseur ou d'autres éléments de la chaîne entraîne des pertes des demandes clients et par conséquent peut avoir un impact important sur la rentabilité et la profitabilité du réseau. Par conséquent, l'indisponibilité des sites obligera les décideurs à redéfinir une nouvelle structure du réseau logistique en utilisant des stratégies robustes permettant de remédier à ce problème de perte (clients, profits, crédibilité, etc.).

Ce chapitre aborde deux problèmes liés au domaine des chaînes logistiques, à savoir la conception des réseaux/chaînes logistiques et la gestion des indisponibilités des sites logistiques. Notre démarche consiste à trouver la meilleure structure du réseau logistique à travers la prise en compte des décisions de localisation des centres de distribution (CD) et d'affectation des clients aux CDs et de proposer des approches de gestion des indisponibilités des CDs permettant d'optimiser les coûts relatifs à cette opération.

IV.2 Problématique considérée

Nous étudions une chaîne logistique composée d'un fournisseur et d'un ensemble de clients, chaque client est identifié par sa zone de localisation (ville ou région) où chaque zone est une zone potentielle de localisation de CD. Chaque client effectue une demande aléatoire pour un seul type de produit qui est satisfaite par les CDs localisés. Chaque CD utilise la politique de la quantité économique (EOQ) pour la gestion de son stock et maintient un stock de sécurité pour garantir un certain service client. Nous nous limitons au cas où une seule connexion de transport relie chaque couple de clients sans prise en compte du délai de transport. La **figure IV.1** illustre la structure globale de la chaîne logistique considérée.

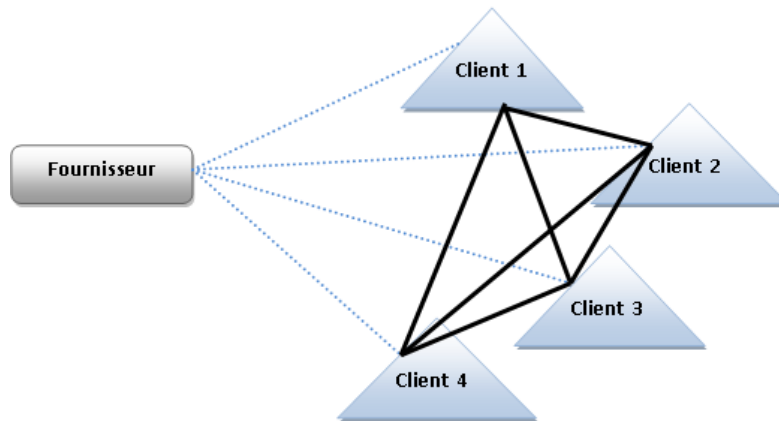


Figure IV.1. Structure de la chaîne logistique étudiée

Nous commençons dans un premier temps par résoudre ce problème proposé par Daskin et al. (2002) et qui se présente comme une extension du UFLP avec prise en compte des décisions de gestion des stocks. Nous proposons une approche de résolution de ce problème en ayant recours à plusieurs métaheuristiques, à savoir, le recuit simulé, la recherche tabou et les algorithmes génétiques. L'objectif est de déterminer la métaheuristique la plus performante pour la résolution des problématiques abordées. Les résultats obtenus sont validés grâce à une analyse de sensibilité effectuée afin d'étudier l'effet de certains paramètres clés sur la structure obtenue de la chaîne logistique étudiée. Plus précisément, nous considérons l'impact des coûts de transport, des coûts de stockage et des variances des demandes et des délais de livraison afin de valider les résultats obtenus.

Nous supposons par la suite que la chaîne logistique fait face à des défaillances de centres de distribution qui les rendent indisponibles. La nature de ces indisponibilités est d'origines diverses : catastrophes naturelles, indisponibilité du chemin de transport, grève du personnel, acte terroriste ou sabotage, etc. Toutefois, la chaîne logistique devrait être robuste et refondue chaque fois qu'une défaillance de CD se produit.

Deux approches de résolution de ce problème sont proposées :

- **Approche non-intégrée:** Cette approche est divisée en deux étapes distinctes E_1 et E_2 : Le but de la première étape consiste à trouver la meilleure structure de la chaîne logistique en supposant que tous les CDs sont opérationnels. Cependant, l'objectif de la deuxième étape est l'optimisation de la gestion de ces indisponibilités, car un ou plusieurs CDs peuvent devenir indisponibles :
 - o Étape E_1 : Dans un premier temps, la résolution du problème consiste pendant l'étape E_1 en la prise de deux décisions qui sont : localisation des CDs et l'affectation des clients aux CDs. Ces décisions sont obtenues en considérant l'existence d'une seule et unique liaison de transport entre chaque couple CD/Client. Ce problème est résolu en utilisant un

algorithme génétique qui permet d'obtenir la meilleure structure de notre réseau de distribution.

- Étape **E2** : Partant de la structure de la chaîne logistique obtenue durant la première étape **E1**, nous simulons le comportement de cette chaîne pendant la seconde étape **E2**, et ceci face à la présence d'éventuelles défaillances d'un ou de plusieurs CDs. Nous supposons que les CDs ne peuvent pas être indisponibles simultanément. Le but de cette étape est d'optimiser la gestion des indisponibilités des CDs tout en minimisant le coût total généré.

L'approche de simulation utilisée dans l'étape **E2** consiste à simuler deux stratégies différentes :

1. Dans la première stratégie, chaque CD indisponible sera remplacé par le CD le plus proche pendant sa durée d'indisponibilité. Le CD le plus proche est le CD qui présente le coût de livraison minimal.
 2. La deuxième stratégie consiste à effectuer (à chaque indisponibilité d'un CD) une réallocation en utilisant une optimisation par un algorithme génétique (AG). La réallocation revient à exécuter l'AG en considérant uniquement les clients concernés par l'indisponibilité ainsi que les CDs opérationnels.
- **Approche intégrée**: La deuxième approche consiste à définir la meilleure structure de la chaîne étudiée et de simuler ses performances avec la présence des défaillances des CDs simultanément afin de minimiser le coût total généré. Notons qu'à chaque indisponibilité d'un CD, une réallocation en utilisant une optimisation par algorithme génétique (AG) est utilisée pour son remplacement. La réallocation revient à exécuter l'AG en considérant uniquement les clients concernés par l'indisponibilité ainsi que les CDs opérationnels.

La comparaison entre les deux approches nous permettra de mettre en évidence les gains engendrés avec la deuxième stratégie par rapport à la première.

IV.3 Formulation mathématique du problème

IV.3.1 Notations et variables utilisées

Pour la formulation mathématique du problème étudié, nous utilisons les variables et les notations suivantes :

I : Ensemble des zones de demandes (clients) indexés par i ;

CD_j : Centre de distribution localisé dans la zone de demande j ;

μ_i : Demande globale générée par le client i ;

D_j : Demande moyenne journalière du CD_j ;

σ_i^2 : Variance de la demande journalière générée par le client i ;

f_j : Coût fixe de localisation du CD_j ;

d_{ij} : Coût de livraison unitaire du CD_j vers le client i ;

h_j : Coût de stockage annuel (par unité de produit) dans le CD_j ;

F_j : Coût fixe de commande (inclus le coût fixe de transport) placée par le CD_j auprès du fournisseur ;

a_j : Coût unitaire d'approvisionnement (prix d'achat et de transport) du CD_j auprès du fournisseur ;

L_j : Délai moyen d'approvisionnement en jours du CD_j auprès du fournisseur ;

λ_j^2 : Variance du délai d'approvisionnement du CD_j auprès du fournisseur ;

α : Niveau de service dans les centres de distribution ;

Z_α : Coefficient de sécurité, tel que $P(Z \leq z_\alpha)$;

$C(E_1)$: Coût global généré pour l'étape E_1 pour l'approche non-intégrée;

$C(E_2)$: Coût global généré pour l'étape E_2 pour l'approche non-intégrée;

$CI(E_2)$: Coût global moyen généré pour l'approche intégrée.

$X_j = \{1 \text{ si le } CD_j \text{ est localisé; } 0 \text{ sinon}\}$

$Y_{ij} = \{1 \text{ si le client } i \text{ est servi par le } CD_j; 0 \text{ sinon}\}$

IV.3.2 Modélisation mathématique

En se basant sur la référence Daskin et al. (2002), nous présentons dans cette section la formulation mathématique de notre problématique. Durant la première étape, la résolution du problème nous permet de déterminer les variables de décisions X_j et Y_{ij} et par conséquent la structure de notre chaîne logistique. Ainsi, la formulation mathématique du problème étudié se présente comme suit :

$$(MF) \quad J^* = \min_{X,Y} J(X,Y)$$

Où

$$\begin{aligned}
 J(X, Y) = & \sum_{j \in I} f_j X_j + \sum_{j \in I} \sum_{i \in I} \mu_i d_{ij} Y_{ij} + \sum_{j \in I} \sum_{i \in I} \mu_i a_j Y_{ij} + \sum_{j \in J} \sqrt{2h_j F_j \sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij}} \\
 & + \sum_{j \in I} Z_\alpha h_j \sqrt{L_j \sum_{i \in I} \sigma_i^2 Y_{ij} + \lambda_j^2 D_j^2} \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Sous les contraintes suivantes:

$$\sum_{j \in I} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i, j \in I \quad (4.3)$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in I \quad (4.4)$$

La fonction objectif (4.1) représente la somme des coûts de localisation, coûts de livraison, coûts d’approvisionnement, coûts de stockage et de commande ainsi que les coûts de maintien des stocks de sécurité. Les contraintes (4.2) exigent que chaque client soit servi par un et un seul CD localisé. Les contraintes (4.3) assurent que les clients ne sont servis que par les CDs ouverts. La nature binaire des différentes variables de décision est exprimée par les contraintes (4.4).

IV.4 Résolution du problème

IV.4.1 Codage des solutions

La résolution de ce problème se fera en utilisant le même algorithme génétique pour les deux approches. Dans notre cas, une solution candidate est composée de valeurs binaires 0 ou 1, où chaque chromosome est constitué de deux parties. La première partie représente la localisation des CDs et la seconde partie l’allocation des clients aux CDs. Pour chaque solution candidate, nous calculons sa fitness pour obtenir le coût total généré en utilisant l’équation (4.1) (voir section IV.3.1).

Dans l’algorithme génétique développé, un chromosome représente la structure de la chaîne logistique. Il est composé de deux parties correspondant aux deux variables de décision X_j et Y_{ij} . Ainsi, une représentation en nombres entiers est utilisée où chaque gène peut avoir la valeur 0 ou 1. Un exemple de chromosome correspondant à un problème avec 6 clients (nous avons 6 CDs candidats situés dans les mêmes régions que les clients) est illustré par la **figure IV.2**.

X_j	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	Y_{5j}	Y_{6j}
100101	100000	000100	100000	000100	100000	000001

Figure IV.2. Exemple de chromosome

Les différentes étapes de l'algorithme génétique utilisé se présentent comme suit :

Algorithme IV.1 Algorithme génétique proposé

- **Étape 1.** Générer aléatoirement la population initiale P de taille N.
 - **Étape 2.** Évaluer toutes les solutions dans P.
 - **Étape 3.** Sélectionner les deux parents en utilisant la « sélection binaire par tournoi ». Elle consiste à tirer au hasard deux solutions de la population P puis sélectionner la solution avec la meilleure fitness.
 - **Étape 4.** Générer deux solutions enfants par un croisement un point des deux solutions parents avec une probabilité P_c .
 - **Étape 5.** Exécuter l'opérateur de mutation avec une probabilité P_m pour chaque solution enfant.
 - **Étape 6.** Exécuter une fonction de correction pour les solutions infaisables qui ne respectent pas les contraintes du modèle proposé*.
 - **Étape 7.** Ajouter les deux solutions enfants dans la population suivante G.
 - **Étape 8.** Répéter les étapes de 3 à 7 pour obtenir N solutions enfants dans G.
 - **Étape 9.** Répéter les étapes de 2 à 8 jusqu'à la satisfaction des conditions d'arrêt.
 - **Étape 10.** Retourner la meilleure solution trouvée
-

*Une solution est dite infaisable ou irréalisable si elle ne répond pas aux contraintes du problème. Par conséquent, une procédure de modification du chromosome est exécutée après mutation afin de vérifier les contraintes suivantes :

- Une solution candidate est correcte si au moins un CD est localisé.
- Chaque client est servi par un et un seul CD.
- Un CD sert un client que s'il est localisé.

IV.4.2 Approche non-intégrée

Dans cette approche, nous divisons notre étude en deux étapes, pour la résolution du problème (MF) durant la première étape E_1 , nous utilisons un algorithme génétique pour déterminer la structure de la chaîne étudiée. Pour la deuxième étape E_2 , un ou plusieurs CDs peuvent devenir indisponibles. Comme mentionnée auparavant, dans cette étape, nous simulons deux stratégies différentes. Pour la première

stratégie, chaque CD indisponible sera remplacé par le CD le plus proche. Le CD remplaçant satisfait les demandes des clients affectés au CD remplacé pendant son indisponibilité. Pour la deuxième stratégie et pour chaque indisponibilité d'un CD, une nouvelle allocation (ou réallocation) est effectuée pour les clients concernés par l'indisponibilité, ceci revient à exécuter le même AG de la première période mais en considérant que les CDs opérationnels et les clients affectés par l'indisponibilité. À travers la comparaison des deux stratégies, nous prouvons que la deuxième stratégie est plus avantageuse que la première en termes de coûts générés.

Durant l'étape E_2 et pour les deux stratégies proposées, le coût global généré $C(E_2)$ (coût total d'exploitation de la chaîne logistique) est égal à la somme des coûts de livraison, coûts d'approvisionnement, coûts de stockage et de maintien de stock de sécurité ainsi que les coûts des indisponibilités des CDs. Aucun coût de localisation (coût d'investissement) ne sera généré durant la deuxième étape, du moment où il n'y aura pas de nouvelles localisations de CD.

Le coût d'indisponibilité pour chaque CD_j et pour les deux stratégies est calculé comme suit :

$$C_{Indispo j} = \Phi_j(E_2)M_{Indispo j} \quad (4.5)$$

Où,

$C_{Indispo j}$: Coût total d'indisponibilité du CD_j ;

$\Phi_j(E_2)$: Nombre d'indisponibilités du CD_j pendant l'étape E_2 ;

$M_{Indispo j}$: Coût moyen d'une indisponibilité du CD_j .

Le coût de gestion des indisponibilités pour les deux stratégies à l'issue de l'étape E_2 est égal à :

$$CGI(E_2) = C(E_2) - C(E_1) \quad (4.6)$$

Où,

$C(E_1)$: Coût global généré durant l'étape E_1 ;

$C(E_2)$: Coût global généré durant l'étape E_2 ;

$CGI(E_2)$: Coût de gestion des indisponibilités durant l'étape E_2 ;

$CI(E_2)$: Coût global moyen généré pour l'approche intégrée.

IV.4.3 Approche intégrée

Dans cette approche, nous utilisons le même algorithme génétique avec la même représentation des chromosomes (voir **figure IV.2**) pour la résolution de notre problème, excepté qu'un ou plusieurs CDs peuvent devenir indisponibles lors de la définition de la structure de la chaîne logistique. Dans ce cas, une

réallocation est effectuée pour les clients concernés par l'indisponibilité comme pour l'approche non-intégrée. Ainsi, le coût total généré est calculé en utilisant les équations (1) et (5).

Afin de comparer l'efficacité des deux approches proposées, nous calculons le coût total généré après obtention de la structure de la chaîne en utilisant les mêmes scénarios que dans l'étape E_2 de l'approche non-intégrée. Ce coût $CI(E_2)$ est égal à la somme des coûts de livraison, coûts d'approvisionnement, coûts de stockage et de maintien de stock de sécurité ainsi que les coûts des indisponibilités des CDs.

IV.5 Résultats obtenus et analyse

Pour évaluer les performances des deux approches proposées, nous avons étudié des instances de différentes tailles. Ces instances sont obtenues en variant le nombre de clients qui représente en même temps le nombre de CDs candidats. Durant la seconde étape, pour chaque instance nous considérons 5 scénarios différents liés aux indisponibilités des CDs (nombres, instants et durées d'indisponibilités). Les expériences numériques sont effectuées en utilisant un PC Core 2 duo 1.6 GHZ de 2 GB de RAM. Notons que les programmes de simulation des deux approches ainsi que les métaheuristiques développées sont implémentés en langage "VBA". Les paramètres utilisés sont présentés comme suit :

- Nombre de clients ($\#RL$): Nous avons considéré des problèmes avec 10, 15, 20, 30, 40 et 60 clients. Notons que chaque zone contenant un client est une zone potentielle de localisation de CD.
- Demandes des clients: Pour chaque client, la moyenne de la demande μ_i est discrétisée à travers le temps t , tel que $\mu_i(t) \sim U[100, 1600]$.
- Délais de livraison: Pour chaque CD candidat, la moyenne du délai de livraison est générée aléatoirement tel que $L_j \sim U[10, 30]$.
- Variance des demandes et des délais de livraison: ils sont générés aléatoirement tel que $\sigma_i \sim U[50, 100]$ et $\lambda_j \sim U[5, 10]$.
- Coûts fixes de localisation (f_j), coûts de transport (a_{jk}) et coûts de livraison (d_{ij}): Ces paramètres sont générés suivant des lois uniformes, tel que $f_j \sim U[4500, 10000]$, $a_{jk} \sim U[2, 10]$ et $d_{ij} \sim U[1, 5]$.
- Niveau de service: $\alpha = 97.5\%$ pour $Z\alpha = 1.96$ pour tous les problèmes étudiés.
- Coût de stockage annuel par unité de produit (h_j): Valeur constante pour tous les CDs égale à 25.
- Coût fixe de commande (F_j): Valeur constante pour tous les CDs égale à 50.
- Coût moyen d'une indisponibilité ($M_{Indispoj}$): Ce coût est généré suivant une loi uniforme pour chaque CD, tel que $M_{Indispoj} \sim U[1000, 5000]$.
- Durée moyenne entre deux indisponibilités (DMEI) et durée moyenne d'une indisponibilité (DMI): elles sont générées suivant des lois uniformes pour chaque CD, tel que $DMEI \sim U[100, 250]$ et $DMI \sim U[15, 30]$.

- Périodes de simulation (E_1, E_2): nous avons considéré 1250 jours ouvrables (5 ans) pour chaque étape.

Après plusieurs tests, les différents paramètres de l’algorithme génétique utilisés dans la première étape et la deuxième stratégie de la seconde étape sont fixés comme suit :

- Taille de la population : $N = 40$;
- Probabilité de croisement : $P_c = 0.80$;
- Probabilité de mutation : $P_m = 0.10$;
- Nombre d’itérations : $NI = 50$.

IV.5.1 Résolution du problème

Le **tableau IV.1** illustre les résultats de la structure de la chaîne logistique (CDs localisés) et le coût total généré obtenu pour cinq simulations de cas différentes pour chaque instance du problème étudié. Le tableau résume les résultats obtenus par l’algorithme génétique proposé, ces résultats sont comparés à ceux obtenues après résolution du même problème par deux autres métaheuristiques à savoir, la recherche tabou et le recuit simulé.

Tableau IV.1. Résultats obtenus après résolution du problème

#RL	<i>Algorithme génétique</i>		<i>Recuit simulé</i>		<i>Recherche tabou</i>	
	#CD	Coût total	#CD	Coût total	#CD	Coût total
10	3	115.025	5	179.537	3	122.620
15	5	193.050	6	191.052	8	206.453
20	8	276.708	9	344.186	8	285.071
30	12	432.390	12	482.945	11	442.583
40	15	590.146	16	681.031	17	631.177
60	23	910.689	25	978.915	24	940.655

- #CD: Nombre de CDs localisés.
- Les coûts sont présentés en millions d'unité monétaire (um).

Le **tableau IV.1** montre que les coûts générés augmentent par rapport au nombre de CDs localisés. Il est également clair que les coûts obtenus par l'algorithme génétique sont meilleurs que ceux obtenus par les autres métaheuristiques montrant l'efficacité de l'algorithme génétique développé. Ainsi, nous pouvons conclure que les métaheuristiques avec population obtiennent de meilleurs résultats par rapport aux

métaheuristiques à base d'une solution pour la résolution de ce problème. De ce fait, l'AG proposé est utilisé pour résoudre le problème de conception du réseau de distribution étudié avec gestion des indisponibilités des CDs.

IV.5.2 Analyse de sensibilité

Nous étudions dans cette section la dépendance entre la meilleure structure de la chaîne logistique obtenue et les paramètres clés. Plus spécifiquement, nous considérons l'impact des coûts de transport, des coûts de stockage et des écarts types des demandes et des délais de livraison. Commençons par étudier l'impact des coûts de transport et des coûts de stockage. Pour cela, nous introduisons deux paramètres γ_T et γ_I et nous remplaçons les coûts de transport et de stockage par $\gamma_T d_{ij}$, $\gamma_T a_j$ et $\gamma_I h_j$ respectivement dans la fonction objectif:

γ_T : Facteur de pondération des coûts de transport

γ_I : Facteur de pondération des coûts de stockage

Nous varions γ_T et γ_I séparément pour cette analyse, afin d'étudier uniquement l'impact des coûts de stockage γ_T est fixé à 1 et γ_I varie entre 0,1 et 5. Aussi, pour étudier l'impact des coûts de transport, γ_I est fixé à 1 et γ_T varie de 0,1 à 2. Le **tableau IV.2** présente les résultats obtenus. La **figure IV.3** montre la relation entre le nombre de CDs ouverts et les coûts de transport, tandis que la **figure IV.4** montre la relation entre le nombre de CDs ouverts et les coûts de stockage.

Tableau IV.2. Impact des coûts de transport et des coûts de stockage

#RL = 10				#RL = 20				#RL = 40			
γ_T	γ_I	#CD	Coût total	γ_T	γ_I	#CD	Coût total	γ_T	γ_I	#CD	Coût total
1	0.1	4	11.003	1	0.1	6	22.088	1	0.1	13	35.149
1	0.3	6	12.308	1	0.3	8	25.460	1	0.3	13	39.250
1	5	6	14.245	1	5	11	26.803	1	5	15	47.460
0.1	1	1	2.856	0.1	1	2	6.023	0.1	1	1	9.474
0.3	1	2	6.575	0.3	1	5	8.730	0.3	1	7	19.606
0.7	1	4	8.988	0.7	1	6	14.970	0.7	1	12	28.718
1	1	5	11.792	1	1	7	23.657	1	1	13	44.526
1.5	1	5	17.938	1.5	1	10	29.795	1.5	1	16	49.926
2	1	6	24.722	2	1	10	39.813	2	1	16	73.130

Le **tableau IV.2** montre que l'impact des coûts de transport et les coûts de stockage sur le coût total du réseau de distribution. Néanmoins, les résultats obtenus montrent que le coût total du réseau de distribution obtenu est plus sensible aux coûts de transport qu'aux coûts de stockage. Ceci nous mène à constater que les coûts de transport jouent un rôle important dans la conception du réseau de distribution.

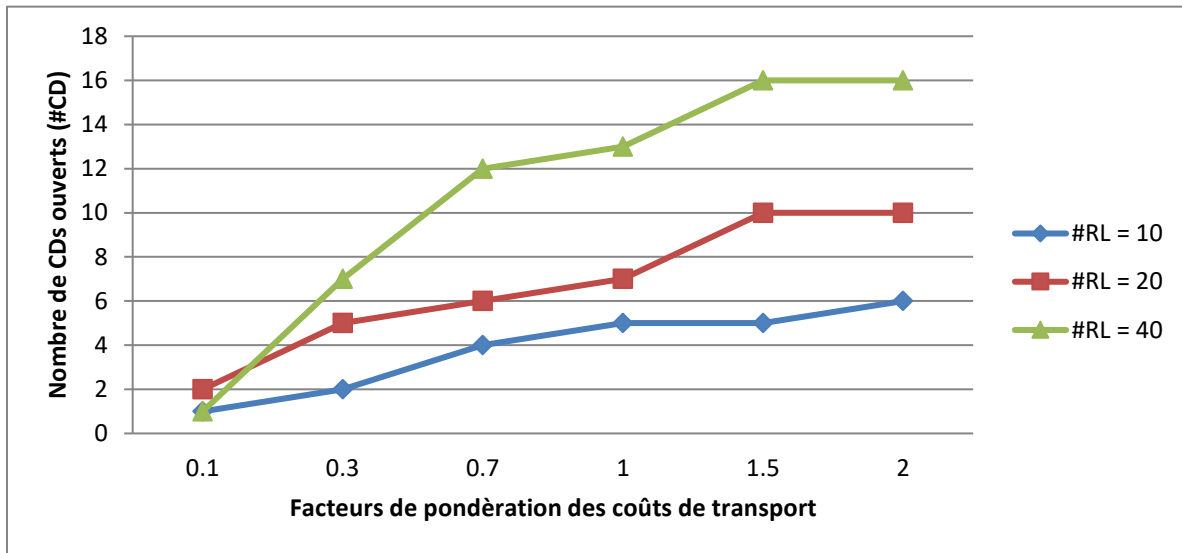


Figure IV.3. Nombre de CDs Vs les coûts de transport

La **figure IV.3** montre que lorsque les coûts du transport augmentent, le nombre de CDs ouverts augmente. Intuitivement, le résultat est assez naturel car, lorsque les coûts de transport augmentent, les CDs devraient être situés plus près des clients afin de réduire les coûts de transport des CDs aux clients. De plus, plus de CDs sont nécessaires lorsque le nombre de clients augmente. Ce résultat semble assez naturel car, lorsque le nombre de clients augmente, l'économie d'échelle justifie l'ouverture de nouveaux CDs.

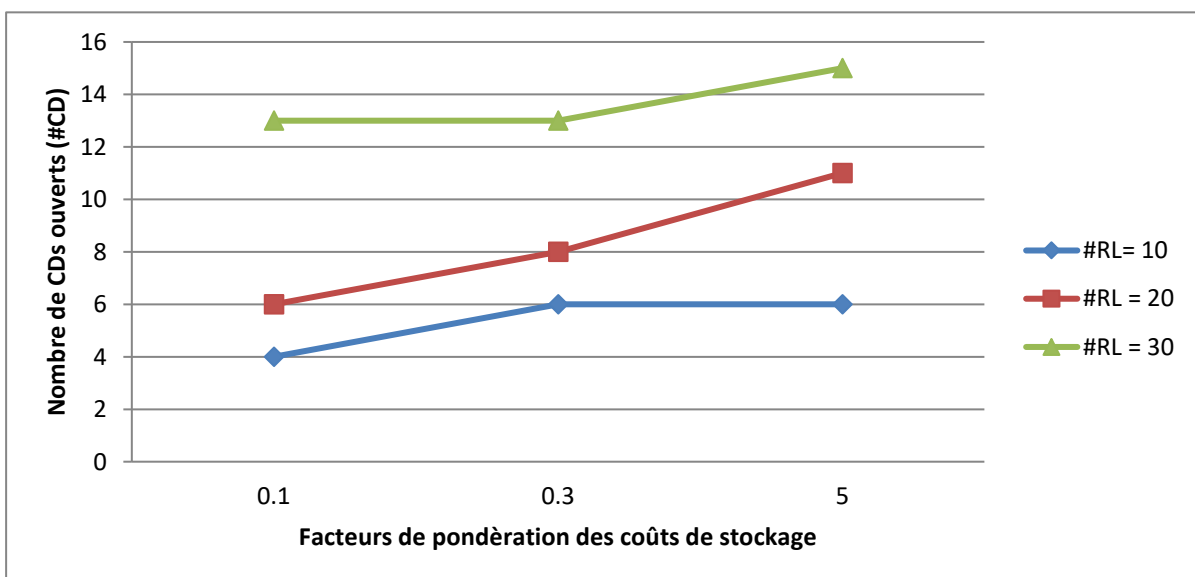


Figure IV.4. Nombre de CDs Vs les coûts de stockage

La **figure IV.4** montre que les coûts de stockage et le nombre de CDs ouverts sont proportionnels. À vrai dire, le nombre de CDs augmente lorsque le nombre de clients augmente.

Nous analysons dans cette partie les impacts des demandes et des délais de livraison générés aléatoirement suivant une loi uniforme sur la configuration optimale du réseau de distribution. Nous introduisons un facteur de pondération u et nous remplaçons les variances des demandes et des délais de livraison σ_i et γ_j respectivement par $u\sigma_i$ et $u\gamma_j$. La **figure IV.5** montre la variation du nombre de CDs ouverts lorsque u varie de 0,1 à 2. L'augmentation des variances des demandes clients et des délais de livraison des CDs augmente les stocks de sécurité ce qui oblige une gestion plus centralisée et réduit par conséquent le nombre de CDs ouverts. Ceci est conforme au concept du risk pooling dans la conception des chaînes logistiques qui consiste à réduire la variabilité de la demande si la demande est agrégée sur plusieurs sites. Cependant, la variabilité des demandes clients et des délais de livraison des CDs ont un impact significatif sur la configuration du réseau de distribution.

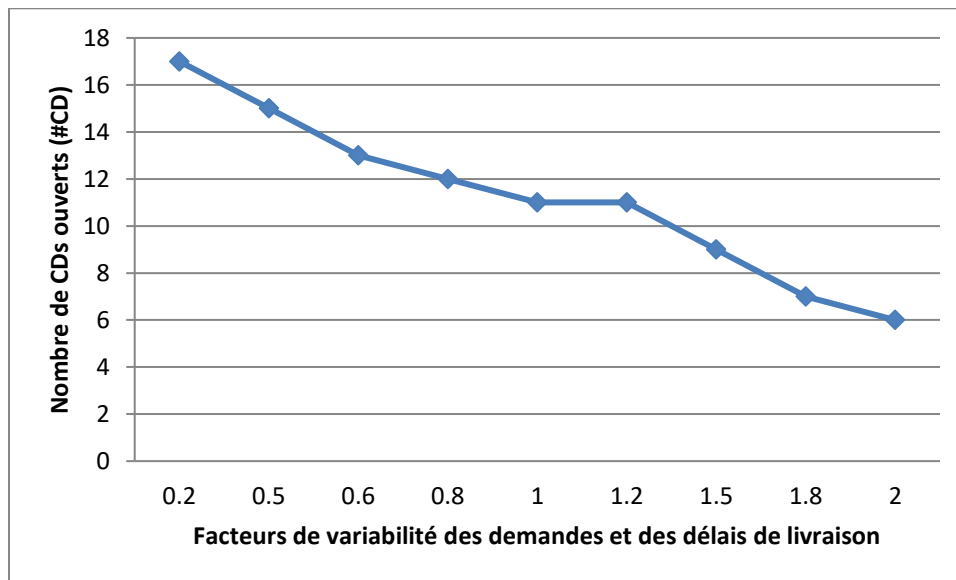


Figure IV.5. Nombre de CDs Vs la variabilité des demandes et des délais de livraison

IV.5.3 Approche non-intégrée

Les résultats obtenus pour chaque instance de notre problème sont mentionnés dans le **tableau IV.3**. Ces résultats représentent la structure de la chaîne logistique (CDs localisés) ainsi que le coût global engendré à l'issue de la première étape. Les résultats de la seconde étape concernent la comparaison de la moyenne des coûts de gestion des indisponibilités entre les deux stratégies proposées obtenus après la simulation de 5 scénarios différents.

- **#CD**: Nombre de CDs localisés.
- **C(E₁)** : coût global moyen généré durant la première étape **E₁** (voir section IV.4.2).
- **CGI(E₂)** : moyenne des coûts de gestion des indisponibilités générés durant l'étape **E₂** (voir section IV.4.2).
- **Gains** : gain en termes de coût de gestion des indisponibilités entre les deux stratégies.
- Les coûts sont exprimés en million d'unité monétaire (um).

Tableau IV.3. Comparaison des deux stratégies pour l'approche non-intégrée

Étape 1 (E1)			Étape 2 (E2)		
			Stratégie 1	Stratégie 2	Gains
#RL	#CD	C(E ₁)	CGI(E ₂)	CGI(E ₂)	
10	3	60.99	12.24	08.29	32.27 %
5	5	96.42	14.08	06.78	51.84 %
20	8	201.73	18.74	11.57	38.26 %
30	12	192.78	27.40	21.91	20.03 %
40	15	284.66	32.40	21.84	32.59 %
60	23	395.84	58.60	32.80	44.02 %

À partir du **tableau IV.3**, nous constatons pour la première étape que le coût global engendré est en constante augmentation par rapport au nombre de CDs localisés. Il est clair aussi que dans la seconde étape, les coûts de gestion des indisponibilités obtenus par la deuxième stratégie sont inférieurs par rapport à ceux obtenus avec la première stratégie, avec des pourcentages de gains allant de **20 %** à **51 %**.

Les résultats obtenus montrent que l'optimisation de la gestion des indisponibilités en utilisant les algorithmes génétiques est meilleure par rapport à celle de l'heuristique utilisée dans la première stratégie. De ce fait, **nous utilisons la deuxième stratégie basée sur une réallocation utilisant l'AG pour remplacer les CDs indisponibles afin de comparer les résultats du coût total généré par l'approche non-intégrée avec celui de l'approche intégrée.** Les résultats obtenus sont présentés dans la section suivante.

IV.5.4 Approche intégrée

Les résultats obtenus pour chaque instance de notre problème sont mentionnés dans le **tableau IV.4**. Ces résultats représentent la structure de la chaîne logistique (CDs localisés) ainsi que les coûts globaux engendrés $C(E_2)$ et $CI(E_2)$ pour les deux approches proposées obtenus après simulation de 5 scénarios différents.

Tableau IV.4. Les gains engendrés par l'approche intégrée comparée à l'approche non-intégrée

#RL	Approche non-intégrée		Approche intégrée		Gains
	#CD	$C(E_2)$	#CD	$CI(E_2)$	
10	4	404.091	4	139.706	65.42 %
15	8	520.072	6	199.937	61.55 %
20	9	599.527	9	400.359	33.22 %
30	16	921.615	12	601.733	25.63 %
40	18	1076.604	15	685.363	36.34 %
60	22	2124.778	21	1306.742	38.49 %

- $\#CD$: Nombre de CDs localisés.
- $C(E_2)$: Coût global moyen généré dans l'étape E_2 pour l'approche non-intégrée (voir section IV.4.2).
- $CI(E_2)$: Coût global moyen généré pour l'approche intégrée (voir section IV.4.2).
- **Gains** : Gain en termes de coût global généré entre les deux stratégies.
- Les coûts sont exprimés en million d'unité monétaire (um).

À partir du **tableau IV.4**, nous constatons que le coût global engendré est en constante augmentation par rapport au nombre de CDs localisés. Il est clair aussi que les coûts globaux moyens générés obtenus par l'approche intégrée sont inférieurs à ceux obtenus avec l'approche non-intégrée, avec des pourcentages de gains allant de **25%** à **65%**. Les résultats obtenus montrent clairement que l'optimisation de la gestion des indisponibilités en utilisant une approche intégrée présente de meilleurs résultats.

IV.6 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons étudié un problème de localisation-allocation avec la prise en compte des indisponibilités des CDs. Dans un premier temps, nous avons utilisé une approche d'optimisation non-intégrée basée sur les algorithmes génétiques où une première étape consiste à résoudre un problème de

conception d'un réseau stochastique de distribution où les décisions stratégiques de localisation des centres de distribution et d'allocation des clients sont intégrées dans un même modèle d'optimisation. Dans la deuxième étape, une simulation de la chaîne logistique considérée a été réalisée face à la présence d'éventuelles indisponibilités de CDs. L'objectif de cette étape est d'optimiser la gestion des indisponibilités des CDs tout en minimisant le coût total généré. Pour cela, deux stratégies de simulation ont été réalisées : l'une consiste à remplacer chaque CD indisponible par le CD le plus proche, et l'autre à effectuer une réallocation par algorithme génétique. La comparaison entre les deux stratégies a permis de montrer à travers les gains engendrés que la stratégie basée sur les algorithmes génétiques offre de meilleures performances en termes de gestion des indisponibilités des CDs.

La deuxième approche est une approche intégrée dans laquelle nous considérons le même problème de conception d'un réseau stochastique de distribution avec la gestion des indisponibilités des CDs, c'est-à-dire un ou plusieurs CDs peuvent devenir indisponibles lors de la détermination de la structure de la chaîne d'approvisionnement. Nous utilisons le même algorithme génétique pour la résolution de ce problème. Les coûts globaux générés en considérant les mêmes scénarios sont calculés et comparés pour les deux approches. Ainsi, la comparaison entre les deux approches à travers les gains engendrés a montré que l'approche intégrée est plus performante dans la gestion des indisponibilités CDs.

Ce travail nous a permis de dégager plusieurs directions de recherche futures. La plus immédiate est de considérer la gestion des indisponibilités des sites sur un horizon de planification composé de plusieurs périodes avec application du concept de relocalisation, ce concept autorise l'ouverture et la fermeture d'un CD plusieurs fois pendant l'horizon de planification où un CD indisponible à la fin d'une période sera fermé pendant la période suivante avec possibilité de réouverture lors des prochaines périodes. Nous pouvons aussi considérer la même étude dans un contexte multiobjectif où d'autres fonctions autre que les coûts peuvent être prise en considération entre autres la minimisation des émissions CO₂, la maximisation des demandes satisfaites ou encore la minimisation des pénalités dues aux demandes non satisfaites.

Chapitre V.

Modèle multiobjectif pour un problème de localisation de sites mobiles multi-périodes avec gestion des indisponibilités et des émissions CO₂

La localisation des sites fait partie des décisions les plus stratégiques pour la conception d'une chaîne logistique. Les décisions de localisation aident à faire face aux perturbations inattendues et garantissent le niveau de service souhaité par les décideurs. De nos jours, ces décisions devraient envisager le compromis entre la réduction des coûts et la protection de l'environnement dans le but d'améliorer la compétitivité durable des entreprises. Ce chapitre porte sur un problème de conception de réseau de chaîne d'approvisionnement durable sur plusieurs périodes avec un ensemble de nœuds de demande. Chacun d'eux présente une zone de localisation potentielle de centre de distribution (CD) pour satisfaire la demande variable des clients en minimisant les coûts logistiques et la quantité des émissions CO₂. Notre problème considère plusieurs périodes et décide de la relocalisation des CDs qui deviendront indisponible. Par conséquent, les CDs peuvent être ouverts, déplacés d'un emplacement à un autre, fermés ou r'ouverts d'une période à l'autre en utilisant des sites mobiles. Un modèle mathématique de programmation non-linéaire en variables mixtes a été développé pour générer le meilleur emplacement des CDs et leur allocation aux clients à chaque période. Notre modèle détermine le compromis entre les coûts économiques de localisation, de transport, de stockage et de relocalisation et la quantité des émissions CO₂ générée par les opérations de transport et les CDs localisés. Une approche multi-objectifs basée sur un l'algorithme génétique (NSGA-II) est proposée. Nos simulations montrent que dans un environnement dynamique, le modèle utilisant des sites mobiles est plus efficace qu'un modèle utilisant des sites immobiles. Les exemples numériques indiquent aussi que la considération des émissions CO₂ conduit à augmenter le nombre de CDs ouverts.

V.1 Introduction

De nombreux chercheurs considèrent une seule fonction objectif lorsqu'il s'agit de traiter les problèmes de localisation. Selon Farahani et al. (2010), le coût de transport est l'objectif le plus considéré devant le coût de localisation. Cependant, avec l'émergence du concept de durabilité, nous remarquons un intérêt croissant pour les problèmes de localisation des sites à objectifs multiples.

Les décisions de localisation sont d'une part de nature stratégique et mènent à prendre une série de décisions d'ouverture / fermeture et d'allocation à travers un horizon de planification. D'autre part, une chaîne logistique est également sujette à des risques naturels et humains et des incertitudes qui peuvent dégrader ses performances ou perturber son fonctionnement, ces risques peuvent entraîner l'indisponibilité d'un ou de plusieurs sites et entraîner des pertes financières importantes pour les entreprises.

Nous présentons dans ce chapitre une approche multiobjectif afin de minimiser une fonction de coût total et la quantité des émissions de CO2 émise par le transport des produits et les sites localisés dans le réseau de distribution considéré. Plus précisément, nous traitons un problème de localisation des sites avec un risque de perturbation causé par l'indisponibilité des CDs, ce qui mène à considérer un réseau de distribution multi-périodes dynamique avec relocalisation et déplacement des CDs, où chaque CD peut être ouvert, fermé, rouvert et déplacé d'un emplacement à un autre dans chaque période. Le modèle proposé prend en compte la fiabilité relative à la gestion des perturbations et la durabilité en minimisant la quantité des émissions de CO2 et considère toutes les décisions simultanément. Pour résoudre ce problème, un algorithme génétique multi-objectifs (NSGA-II) a été développé et testé.

V.2 Problématique considérée

V.2.1 Description du problème

Nous considérons une chaîne logistique à deux niveaux $G = (N, A)$ où N est l'ensemble des nœuds et A est l'ensemble des arcs, N est composé de l'ensemble des clients. Chaque nœud représente en même temps une zone potentielle de localisation de CD. Chaque client est affecté à un CD localisé afin de satisfaire sa demande.

Dans la problématique considérée nous effectuons l'étude sur plusieurs périodes où les demandes des clients changent d'une période à l'autre. Nous prenons en compte la dynamique des sites en supposant que notre chaîne d'approvisionnement peut être perturbée par des indisponibilités de CDs dues à divers événements comme la grève des travailleurs, les catastrophes naturelles ou humaines, etc. Par conséquent, nous divisons notre horizon de simulation sur plusieurs périodes afin de trouver les meilleures décisions de localisation et d'allocation dans chaque période en prenant en compte les perturbations des sites et la satisfaction des demandes clients dans chaque période. Pour cette raison, nous supposons que les CDs défectueux à la fin d'une période donnée peuvent être déplacés d'un emplacement à un autre au cours de la

période suivante en déplaçant entièrement le CD de son emplacement vers un nouveau (site mobile) ou par le transfert de ses équipements vers une nouvelle localisation avec l'association d'un coût de déplacement. Le déplacement des CDs dépend du nombre des nouveaux emplacements ouverts, si le nombre d'emplacements ouverts ne permet pas le déplacement de tous les CDs défaillants, certains d'entre eux sont fermés. Il est également supposé que l'ouverture et la fermeture des sites peut se produire plusieurs fois dans l'horizon de planification.

Initialement, tous les sites sont supposés fermés et un ensemble de CDs est ouvert au cours de la première période. De ce fait, deux ensembles de CDs sont considérés dans chaque période t à partir de la première période: ouvert et fermé, les CDs fermés peuvent être ouverts dans la période suivante et les CDs ouverts peuvent devenir indisponibles. Un scénario est généré à la fin de chaque période t afin de déterminer les CDs défaillants dans la période suivante $t + 1$. Une relocalisation est effectuée au cours de la période $t + 1$ afin de gérer les indisponibilités et de réaffecter les clients alloués aux CDs défaillants de la période t aux CDs ouverts au cours de la période $t + 1$. À cette fin, nous favorisons le déplacement des CDs de leurs emplacements vers d'autres emplacements. Lorsqu'un CD est indisponible dans une période t , ce dernier est déplacé de son emplacement vers un nouvel emplacement dans la période $t + 1$ avec un coût de déplacement associé, si le nouvel emplacement existe. Sinon, ce CD est fermé avec un coût de fermeture associé. Notons que deux CDs ne peuvent pas être déplacés vers le même emplacement.

Après avoir effectué cette opération, une réaffectation des clients aux CDs est effectuée au cours de la période $t + 1$ en affectant les clients alloués aux CDs défaillants de la période t à d'autres CDs ouverts afin de satisfaire leurs demandes. A Noter que les ensembles des CDs ouverts et fermés changent durant chaque période. En tenant compte de cette stratégie, trois possibilités peuvent être envisagées dans notre cas:

- Le nombre de sites défaillants N à la fin de la période t est supérieur au nombre des nouveaux sites M localisés au cours de la période $t + 1$. Dans ce cas, M sites sont déplacés vers de nouveaux emplacements, $N - M$ sites sont fermées au cours de la période $t + 1$.
- Le nombre de sites défaillants N à la fin de la période t est inférieur au nombre des nouveaux sites M localisés au cours de la période $t + 1$. Dans ce cas, les N sites sont déplacés vers de nouveaux emplacements, $M - N$ sites sont ouverts au cours de la période $t + 1$.
- Le nombre de sites défaillants à la fin de la période t est égal au nombre des nouveaux sites localisées au cours de la période $t + 1$. Dans ce cas, tous les sites sont déplacés vers de nouveaux emplacements.

V.2.2 Exemple introductif

Un exemple du problème de localisation dynamique considéré est illustré par les figures ci-dessous. La **figure V.1** représente un réseau avec quinze nœuds de localisation potentielle, quatre sites sont localisés dans les nœuds 3, 7, 10 et 12 au cours de la première période. La figure montre que les clients 2, 7 et 8 sont affectés au CD 7, les clients 4, 5, 12 et 15 sont affectés au CD 12, les clients 9, 10, 11 et 13 sont affectés au CD 10 et les clients 1, 3, 6 et 14 sont affectés au CD 3.

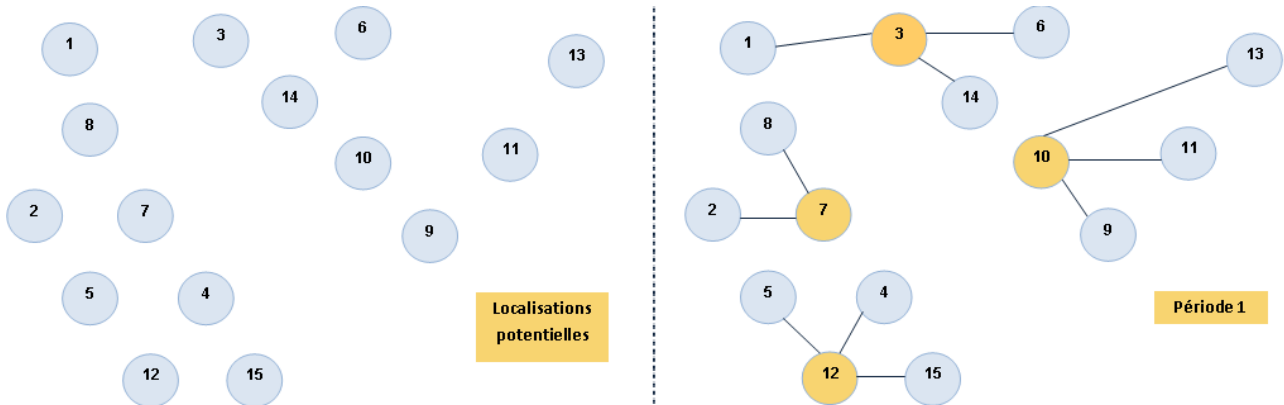


Figure V.1. La structure initiale du réseau considéré

Nous supposons que les CD 7 et CD 10 sont indisponibles à la fin de la première période. Notre objectif est de réaffecter les clients 2, 7, 8, 9, 10, 11 et 13 affectés au cours de cette période aux CD 7 et CD 10 à des CDs ouverts au cours de la période suivante. Notre modèle considère trois possibilités que nous expliquons à travers la **figure V.2** :

1. La première possibilité considère qu'un nouveau site est localisé dans le nœud 4 au cours de la période 2, le CD 7 est déplacé vers l'emplacement 4 et le CD 10 est fermé. Les clients 2, 7, 8 et 9 sont affectés au CD 4 et les clients 10, 11 et 13 au CD 3. Trois CDs sont opérationnels au cours de la période 2.
2. La seconde possibilité suppose que trois nouveaux sites sont localisés dans les nœuds 4, 6 et 15 au cours de la période 2, les CD 7 et CD 10 sont déplacés vers les emplacements 4 et 6 respectivement et le DC 15 est ouvert. Les clients 2, 7 et 8 sont affectés au CD 4, les clients 10, 11 et 13 sont affectés au CD 6 et le client 9 est affecté au CD 15. Cinq CDs sont opérationnels au cours de la période 2.
3. Dans la troisième possibilité deux nouveaux sites sont localisés dans les nœuds 4 et 6 au cours de la période 2, les CD 7 et CD 10 sont déplacés vers les emplacements 4 et 6 respectivement. Les clients 2, 7 et 8 sont affectés au CD 4 et les clients 9, 10, 11 et 13 sont affectés au CD 6. Quatre CDs sont opérationnels au cours de la période 2.

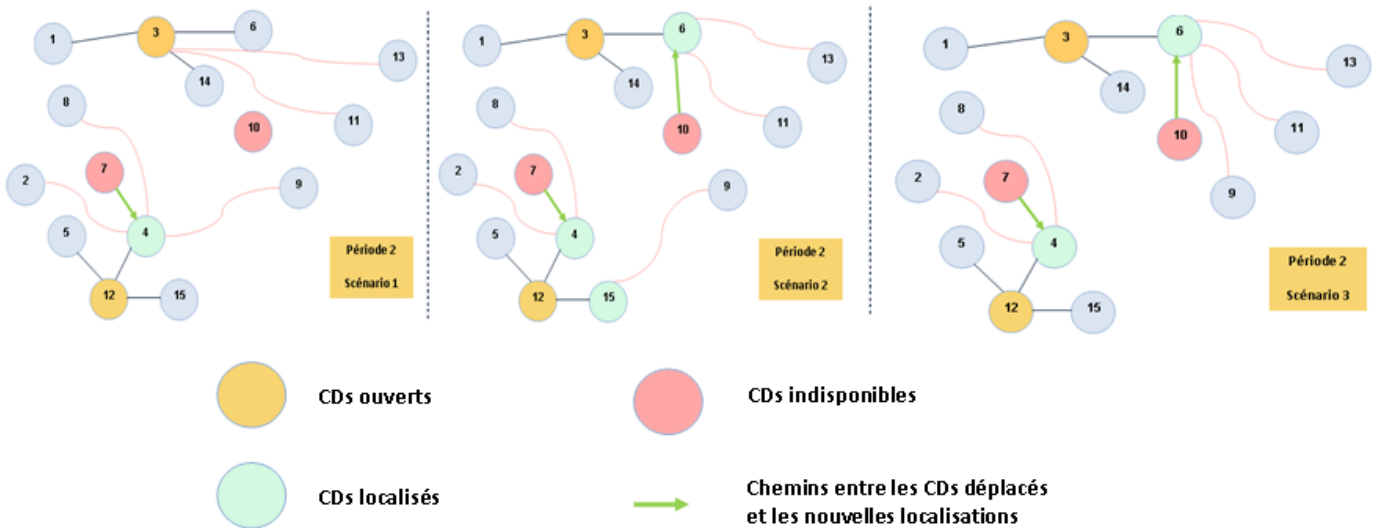


Figure V.2. Les trois possibilités considérées

Le modèle proposé permet de déplacer les sites de leur emplacement vers d'autres en passant d'une période à l'autre avec possibilité d'ouverture et de fermeture d'autres sites. Notons que notre modèle favorise le déplacement d'un site défaillant par rapport à sa fermeture, ce qui permettra d'économiser des coûts supplémentaires d'ouverture et de fermeture des sites dans le réseau. Nous envisageons également la minimisation des émissions de CO2 ce qui mènera à chercher un compromis entre les coûts logistiques et la quantité des émissions de CO2.

V.2.3 Hypothèses et contributions

La contribution principale de ce travail est de développer un nouveau modèle multiobjectif et multi-périodes qui intègre à la fois les sites mobiles et la gestion de leurs indisponibilités. Le modèle proposé vise à trouver la meilleure localisation des sites dans chaque période pour satisfaire la demande variable des clients et faire face aux perturbations dues aux indisponibilités des sites afin de trouver le compromis entre le coût total et la quantité des émissions de CO2 avec les hypothèses suivantes:

- Le réseau de distribution étudié est complètement connecté.
- Le nombre de sites à localiser n'est pas fixé a priori et peut varier d'une période à l'autre.
- Les sites possèdent une capacité infinie.
- Les sites possèdent la même probabilité d'indisponibilité durant chaque période.
- Un scénario de perturbations est généré à la fin de chaque période pour déterminer les sites indisponibles lors de la période suivante.

- Chaque site indisponible au cours d'une période donnée peut être fermé ou déplacé de son emplacement à un autre au cours de la période suivante en utilisant une infrastructure de mobilité existante.
- Une infrastructure de mobilité est adoptée comme voie entre chaque paire de nœuds pour déplacer un site d'un emplacement à un autre.
- Chaque site peut être ouvert, fermé et rouvert plusieurs fois au cours de l'horizon de planification.
- La relocalisation des sites est effectuée afin de répondre aux changements des demandes des clients et de faire face aux indisponibilités des sites à travers l'horizon de planification.
- Un seul site peut être déplacé à un emplacement donné au cours d'une période donnée.
- Seuls les clients affectés aux sites indisponibles à la fin d'une période donnée sont affectés aux sites ouverts au cours de la période suivante.
- L'ouverture et la fermeture des sites engendrent des dépenses supplémentaires dans la conception du réseau de distribution.
- Les coûts de stockage sont pris en considération par l'intégration des coûts de stockage des produits et les coûts de maintien des stocks de sécurité dans la fonction objectif et cela en se basant sur la politique de la Quantité Économique de Commande (QEC).
- Nous prenons en compte les émissions de CO2 générées par les opérations de transport et des sites ainsi que le déplacement des sites.
- La quantité des émissions de CO2 générée par un site donné est inversement proportionnelle à son coût de localisation.

V.3 Formulation mathématique

En tenant compte des hypothèses présentées ci-dessus, cette section présente le modèle multiobjectif linéaire mixte en nombres entiers proposé ainsi que sa description. La résolution de ce problème nous permettra de déterminer les variables de décision X_j^t , Y_{ij}^t et Z_{jj}^t , et donc la structure de la chaîne d'approvisionnement pour chaque période. Nous utilisons les paramètres et variables de décision suivants pour la formulation mathématique de notre problème :

Symboles	Description
Ensembles	
T	Ensemble des périodes
N	Nombre de périodes
I	Ensemble de clients
L	Ensemble des localisations de centres de distribution (CDs) potentiels
S_t^f	Ensemble des CDs ouverts pendant la période t et qui peuvent être fermés lors de la période suivante
S_t^o	Ensemble des CDs fermés pendant la période t qui représente les localisations de CDs potentiels lors de la période suivante. ($S_t^o \cup S_t^f = L \forall t$)
Indices	
i	Indice clients
j	Indice des CDs
t	Indice des périodes
Coûts	
CL_j^t	Coût fixe de localisation de CD_j pendant la période t
CF_j^t	Coût fixe de fermeture du CD_j à la fin de la période t
h_j	Coût de stockage des produits dans le CD_j
CC_j	Coût fixe de commande (incluant le coût fixe de transport) du CD_j auprès du fournisseur
CT_{ij}	Coût de transport unitaire du CD_j au client i
CD_{jj}^t	Coût de déplacement du CD depuis son emplacement j au cours de la période $t-1$ à un emplacement j' pendant la période t
Paramètres	
D_i^t	Moyenne de la demande quotidienne du client i pendant la période t
V_i^t	Variance de la demande quotidienne du client i pendant la période t
L_j	Délai de livraison moyen en jours du fournisseur au CD_j
Λ_j	Variance du délai de livraison du fournisseur au CD_j
θ	Nombre de jours par période
α	Niveau de service désiré au niveau du CDs
W_α	Coefficient de sécurité tel que $P(W \leq W_\alpha)$
$dist_{jj'}$	Distance entre l'emplacement j et l'emplacement j'
CEL_j	Quantité des émissions CO2 du CD_j
$CEM_{jj'}$	Facteur des émissions CO2 dues au déplacement du CD depuis l'emplacement j à un emplacement j' par km
CET_{ij}	Facteur des émissions CO2 dues au transport des produits depuis le CD_j au client i par km
Variables de décision	
X_j^t	1 si le CD est ouvert à la localisation j pendant la période t ; 0 sinon
U_j^t	1 si le CD_j change d'état en passant de la période $t-1$ à la période t ; 0 sinon
Y_{ij}^t	Variable d'allocation égale à 1 si le client i est servi par le CD_j pendant la période t , 0 sinon
$Z_{jj'}^t$	1 si le CD est déplacé depuis son emplacement j au cours de la période $t-1$ à un emplacement j' pendant la période t ; 0 sinon

Nous considérons dans notre modèle les fonctions objectifs suivantes :

$$\begin{aligned}
 J(X, Y, U, Z) = & \min \sum_{j \in L} CL_j^1 X_j^1 + \sum_{t=2}^N \sum_{j \in S_{t-1}^f} CF_j^t \left(U_j^t - \sum_{j' \in S_{t-1}^o} Z_{jj'}^t \right) \\
 & + \sum_{t=2}^N \sum_{j' \in S_{t-1}^o} CL_{j'}^t \left(U_{j'}^t - \sum_{j \in S_{t-1}^f} Z_{jj'}^t \right) + \sum_{t=2}^N \sum_{j \in S_{t-1}^f} \sum_{j' \in S_{t-1}^o} CD_{jj'}^t Z_{jj'}^t \\
 & + \sum_{t=1}^N \sum_{j \in L} \sum_{i \in I} \theta D_i^t CT_{ij} Y_{ij}^t + \sum_{t=1}^N \sum_{j \in L} \sqrt{2h_j CC_j \theta \sum_{i \in I} D_i^t Y_{ij}^t} \\
 & + \sum_{t=1}^N \sum_{j \in L} W_\alpha h_j \sqrt{L_j \sum_{i \in I} V_i^{t2} Y_{ij}^t + \Lambda_j^2 \left(\sum_{i \in I} D_i^t Y_{ij}^t \right)^2} \tag{5.1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K(Y, Z) = & \min \sum_{t=1}^N \sum_{j \in L} CEL_j X_j^t + \sum_{t=1}^N \sum_{j \in L} \sum_{i \in I} CET_{ij} \theta dist_{ij} Y_{ij}^t \\
 & + \sum_{t=2}^N \sum_{j \in S_{t-1}^f} \sum_{j' \in S_{t-1}^o} CEM_{jj'} dist_{jj'} Z_{jj'}^t \tag{5.2}
 \end{aligned}$$

La première fonction objectif représente la minimisation des coûts d'ouverture, de déplacement et de fermeture des CDs et des coûts totaux de transport ; l'objectif est de trouver la meilleure localisation des CDs et leur allocation aux clients à chaque période en tenant compte de la mobilité des sites afin de minimiser le coût total. Le premier terme de cette fonction objectif représente les coûts d'ouverture des CDs pendant la première période. Les autres termes calculent les coûts engendrés depuis la deuxième période où les coûts de fermeture et d'ouverture des CDs ayant changé d'état sont calculés par le deuxième et le troisième terme respectivement. Les coûts de déplacement des CDs d'un emplacement à un autre, sont représentés par le quatrième terme, le cinquième terme calcule les coûts de transport des CDs aux clients et les deux derniers termes représentent les coûts de stockage et de maintien des stocks de sécurité au niveau des CDs (en supposant que chaque CD utilise la politique QEC).

La deuxième fonction objectif vise à minimiser l'impact environnemental et cela par la minimisation de la quantité des émissions de CO2 générées par les sites localisés, le transport des produits et les opérations de déplacement des sites pour toutes les périodes considérées.

Sous les contraintes suivantes:

$$\sum_{j \in L} X_j^t \geq 1 \quad \forall j \in L, t \in T \quad (5.3)$$

$$\sum_{j \in L} Y_{ij}^t = 1 \quad \forall i \in I, j \in L, t \in T \quad (5.4)$$

$$Y_{ij}^t \leq X_j^t \quad \forall i \in I, j \in L, t \in T \quad (5.5)$$

$$Z_{jj'}^t = 0 \quad \forall j \in L, j' \in S_{t-1}^f, t \geq 2 \quad (5.6)$$

$$U_j^t = \max(X_j^t - X_j^{t-1}, X_j^{t-1} - X_j^t) \quad \forall j \in L, t \geq 2 \quad (5.7)$$

$$\sum_{j' \in S_{t-1}^o} Z_{jj'}^t \leq U_j^t \quad \forall j \in S_{t-1}^f, t \geq 2 \quad (5.8)$$

$$\sum_{j \in S_{t-1}^f} Z_{jj'}^t \leq U_{j'}^t \quad \forall j' \in S_{t-1}^o, t \geq 2 \quad (5.9)$$

$$\sum_{j \in S_{t-1}^f} \sum_{j' \in S_{t-1}^o} Z_{jj'}^t = \min \left(\sum_{j \in S_{t-1}^f} U_j^t, \sum_{j' \in S_{t-1}^o} U_{j'}^t \right) \quad \forall t \geq 2 \quad (5.10)$$

$$X_j^t, Y_{ij}^t, U_j^t, Z_{jj'}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j, j' \in L, t \in T \quad (5.11)$$

Les contraintes (5.3) garantissent qu'au moins un CD soit localisé dans chaque période, les contraintes (5.4) exigent que chaque client soit affecté à un seul CD ouvert dans chaque période. Les contraintes (5.5) garantissent que les clients ne soient servis que par des CDs ouverts. Les contraintes (5.6) interdisent le déplacement des CDs de leur emplacement vers des localisations qui peuvent être fermées au cours de la période suivante. Les contraintes (5.7) calculent la valeur de la variable U_j^t pour chaque période. Les contraintes (5.8) garantissent qu'un site ouvert dans une période t-1 ne peut pas être déplacé vers un autre emplacement dans la période suivante uniquement si son état change. Les contraintes (5.9) empêchent un site fermé au cours d'une période t-1 de recevoir un site dans son emplacement au cours de la période suivante uniquement si son état change. De plus, les contraintes (5.8) et (5.9) garantissent que chaque CD est déplacé de son emplacement vers un seul autre emplacement et que chaque nouvel emplacement ne peut recevoir qu'un seul CD respectivement. Les contraintes (5.10) montrent que le nombre de CDs déplacés dans chaque période t est égal à la valeur minimale entre le nombre de CDs ouverts et le nombre de CDs fermés dans la période t-1 ayant changé d'état dans la période t, cette contrainte favorise le

déplacement des CDs par rapport à leur ouverture / fermeture ce qui minimise le coût total. La nature binaire des différentes variables de décision est exprimée par les contraintes (5.11).

V.4 Approche de résolution

V.4.1 Codage des solutions

Nous utilisons une métaheuristique basée sur un algorithme évolutionnaire multi-objectifs (MOGA) pour résoudre le problème considéré. De plus, le modèle proposé est basé sur le problème de localisation des sites à deux niveaux à capacité infinie(UFLP) considéré comme un problème NP-difficile (voir Cornuejols et al. (1983)). Une représentation de solutions est définie à l'aide d'un codage binaire. Deux parties représentent une solution de notre modèle, la première pour la localisation des CDs et la seconde pour l'allocation. Nous utilisons une matrice ($N \times M = C + C^2$) où N représente le nombre de périodes et C représente le nombre de clients. Par exemple, supposons que $N = 5$ et $C = 6$, la première partie de la **figure V.3** indique les CDs localisés dans chaque période; les **DC 1**, **CD 4** et **CD 6** sont ouverts pendant la première période et la deuxième partie indique à l'affectation des clients aux DCs. Dans cet exemple, $S_1^f = \{\text{CD 1, CD 4, CD 6}\}$ et $S_1^o = \{\text{CD 2, CD 3, CD 5}\}$. Nous supposons que les **CD 1** et **CD 6** deviendront indisponibles lors de la période suivante et le **CD 3** est ouvert. Le **CD 1** est fermé dans la période 2 et le **CD 6** est déplacé vers l'emplacement 3.

X_j	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	Y_{5j}	Y_{6j}	
100101	100000	000100	100000	000100	100000	000001	$t = 1$
001100	001000	000100	001000	000100	000100	001000	$t = 2$
100110	100000	000100	100000	000100	000100	000010	$t = 3$
110010	100000	010000	100000	010000	000010	000010	$t = 4$

Figure V.3. Représentation proposée d'une solution réalisable

Les nouveaux contenus des ensembles S_2^f et S_2^o sont $S_2^f = \{\text{CD 3, CD 4}\}$ et $S_2^o = \{\text{CD 1, CD 2, CD 5, CD 6}\}$. Tous les clients affectés aux **CD 1** et **CD 6** au cours de la première période sont réalloués aux CDs ouverts lors de la deuxième période. De plus, nous calculons les valeurs des variables U et Z , dans cette période nous avons $U_1^2 = 1$, $U_2^2 = 0$, $U_3^2 = 1$, $U_4^2 = 0$, $U_5^2 = 0$, $U_6^2 = 1$ et $Z_{63}^2 = 1$. Le même concept est appliqué à travers l'horizon de planification de quatre périodes. Une schématisation de l'évolution d'une solution réalisable de notre problème est expliquée par la **figure V.4**. Notons que chaque CD peut être ouvert et fermé plusieurs fois à travers l'horizon de planification ; l'exemple présenté montre que le **CD 1** est ouvert en période 1, fermé en période 2 et rouvert en période 3.

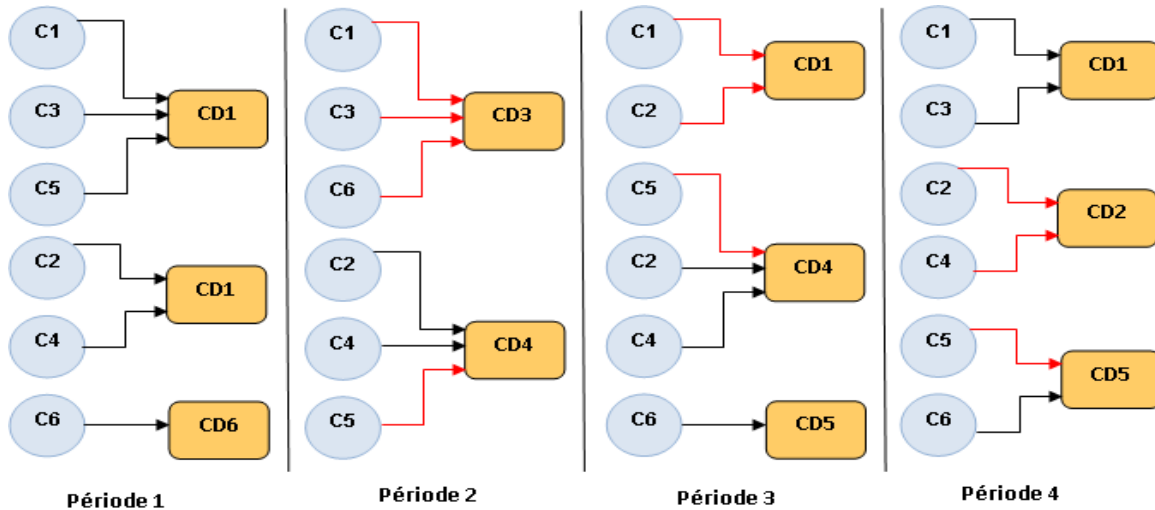


Figure V.4. L'évolution d'une solution réalisable à travers l'horizon de planification

V.4.2 Approche proposée

La résolution du problème étudié consiste à trouver la meilleure structure du réseau de distribution étudié au cours de chaque période afin de minimiser les deux fonctions objectives. Un algorithme génétique multiobjectif (MOGA) est utilisé pour résoudre ce problème. L'algorithme (NSGA) proposé par (Srinivas et Deb, 1994) se présente comme l'un des plus performants MOGA développés dans la littérature. Cet algorithme classe les solutions en fonction du concept de dominance sans utiliser le principe d'élitisme. L'algorithme NSGA-II se distingue comme une version étendue du NSGA considérée par les praticiens comme l'un des algorithmes les plus utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation multiobjectif puisqu'il est élitiste et utilise l'opérateur de densité (*Crowd comparison operator*) afin de garantir la diversification de solutions. Le NSGA-II utilise une procédure de classement modifiée pour réduire la complexité du calcul en évoluant le concept proposé par (Goldberg et Holland, 1989). Cet algorithme améliore une population de solutions candidates en utilisant un processus évolutif basé sur la dominance au sens de Pareto afin d'obtenir un front de solutions non dominées diversifiés (Krishnapriya et Khaleelur Rahiman, 2016). L'avantage le plus important du NSGA-II est sa capacité à créer un front Pareto basé sur une approche de tri basé sur la dominance pour chaque individu et à mettre en œuvre l'estimation de la densité en utilisant l'affectation de la distance "*crowding*" (Souier et al., 2019).

Jones et al. (2002) ont présenté un état de l'art sur l'utilisation des métaheuristiques dans la résolution des problèmes d'optimisation multi-objectifs. Selon leur étude basée sur 115 articles publiés lors des dix dernières années, 70% des travaux réalisés sur les problèmes d'optimisation multicritères utilisant les métaheuristiques choisissent les algorithmes génétiques et 24% le recuit simulé. Dans notre cas, l'approche proposée est implémentée en se basant sur l'algorithme génétique multicritères (NSGA-II) proposé par Deb et al. (2002).

Algorithme 5.1 Algorithme NSGA-II utilisé

- **Étape 1.** Générer la population initiale P de taille N aléatoirement.
- **Étape 2.** Trier les solutions de P en basant sur le principe de la non-dominance.
- **Étape 3.** Utiliser la « sélection binaire par tournoi » et les opérateurs de croisement et mutation afin de générer une population G de taille N .
- **Étape 4.** Exécuter une fonction de correction pour les solutions infaisables qui ne respectent pas les contraintes du modèle proposé.
- **Étape 5.** $R = P \cup G$.
- **Étape 6.** Trier les solutions de R en basant sur le principe de la non-dominance.
- **Étape 7.** Sélectionner les N meilleure solution de R et exécuter le « crowd comparaison operator » (voir algorithme section II.4.2) en cas de besoin, ces solutions sont sauvegardées dans P .
- **Étape 9.** Répéter les étapes de 2 à 7 jusqu'à la satisfaction des conditions d'arrêt.
- **Étape 10.** Retourner la meilleure solution trouvée en utilisant l'approche TOPSIS pour les deux objectifs considérés (voir section II.5).

L'utilisation des opérateurs de croisements et de mutations dans l'algorithme NSGA-II pourra générer des solutions infaisables. Par conséquent, nous utilisons une fonction de correction permettant aux solutions de vérifier les contraintes suivantes:

- Dans chaque période, garder ouvert les CDs ouverts et garder fermé les CDs fermés durant la période précédente.
- Fermer les CDs qui ne sont affectés à aucun client.
- Conserver l'allocation des clients non impactés par les indisponibilités des sites dans chaque période.
- S'assurer que chaque client est affecté à un seul CD ouvert dans chaque période.

L'approche NSGA-II proposée génère un ensemble de solutions non dominées. Ces solutions sont classées en utilisant la technique TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) présenté dans le chapitre II. Elle permet de classer l'ensemble des solutions non dominées pour sélectionner la solution la plus adaptée au décideur. Dans notre cas, nous proposons une seule solution à la fin de chaque période qui définit la structure du réseau de distribution: CDs ouverts et les décisions

d'allocation des clients au CDs localisés. Un scénario est généré pour définir les CDs indisponibles et prendre les décisions de relocalisation des CDs au cours de la prochaine période. Ceci est répété tout au long de l'horizon de planification. Nous utilisons ensuite la méthode TOPSIS par l'attribution des poids de compromis à chaque critère en fonction de la distance aux solutions idéales et mauvaises.

V.5 Analyse des résultats obtenus

Cette section évalue les performances de l'algorithme (NSGA-II) proposé. Des instances de chaîne logistique de différentes tailles sont étudiées en faisant varier le nombre de clients qui représente le nombre de CDs candidats. Les paramètres utilisés sont générés en utilisant les valeurs décrites dans le **tableau V.1**. Les expériences numériques sont effectuées en utilisant un PC Pentium Core 2 Duo 2,20 GHZ de 2 Go de RAM et en implémentant l'approche NSGA-II et la technique TOPSIS proposées en langage VBA.

Tableau V.1. Les valeurs des paramètres du modèle

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
N	5	D_i^t	$\sim U [100, 1600]$
CL_j^t	$\sim U [2000, 6000]$	V_i^t	$\sim U [50, 100]$
CF_j^t	$\sim U [1000, 3000]$	L_j	$\sim U [10, 30]$
$CD_{jj'}^t$	$\sim U [300, 700]$	Λ_j	$\sim U [5, 10]$
CT_{ij}	$\sim U [10, 20]$	α	97.5 %
h_j	25	W_α	1.96
CC_j	$\sim U [50, 100]$	CEL_j	$\sim U [10, 30]$
$dist_{jj'}$	$\sim U [10, 20]$	$CEM_{jj'}$	$\sim U [0.1, 1]$
θ	250	CET_{ij}	$\sim U [0.1, 1]$

Nous considérons des problèmes de localisation de différentes tailles composées de 10, 20, 30, 50, 60 et 80 nœuds. Les paramètres de l'algorithme proposé sont présentés dans le **tableau V.2**.

Tableau V.2. Valeurs des paramètres de l'algorithme NSGA-II

Paramètres	Valeur
<i>Nombre d'itérations</i>	70
<i>Taille de la population</i>	80
<i>Pourcentage de croisement</i>	0.7
<i>Pourcentage de mutation</i>	0.1

V.5.1 Les résultats obtenus de l'algorithme NSGA-II

Le modèle proposé du problème de localisation des sites mobiles est résolu pour différents exemples numériques, les paramètres TOPSIS varient entre 0,2 et 0,8. Le **tableau V.3** montre les résultats obtenus

pour différentes instances du problème étudié en utilisant l'approche NSGA-II pour cinq périodes. Chaque période représente un an de 250 jours. Les résultats obtenus présentent le nombre de CDs ouverts, indisponibles et déplacés au cours des cinq périodes. Le nombre de clients réalloués est également présenté avec le coût total obtenu et la quantité des émissions de CO2 pour chaque solution du front Pareto ayant le meilleur classement TOPSIS.

Tableau V.3. Résultats obtenus pour N = 5 en utilisant l'approche TOPSIS NSGA-II

Numéro de l'instance	Paramètre TOPSIS α	Nombre de nœuds	Nombre de CDs ouverts	Nombre de CDs indisponibles	Nombre de CDs déplacés	Nombre de clients réalloués	Coût total (millions d' U.M)	Quantité des émissions CO2 (Kg)
1	0.2	10	19	11	8	25	139.46	42720.94
2		20	25	12	10	46	251.34	103939.77
3		30	40	16	9	68	471.35	151206.17
4		50	47	18	15	95	791.46	292938.70
5		60	66	35	30	164	906.96	408568.05
6		80	74	23	14	98	1280.19	474570.08
7	0.4	10	18	9	8	21	145.23	43910.95
8		20	28	8	6	34	238.38	93165.71
9		30	33	13	6	65	406.20	130412.34
10		50	52	23	20	111	774.56	267759.52
11		60	69	8	4	31	907.88	312671.80
12		80	85	43	38	201	1296.35	518535.53
13	0.5	10	22	6	4	11	145.09	20302.64
14		20	28	9	8	34	258.32	77957.24
15		30	35	18	11	64	410.95	131707.51
16		50	47	21	14	102	775.56	272467.53
17		60	63	29	21	132	924.09	379374.60
18		80	93	30	27	125	1290.10	461180.19
19	0.6	10	16	8	7	14	154.48	46839.21
20		20	27	16	10	49	257.33	89693.83
21		30	33	20	15	75	397.91	143999.33
22		50	67	17	9	53	810.56	229519.83
23		60	80	48	38	175	926.64	384522.89
24		80	95	43	34	182	1306.75	463371.87
25	0.8	10	17	7	5	17	159.37	31045.08
26		20	31	13	9	43	270.66	81209.83
27		30	32	12	7	58	404.52	151137.71
28		50	57	21	17	88	806.40	296708.98
29		60	76	41	33	156	933.44	327390.03
30		80	106	64	53	262	1358.95	429099.13

Nous détaillons dans le **tableau V.4** les résultats obtenus pour le problème de localisation composé de 80 nœuds avec $\alpha = 0,5$ et $\beta = 0,5$ (instance N° 18), ces résultats montrent que 19 CDs sont ouverts lors de la première période, 2 d'entre eux sont indisponibles à la fin de la période et 4 clients sont réaffectés dans la période suivante. 18 CDs sont opérationnels dans la période 2, les 17 CDs opérationnels de la première période et un CD indisponible qui est déplacé de son emplacement de la première période vers un nouvel

emplacement pendant la seconde. Cependant, le CD restant est fermé. Cette période génère des coûts de déplacement et de fermeture de CDs. Dans la période 3, 18 CDs sont opérationnels et 4 d'entre eux deviendront indisponibles à la fin de la période, 20 CDs sont opérationnels dans la période 4, les 14 CDs opérationnels de la troisième période, les 4 CDs indisponibles qui sont déplacés vers de nouveaux emplacements et 2 CDs supplémentaires sont ouverts. Cette période génère des coûts de déplacement et d'ouverture de CDs. La courbe des solutions optimales au sens de Pareto obtenues pour ce cas après la dernière période est présentée par la **figure V.5**.

Tableau V.4. Les détails des résultats obtenus à travers l'horizon de planification pour le cas 80 nœuds

Périodes	NB de CDs ouverts	NB de CDs indisponibles	NB de clients réalloués	NB de CDs déplacés	Coût total					Quantité des émissions CO2
					Coût d'ouverture de CDs	Coût de déplacement de CDs	Coût de fermeture de CDs	Coût de transport	Coût de stockage	
Période 1	19	2	4	0	96627.19	0	0	243858320.68	29770976.42	88992.53
Période 2	18	15	65	1	0	473.12	3821.54	198838865.39	24375750.85	86969.11
Période 3	18	4	21	15	0	5596.54	0	221726464.51	24395082.97	90414.60
Période 4	20	9	35	4	11294.68	1620.29	0	243215346.18	25877508.96	93378.00
Période 5	18	0	0	7	0	7634.19	3228.48	250765207.33	27156064.29	101425.93

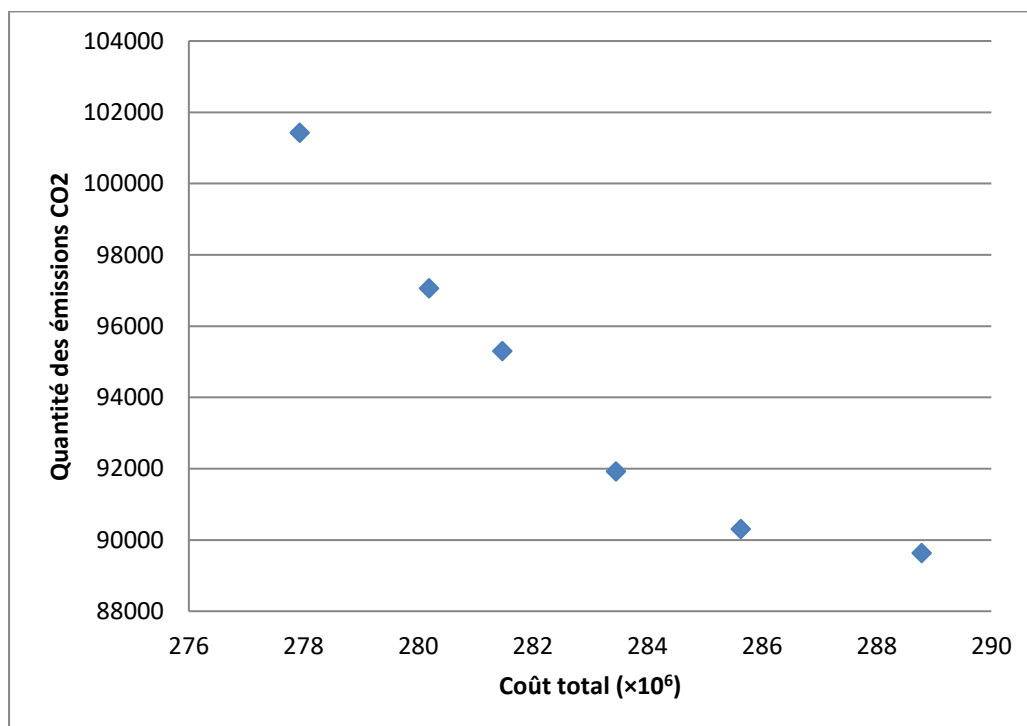


Figure V.5. Courbe du front Pareto pour le cas 80 nœuds

Le **tableau V.4** montre que nous ne pouvons pas avoir de coûts d'ouverture et de fermeture de CDs dans la même période, notre modèle génère des coûts de déplacement afin de minimiser les dépenses supplémentaires dans le réseau. L'analyse des résultats de l'approche NSGA-II sera présentée dans les sections suivantes.

V.5.2 Comparaison du modèle proposé avec un modèle dynamique classique

Cette section compare le modèle proposé à un modèle classique qui utilise des sites immobiles dans un environnement dynamique, nous utilisons les mêmes instances (10, 20, 30, 50, 60 et 80 nœuds) avec $\alpha = 0,5$ et $\beta = 0,5$ comme paramètres TOPSIS. L'utilisation des sites mobiles permet d'avoir des gains en coûts et cela en économisant les coûts d'ouverture et de fermeture supplémentaires en utilisant les déplacements des sites. Par ailleurs, le déplacement des sites mobiles augmente la quantité des émissions de CO2 par rapport à un modèle classique à cause des émissions générées par les sites déplacés. Nous comparons en ce qui suit les gains engendrés en coûts et les pertes en quantité des émissions de CO2 générées par l'utilisation des sites mobiles pour des horizons de planification de: 2, 3, 5, 6 et 10 périodes pour montrer l'efficacité du modèle proposé. Les résultats détaillés dans la **figure V.6** montrent que les gains engendrés par notre modèle peuvent arriver jusqu'à **758 000 um** et que le modèle proposé génère un excédent maximal de **370 Kg** en quantité des émissions de CO2. Les résultats montrent que notre modèle est plus efficace pour un nombre de périodes plus important.

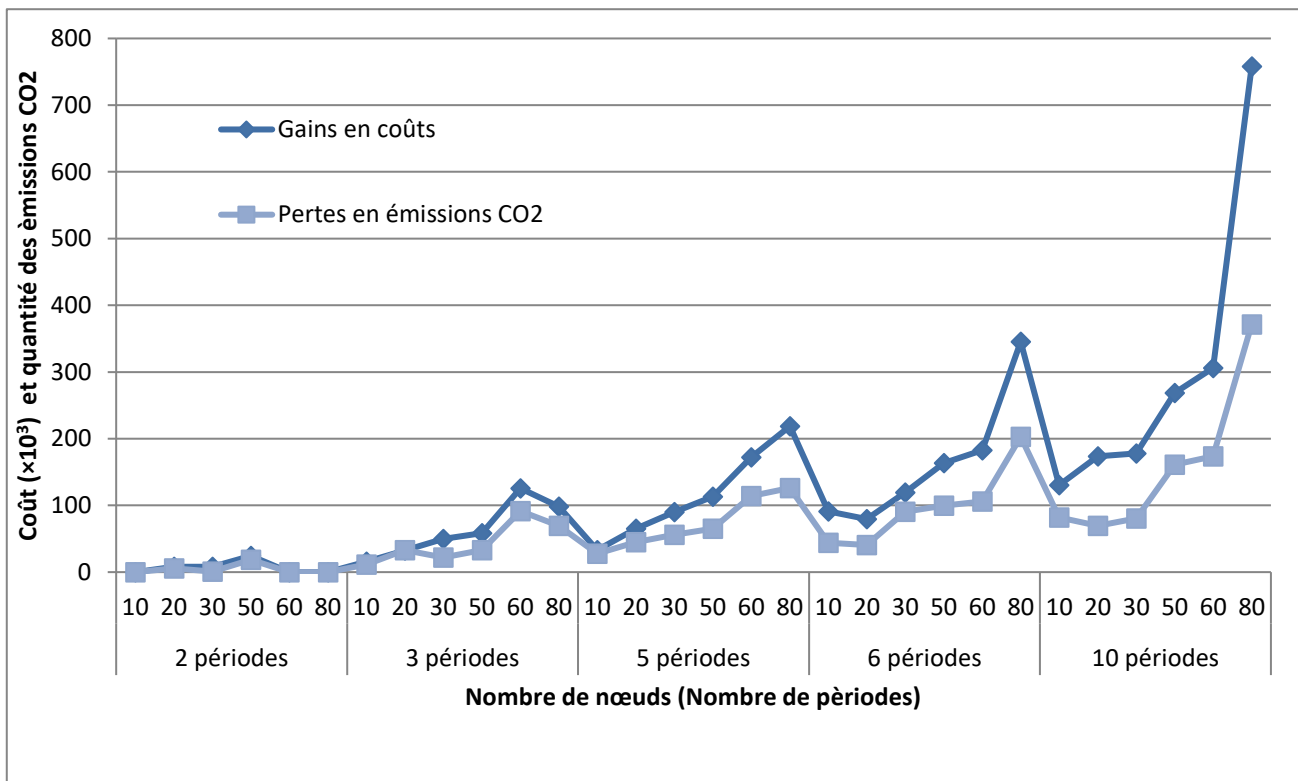


Figure V.6. Comparaison des résultats obtenus pour le modèle proposé et un modèle classique pour des horizons de planification de différentes périodes

V.5.3 Comparaison du modèle proposé avec un modèle mono-objectif

Nous étudions dans cette section le nombre de CD ouverts à travers l'horizon de planification à la fois pour le cas multi-objectifs avec $\alpha = 0,5$ et $\beta = 0,5$ comme paramètres TOPSIS et le cas mono-objectif afin de montrer comment la prise en compte des émissions de CO2 affecte le nombre de CDs ouverts. La **figure V.7** illustre le nombre de CDs ouverts et montre que la considération des émissions CO2 augmente le nombre de CDs ouverts, cela peut s'expliquer par l'hypothèse que la quantité des émissions de CO2 générée par un site est inversement proportionnelle à son coût de localisation. Pour cette raison, notre modèle multiobjectif localise plus de CDs afin qu'un compromis soit trouvé entre les coûts logistiques et la quantité des émissions CO2, ce qui augmente le coût total. L'évolution des valeurs des coûts est illustrée pour les deux modèles dans la **figure V.8**.

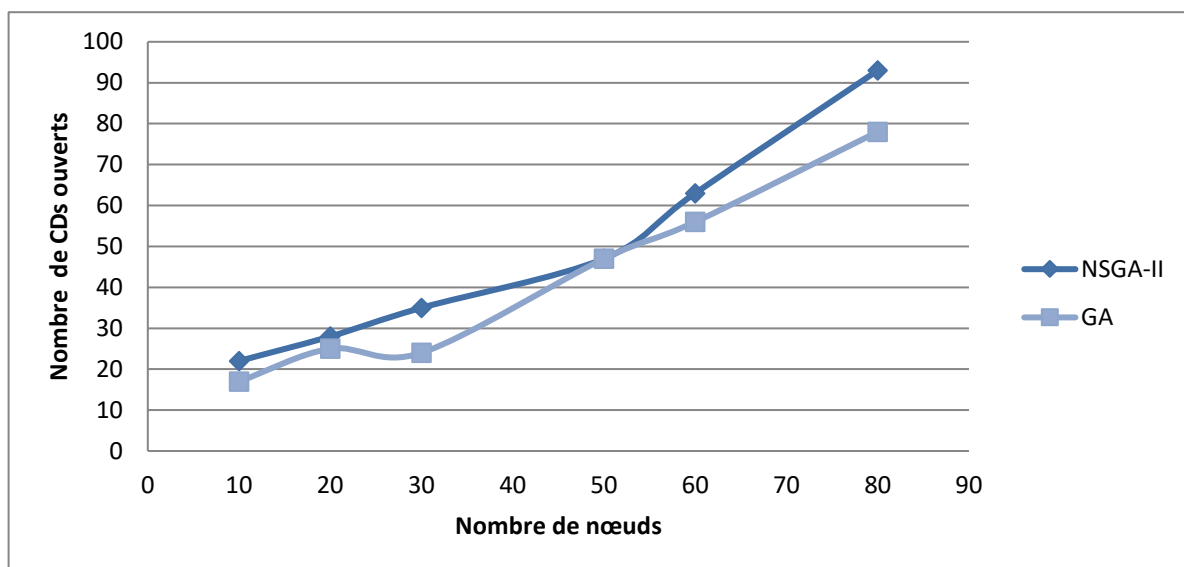


Figure V.7. Le nombre de CDs ouverts pour les approches multi-objectifs et mono-objectif

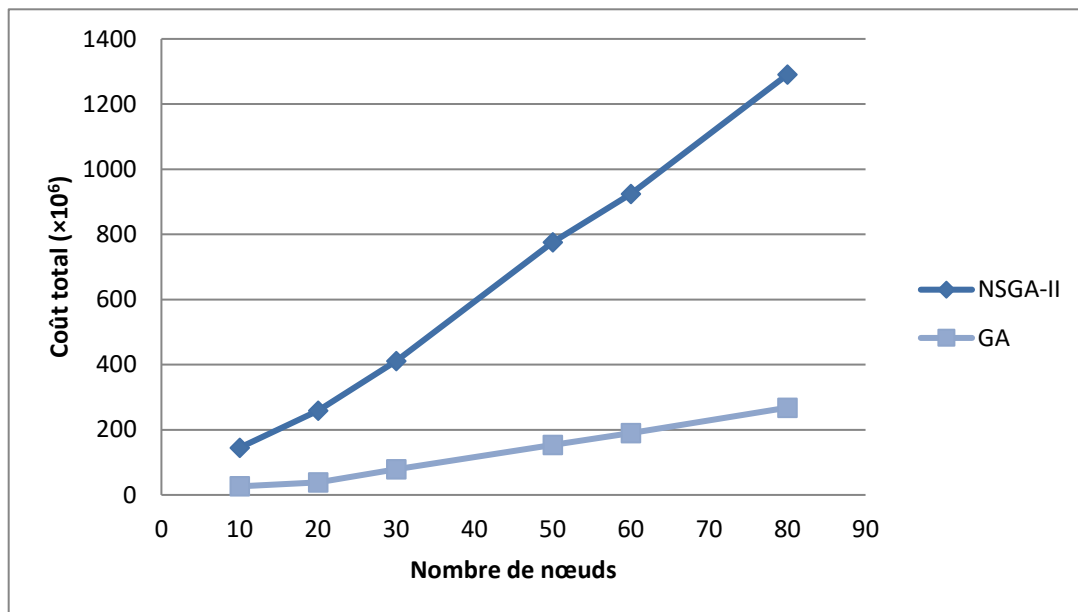


Figure V.8. L'évolution du coût total pour les approches multiobjectif et mono-objectif

V.6 Conclusions

La prise en compte de l'aspect dynamique est primordiale lorsqu'il s'agit de considérer des décisions stratégiques telle que la localisation des sites. Un problème dynamique de localisation / relocalisation des sites mobiles a été proposé dans ce chapitre pour faire face aux indisponibilités des sites avec comme objectif la minimisation des coûts logistiques et la quantité des émissions CO2. Ce problème est résolu en utilisant un algorithme génétique multicritères(NSGA-II).Les résultats obtenus montrent que la prise en compte des sites mobiles nous a permis d'économiser des coûts d'ouverture et de fermeture supplémentaires et plus de CDs sont nécessaires lorsque l'on considère les émissions CO2 afin de trouver un compromis entre les coûts logistiques et les contraintes environnementales.

Pour les travaux futurs, l'une des directions de recherche consiste à considérer les capacités des sites avec possibilité de transfert de capacité des sites indisponibles aux sites opérationnelles. Notre modèle peut aussi intégrer le fait que les nombres d'ouverture et de fermeture des sites à travers l'horizon de planification sont limités. D'autres objectifs peuvent également être considérés, comme la maximisation de la satisfaction des clients et la minimisation des pénalités dues aux demandes non satisfaites.

Conclusion générale

Les problématiques abordées dans le cadre de cette thèse sont issues de la théorie de la localisation. Plusieurs problèmes de localisation des sites sont présentés et résolus dans la littérature quand il s'agit de concevoir des chaînes logistiques ou des réseaux de distribution pour différentes applications de la recherche opérationnelle, vue leur complexité et leur enjeux économiques, sociaux et environnementaux, d'où le besoin de nouveaux modèles permettant d'approcher de plus en plus de la réalité.

Dans ce contexte, nous avons étudié deux problématiques liées à la localisation des sites :

1. La modélisation d'un problème de localisation des sites stochastique avec gestion des indisponibilités des centres de distribution (CDs), pour lequel deux approches permettant la minimisation des coûts de gestion des indisponibilités des CDs sont proposées. Un modèle mathématique a été développé et les résultats obtenus ont montrés que l'approche intégrée qui consiste à considérer la gestion des indisponibilités des sites et la conception de la chaîne logistique simultanément donne de meilleurs résultats en terme de coût de gestion des indisponibilités par rapport à une approche non-intégrée qui traite les indisponibilités après détermination de la structure de la chaîne logistique.
2. La modélisation d'un problème de localisation des sites stochastiques avec gestion des indisponibilités des centres de distribution (CDs) dans un contexte dynamique et avec utilisation des sites mobiles. Un modèle mathématique non-linéaire en entiers mixtes a été développé et résolu en utilisant un algorithme NSGA-II et la méthode TOPSIS pour la sélection de la meilleure solution du front Pareto. Les résultats obtenus ont démontré que ce modèle est plus performant qu'un modèle classique utilisant des sites immobiles.

Ce travail nous a permis de définir plusieurs directions de recherche futures, l'une des directions consiste à considérer les capacités des sites avec possibilité de transfert de capacité des sites indisponibles aux sites opérationnelles.

Nous pouvons aussi étendre le modèle basé sur les sites mobiles proposé au cas multimodal où divers modes de transport sont utilisés avec l'existence de plusieurs liaisons de transport et la possibilité d'indisponibilité des liens de transport.

D'autres objectifs peuvent également être considérés pour la deuxième problématique comme la maximisation de la satisfaction des clients et la minimisation des pénalités dus aux demandes non satisfaites. Une autre métaheuristique multiobjectif basée sur le recuit simulé peut être utilisée pour la résolution du problème multiobjectif considéré dans cette thèse afin de voir les performances des méthodes multicritères dans la résolution de la problématique étudiée.

Nous tenterons d'appliquer ce modèle sur un réseau de distribution de localisation des sites mobiles de don de sangs au niveau de la wilaya de Tlemcen dans un futur proche, afin de réorganiser le réseau et offrir la possibilité aux donneurs d'augmenter leur don de sang et par conséquent augmenter les quantités de sang collectées. Le modèle proposé peut être utilisé dans nombreux cas d'applications, notamment la localisation des bureaux de poste mobiles qui commencent à être utilisés en Algérie et la localisation des centres de soins d'urgence mobiles.

Références bibliographiques

- Afshari, H., Sharafi, M., ElMekkawy, T., & Peng, Q. (2014). Optimizing multi-objective dynamic facility location decisions within green distribution network design, *Procedia CIRP*, 17, 675–679.
- Ahmadian, S., Friggstad, Z., & Swamy, C. (2013, January). Local-search based approximation algorithms for mobile facility location problems. In *Proceedings of the twenty-fourth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms* (pp. 1607-1621). Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Aikens, C. H. (1985). Facility location models for distribution planning. *European journal of operational research*, 22(3), 263-279.
- Al-Sultan, K. S., & Al-Fawzan, M. A. (1999). A tabu search approach to the uncapacitated facility location problem. *Annals of Operations Research*, 86, 91-103.
- Arabani, A. B., & Farahani, R. Z. (2012). Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 408-420.
- Armon, A., Gamzu, I., & Segev, D. (2014). Mobile facility location: combinatorial filtering via weighted occupancy. *Journal of Combinatorial Optimization*, 28(2), 358-375.
- Ballou, R. H. (1968). Dynamic warehouse location analysis. *Journal of Marketing Research*, 5(3), 271-276.
- Banasik, A., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., & van der Vorst, J. G. (2018). Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30(3), 366-396.
- Bashiri, M., & Badri, H. (2010). A dynamic model for expansion planning of multi echelon multi commodity supply chain. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(1), 85-93.
- Bashiri, M., Rezanezhad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Hasanzadeh, H. (2018). Mathematical modeling for a p-mobile hub location problem in a dynamic environment by a genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 54, 151-169.
- Bischoff, M., & Daechert, K. (2009). Allocation search methods for a generalized class of location–allocation problems. *European Journal of Operational Research*, 192(3), 793-807.

- BÜYÜKSAATÇI, S., & ESNAF, Ş. (2014). Carbon Emission Based Optimisation Approach for the Facility Location Problem. *Turkish Online Journal of Science & Technology*, 4(1), 9-20.
- Canel, C., & Khumawala, B. M. (2001). International facilities location: a heuristic procedure for the dynamic uncapacitated problem. *International Journal of Production Research*, 39(17), 3975-4000.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., & Paquet, M. (2011). Designing supply chains with sustainability considerations. *Production Planning & Control*, 22(8), 727-741.
- Chardaire, P., Sutter, A., & Costa, M. C. (1996). Solving the dynamic facility location problem. *Networks: An International Journal*, 28(2), 117-124.
- Chen, L., Olhager, J., & Tang, O. (2014). Manufacturing facility location and sustainability: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 149, 154-163.
- Chen, Q., Li, X., & Ouyang, Y. (2011). Joint inventory-location problem under the risk of probabilistic facility disruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(7), 991-1003.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2003). What will drive the enterprise software shakeout?. *Supply Chain Management Review*, 7(1), 50-56.
- Church, R., & ReVelle, C. (1974, December). The maximal covering location problem. In *Papers of the regional science association* (Vol. 32, No. 1, pp. 101-118). Springer-Verlag.
- Coello Coello, C. A. (1998). An Update Survey of GA-Based Multiobjective Optimization Techniques. Xalapa, Veracruz, Laboratorio Nacional de Informática Avanzada (LANIA): 45. Technical Report Lania-RD-98-08.
- Contreras, I., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2011). The dynamic uncapacitated hub location problem. *Transportation Science*, 45(1), 18-32.
- Cornuéjols, G., Nemhauser, G., & Wolsey, L. (1983). *The Uncapacitated Facility Location Problem*. Cornell University Operations Research and Industrial Engineering.
- Current, J., Ratick, S., & ReVelle, C. (1998). Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: A decision analysis approach. *European Journal of Operational Research*, 110(3), 597-609.
- da Gama, F. S., & Captivo, M. E. (1998). A heuristic approach for the discrete dynamic location problem. *Location science*, 6(1-4), 211-223.
- Daskin, M. S. (2008). What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics (NRL)*, 55(4), 283-294.

- Daskin, M. S., Coullard, C. R., & Shen, Z. J. M. (2002). An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results. *Annals of operations research*, 110(1-4), 83-106.
- Daskin, M. S. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Application*. John Wiley, New York.
- Daskin, M. S., Hopp, W. J., & Medina, B. (1992). Forecast horizons and dynamic facility location planning. *Annals of Operations Research*, 40(1), 125-151.
- Deb, K. (1999). An overview of multi-objective evolutionary algorithms. *Journée JET, Copie de Transparents*.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics—An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671-679.
- Demaine, E. D., Hajiaghayi, M., Mahini, H., Sayedi-Roshkhar, A. S., Oveisgharan, S., & Zadimoghaddam, M. (2009). Minimizing movement. *ACM Transactions on Algorithms (TALG)*, 5(3), 1-30.
- Dias, J., Captivo, M. E., & Clímaco, J. (2007). Dynamic multi-level capacitated and uncapacitated location problems: an approach using primal-dual heuristics. *Operational Research*, 7(3), 345-379.
- Dias, J., Captivo, M. E., & Clímaco, J. (2006). Capacitated dynamic location problems with opening, closure and reopening of facilities. *IMA Journal of Management Mathematics*, 17(4), 317-348.
- Dias, J., Captivo, M. E., & Clímaco, J. (2007). Dynamic location problems with discrete expansion and reduction sizes of available capacities. *Investigação Operacional*, 27(2), 107-130.
- Dias, J., Captivo, M. E., & Clímaco, J. (2008). A memetic algorithm for multi-objective dynamic location problems. *Journal of Global Optimization*, 42(2), 221-253.
- Drezner, Z. (1995). Dynamic facility location: The progressive p-median problem. *Location Science*, 3(1), 1-7.
- Drezner, Z. (Ed.). (1995). *Facility location: a survey of applications and methods*. Springer Verlag.
- Duong, O., Savy, M., Theys, J., & Watcher, S. (2008). Prospective fret 2030. *MEEDDAT*, Paris, 208.
- Elhedhli, S., & Merrick, R. (2012). Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(5), 370-379.

Erlenkotter, D. (1981). A comparative study of approaches to dynamic location problems. *European Journal of Operational Research*, 6(2), 133-143.

Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32.

Farahani, R. Z., Drezner, Z., & Asgari, N. (2009). Single facility location and relocation problem with time dependent weights and discrete planning horizon. *Annals of Operations Research*, 167(1), 353-368.

Farahani, R. Z., Rashidi Bajgan, H., Fahimnia, B., & Kaviani, M. (2015). Location-inventory problem in supply chains: a modelling review. *International Journal of Production Research*, 53(12), 3769-3788.

Farahani, R. Z., SteadieSeifi, M., & Asgari, N. (2010). Multiple criteria facility location problems: A survey. *Applied Mathematical Modelling*, 34(7), 1689-1709.

Fender, M., & Pimor, Y. (2016). *Logistique & supply chain*. Dunod.

GALVAO, R. D. (1993). The use of Lagrangean relaxation in the solution of uncapacitated facility location problems. *Computers & Operations Research*.

Garcia-Herreros, P., Wassick, J. M., & Grossmann, I. E. (2014). Design of resilient supply chains with risk of facility disruptions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(44), 17240-17251.

Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). A guide to the theory of NP-completeness, A Series of Books in the Mathematical Sciences. *Computers and Intractability*, WH Freeman and Co, San Francisco, CA.

Gebennini, E., Gamberini, R., & Manzini, R. (2009). An integrated production–distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization. *International Journal of Production Economics*, 122(1), 286-304.

Glover, F. (1987). Tabu search methods in artificial intelligence and operations research. *ORSA Artificial Intelligence*, 1(2), 6.

Goldberg, D. E., & Holland, J.H. (1989). *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search. Optimization, and Machine Learning*.

Güden, H., & Süral, H. (2014). Locating mobile facilities in railway construction management. *Omega*, 45, 71-79.

Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research*, 12(3), 450-459.

- Halper, R., Raghavan, S., & Sahin, M. (2015). Local search heuristics for the mobile facility location problem. *Computers & Operations Research*, 62, 210-223.
- Hammami, R., Nouria, I., & Frein, Y. (2015). Carbon emissions in a multi-echelon production-inventory model with lead time constraints. *International Journal of Production Economics*, 164, 292-307.
- Harris, I., Mumford, C., & Naim, M. (2009, May). The multi-objective uncapacitated facility location problem for green logistics. In *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 2732-2739). IEEE.
- Hinojosa, Y., Kalcsics, J., Nickel, S., Puerto, J., & Velten, S. (2008). Dynamic supply chain design with inventory. *Computers & Operations Research*, 35(2), 373-391.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 560 University of Michigan Press. Ann Arbor, MI, 561.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: methods and applications*, Springer, New York.
- Jakob, K. R. A. R., & Pruzan, P. M. (1983). The simple plant location problem: survey and synthesis. *Eur J Oper Res*, 12, 36-81.
- Jalali, S., Pasandideh, S. H. R., & Chambari, A. (2017). A joint inventory reliable capacitated facility location problem using a continuum approximation. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 12(2), 104-110.
- Jena, S. D., Cordeau, J. F., & Gendron, B. (2016). Solving a dynamic facility location problem with partial closing and reopening. *Computers & Operations Research*, 67, 143-154.
- Jones, D. F., Mirrazavi, S. K., & Tamiz, M. (2002). Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art. *European journal of operational research*, 137(1), 1-9.
- Kang, K., Wang, X., & Ma, Y. (2017). A collection-distribution center location and allocation optimization model in closed-loop supply chain for chinese beer industry. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1-15.
- Kariv, O., & Hakimi, S. L. (1979). An algorithmic approach to network location problems. I: The p-centers. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 37(3), 513-538.
- Kelly, D. L., & Maruchek, A. S. (1984). Planning horizon results for the dynamic warehouse location problem. *Journal of Operations Management*, 4(3), 279-294.
- Khumawala, B. M., & Whybark, D. C. (1976). Solving the dynamic warehouse location problem. *International Journal of Physical Distribution*, 6(5), 238-251.

- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.
- Klibi, W., & Martel, A. (2012). Modeling approaches for the design of resilient supply networks under disruptions. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 882-898.
- Klose, A., & Drexl, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European journal of operational research*, 162(1), 4-29.
- Krishnapriya, S., & Rahiman, M. P. K. (2016). A survey on non dominated sorting genetic algorithm II and its application, *International journal of research in computer applications and robotics*, 4, 7-11.
- Lambert, D. M., Cooper, M. C., & Pagh, J. D. (1998). Supply chain management: implementation issues and research opportunities. *The international journal of logistics management*, 9(2), 1-20.
- Landete, M. (2017). The mobile facility location problem. *proceedings of the VIII international workshop on locational analysis and related problems*.
- Le Moigne, R. (2017). *Supply chain management - 2e edition Achat, production, logistique, transport, vente*. Dunod.
- Li, F., Liu, T., Zhang, H., Cao, R., Ding, W., & Fasano, J. P. (2008, October). Distribution center location for green supply chain. In *2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (Vol. 2, pp. 2951-2956)*. IEEE.
- Li, Q., Zeng, B., & Savachkin, A. (2013). Reliable facility location design under disruptions. *Computers & Operations Research*, 40(4), 901-909.
- Li, X., & Ouyang, Y. (2010). A continuum approximation approach to reliable facility location design under correlated probabilistic disruptions. *Transportation research part B: methodological*, 44(4), 535-548.
- Lim, M. K., Bassamboo, A., Chopra, S., & Daskin, M. S. (2013). Facility location decisions with random disruptions and imperfect estimation. *Manufacturing & Service Operations Management*, 15(2), 239-249.
- Lim, M., Daskin, M. S., Bassamboo, A., & Chopra, S. (2010). A facility reliability problem: Formulation, properties, and algorithm. *Naval Research Logistics (NRL)*, 57(1), 58-70.
- Lu, J., & Ruan, D. (2007). *Multi-objective group decision making: methods, software and applications with fuzzy set techniques (Vol. 6)*. Imperial College Press.

Maliki, F., Souier, M., Dahane, M., & Sari, Z. (2017). The use of metaheuristics as the resolution for stochastic supply chain design problem: A comparison study. *International Journal of Supply and Operations Management*, 4(3), 193-201.

Manne, A. S. (1964). Plant location under economies-of-scale—decentralization and computation. *Management Science*, 11(2), 213-235.

Manupati, V. K., Jedidah, S. J., Gupta, S., Bhandari, A., & Ramkumar, M. (2019). Optimization of a multi-echelon sustainable production-distribution supply chain system with lead time consideration under carbon emission policies. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 1312-1323.

Manzini, R., & Gebennini, E. (2008). Optimization models for the dynamic facility location and allocation problem. *International Journal of Production Research*, 46(8), 2061-2086.

Martí, J. M. C., Tancrez, J. S., & Seifert, R. W. (2015). Carbon footprint and responsiveness trade-offs in supply chain network design. *International Journal of Production Economics*, 166, 129-142.

Marufuzzaman, M., Gedik, R., & Roni, M. S. (2016). A Benders based rolling horizon algorithm for a dynamic facility location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 462-469.

Meixell, M. J., & Gargeya, V. B. (2005). Global supply chain design: A literature review and critique. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(6), 531-550.

Melachrinoudis, E., & Min, H. (2000). The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility: A multiple objective approach. *European Journal of Operational Research*, 123(1), 1-15.

Melachrinoudis, E., Min, H., & Wu, X. (1995). A multiobjective model for the dynamic location of landfills. *Location Science*, 3(3), 143-166.

Melo, M. T., Nickel, S., & Da Gama, F. S. (2006). Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operations Research*, 33(1), 181-208.

Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management—A review. *European journal of operational research*, 196(2), 401-412.

Min, H., & Melachrinoudis, E. (1999). The relocation of a hybrid manufacturing/distribution facility from supply chain perspectives: a case study. *Omega*, 27(1), 75-85.

Nozick, L. K., & Turnquist, M. A. (1998). Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 34(3), 173-186.

- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European journal of operational research*, 111(3), 423-447.
- Paksoy, T., Özceylan, E., & Weber, G. W. (2010, June). A multi objective model for optimization of a green supply chain network. In *AIP conference proceedings* (Vol. 1239, No. 1, pp. 311-320). American Institute of Physics.
- Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., & Asadi, K. (2015). Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA. *Information Sciences*, 292, 57-74.
- Peng, Y., Ablanedo-Rosas, J. H., & Fu, P. (2016). A multiperiod supply chain network design considering carbon emissions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, , 1–11
- Peng, P., Snyder, L. V., Lim, A., & Liu, Z. (2011). Reliable logistics networks design with facility disruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1190-1211.
- Pimor, Y., & Fender, M. (2004). *Logistique: Production. Distribution & Soutien*.
- Qiu, J., & Sharkey, T. C. (2013). Integrated dynamic single-facility location and inventory planning problems. *IIE Transactions*, 45(8), 883-895.
- Raghavan, S., Sahin, M., & Salman, F. S. (2019). The capacitated mobile facility location problem. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 507-520.
- ReVelle, C. S., & Eiselt, H. A. (2005). Location analysis: A synthesis and survey. *European journal of operational research*, 165(1), 1-19.
- Revelle, C. S., Eiselt, H. A., & Daskin, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European journal of operational research*, 184(3), 817-848.
- Rodrigues, A. M., Bowersox, D. J., & Calantone, R. J. (2005). Estimation of global and national logistics expenditures: 2002 data update. *Journal of business logistics*, 26(2), 1-16.
- Roodman, G. M., & Schwarz, L. B. (1975). Optimal and heuristic facility phase-out strategies. *AIIE transactions*, 7(2), 177-184.
- Sait, S. M., & Youssef, H. (1999). *Iterative computer algorithms: and their applications in engineering*.
- Sheffi, Y. (2005). *The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage*. MIT Press Books, 1.
- Shen, Z. J. M., Coullard, C., & Daskin, M. S. (2003). A joint location-inventory model. *Transportation science*, 37(1), 40-55.

- Shen, Z. J. M., Zhan, R. L., & Zhang, J. (2011). The reliable facility location problem: Formulations, heuristics, and approximation algorithms. *INFORMS Journal on Computing*, 23(3), 470-482.
- Shooman, M. L. (2002). *Reliability of computer systems and networks: fault tolerance, analysis, and design*. John Wiley & Sons.
- Simchi-Levi, D., Simchi-Levi, E., & Watson, M. (2004). Tactical planning for reinventing the supply chain. In *The practice of supply chain management: Where Theory and Application Converge* (pp. 13-30). Springer, Boston, MA.
- Snyder, L. V., & Daskin, M. S. (2005). Reliability models for facility location: the expected failure cost case. *Transportation Science*, 39(3), 400-416.
- Snyder, L. V., Scaparra, M. P., Daskin, M. S., & Church, R. L. (2006). Planning for disruptions in supply chain networks. In *Models, methods, and applications for innovative decision making* (pp. 234-257). INFORMS.
- Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248.
- Srivastava, S. K., Amula, A., & Ghagare, P. (2016). Service facility relocation decision: a case study. *Facilities*, 34(9/10), 595–610.
- Souier, M., Dahane, M., & Maliki, F. (2019). An NSGA-II-based multiobjective approach for real-time routing selection in a flexible manufacturing system under uncertainty and reliability constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9-12), 2813-2829.
- Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, 662-673.
- Tanonkou, G. A., Benyoucef, L., Bisdorff, R., & Xie, X. (2005, August). Solving a stochastic inventory-location problem using Lagrangian relaxation approach. In *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2005. (pp. 279-284). IEEE.
- Tanonkou, G. A., Benyoucef, L., & Xie, X. (2008). Design of stochastic distribution networks using Lagrangian relaxation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 5(4), 597-608.
- Tanonkou, G. A. (2007). *Une approche par relaxation lagrangienne pour l'optimisation d'un réseau de distribution: modèles stochastiques et fiables* (Doctoral dissertation, Université Paul Verlaine-Metz).
- Terouhid, S. A., Ries, R., & Fard, M. M. (2012). Towards sustainable facility location—a literature review. *Journal of Sustainable Development*, 5(7), 18-34.

- Thanh, P. N., Bostel, N., & Péton, O. (2008). A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International journal of production economics*, 113(2), 678-693.
- Torres-Soto, J. E., & Üster, H. (2011). Dynamic-demand capacitated facility location problems with and without relocation. *International Journal of Production Research*, 49(13), 3979-4005.
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations research*, 19(6), 1363-1373.
- Trépanier, M. P., & Coelho, L. C. (2017). Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre. CIRRELT, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport= Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation.
- Van Roy, T. J., & Erlenkotter, D. (1982). A dual-based procedure for dynamic facility location. *Management Science*, 28(10), 1091-1105.
- Verter, V. (2011). Uncapacitated and capacitated facility location problems. In *Foundations of location analysis* (pp. 25-37). Springer, Boston, MA.
- Vélazquez-Martínez, J. C., Fransoo, J. C., Blanco, E. E., & Mora-Vargas, J. (2014). Transportation cost and CO2 emissions in location decision models. BETA publicatie: working papers, 451.
- Weber, A. (1957). *Über den Standort der Industrien*. Tübingen (JCB Mohr/Paul Siebeck). 1922. English translation by CJ Friedrich, 1929: *Alfred Weber's Theory of the Location of Industries*. University of Chicago Press, IL.
- Wesolowsky, G. O. (1973). Dynamic facility location. *Management Science*, 19(11), 1241-1248.
- Wesolowsky, G. O., & Truscott, W. G. (1975). The multiperiod location-allocation problem with relocation of facilities. *Management Science*, 22(1), 57-65.
- Xifeng, T., Ji, Z., & Peng, X. (2013). A multi-objective optimization model for sustainable logistics facility location. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 22, 45-48.
- Zhen, L. (2017). A bi-objective model on multiperiod green supply chain network design. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1-14.
- Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1195-1209.
- Zhiyong, T., Lingyu, H., & Guicheng, S. (2014). Carbon footprint and order quantity in logistics. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 7(2), 475-490.

Liste des articles publiés dans le cadre de la thèse

Publications en revues internationales :

F. MALIKI, M. A. BRAHAMI, M. DAHANE, Z. SARI, (2016). « Conception et gestion des indisponibilités des sites dans les chaînes logistiques ». Journal européen des systèmes automatisés, Vol. 49 (4-5), pp. 471-485.

F. MALIKI, M. A. BRAHAMI, M. DAHANE, Z. SARI, (2016). « A Supply Chain Design Problem, Integrated Facility Unavailability Management ». International Journal of Supply and Operations Management, Vol. 3 (2), pp. 1253-1266.

F. MALIKI, M. SOUIER, M. DAHANE, Z. SARI, (2017). « The Use of Metaheuristics as the Resolution for Stochastic Supply Chain Design Problem: A Comparison Study ». International Journal of Supply and Operations Management, Vol. 4 (3), pp. 193-201.

Communications Internationales avec proceedings édités:

F. MALIKI, L. BENYOUCEF et Z. SARI, « Une approche d'optimisation basée sur la simulation pour la conception d'un réseau de distribution stochastique multi fournisseurs », International Conference on Modeling and Simulation (MOSIM'10), Hammamet, Tunisie, 10-12 Mai 2010.

F. MALIKI, L. BENYOUCEF and Z. SARI, « Sensitivity Analysis For a Stochastic Multi modal Location-allocation Integrated Suppliers' selection Problem », International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2011), Metz, France, May 25 – 27, 2011

F. MALIKI, Z. SARI and M. SOUIER, « Resolution of a stochastic supply chain design problem by metaheuristic », the first IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Hammamet, Tunisia, May 6-8, 2013.

F. MALIKI, M. A. BRAHAMI, M. DAHANE and Z. SARI, « A location-allocation problem design with unavailabilities management », CIE 44 & IMSS'14, Istanbul, Turkey, 14-16 October 2014.

F. MALIKI, « A stochastic supply chain design problem resolution by metaheuristics –A comparison study- », 12nd International Industrial Engineering Conference (IIEC 2016), Tehran, Iran, 25-26 January 2016.

Communications Internationales avec comités scientifiques :

F. MALIKI, L. BENYOUCEF et Z. SARI, « Une approche hybride intelligente pour la localisation des centres de distribution et le choix des fournisseurs avec répartition des ordres d'approvisionnement ». International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing (ICIEM'10), Batna, Algérie, 09-10 Mai 2010.

F. MALIKI et Z. SARI, « Etudes comparatives des politiques de gestion de stock lors de la conception des chaînes logistiques ». International Conference on Modeling and Simulation (MOSIM'12), Bordeaux, France, 06-08 Juin 2012.

F. MALIKI et Z. SARI, « Une approche d'optimisation basée sur la simulation pour un problème de localisation et de sélection des fournisseurs multi produits avec délai de livraison aléatoire ». ROADEF 2013, Troyes, France, 13-15 Février 2013.

F. MALIKI, M. BRAHAMI et M. DAHANE, « Optimisation du problème de localisation et sélection des fournisseurs sous contrainte de maintenance ». CPI 2013, Tlemcen, Algérie, 21–23 octobre 2013.

F. MALIKI, M. BRAHAMI, M. DAHANE and Z. SARI, « Supply chain design problem with unavailabilities management ». The 1st International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID 2015), Djelfa, Algeria, 29-30 March 2015.

F. MALIKI, M. BRAHAMI, M. DAHANE et Z. SARI, «Gestion des indisponibilités des sites intégrée à un problème de conception de chaîne logistique ». Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées (CPI 2015), Tanger, Maroc, 2-4 Décembre 2015.

Résumé

Dans un contexte de forte concurrence et d'évolution économique, les industriels sont poussés à améliorer leur compétitivité et à développer d'autres stratégies consistant à localiser des sites permettant de se rapprocher des marchés et de construire des réseaux commerciaux afin de rester dans une logique de développement continu.

Cette thèse traite un problème de localisation stochastique des sites avec gestion des indisponibilités des sites. L'objectif est de proposer des approches permettant une gestion efficace de ces indisponibilités. Deux problématiques liées à la théorie de la localisation sont considérées: la première consiste à gérer les indisponibilités par une réallocation optimale des clients aux sites opérationnels en utilisant un algorithme génétique (AG) ce qui permet de minimiser les coûts engendrés par la gestion des indisponibilités. La deuxième consiste à utiliser des sites mobiles dans un environnement dynamique où chaque site peut être fermé, ouvert et réouvert plusieurs fois pendant l'horizon de planification. Une approche multiobjectif basée sur l'algorithme NSGA-II est proposée afin de minimiser les coûts logistiques et la quantité des émissions CO2. Les résultats obtenus pour les deux problématiques sont présentés et analysés montrant l'efficacité des approches proposées.

Mots clés : localisation des sites, gestion des indisponibilités, réallocation, sites mobiles, algorithmes génétiques, émissions CO2.

Abstract

In a strong competition and economic development context, manufacturers are pushed to improve their competitiveness and develop other strategies by locating facilities allowing them to get closer to the markets and to build commercial networks in order to remain in a continuous development policy.

This thesis deals with a stochastic facility location problem with unavailability management where the aim is to propose approaches allowing an effective management of this unavailability. Two problems related to the location theory are considered: the first consists in managing the unavailability by an optimal reallocation of customers to the operational facilities using a genetic algorithm (GA) which allows minimizing the costs generated by the unavailability management. The second is to use mobile facilities in a dynamic environment where each facility can be closed, opened and reopened several times during the planning horizon. A multi-objective approach based on NSGA-II algorithm is proposed in order to minimize the logistics costs and the quantity of CO2 emissions. The obtained results for both problems are presented and analyzed showing the effectiveness of the proposed approaches.

Key words: facility location, unavailability management, reallocation, mobiles facilities, genetic algorithms, CO2 emissions.

ملخص

في سياق المنافسة القوية والتنمية الاقتصادية، يُدفع المصنّعون إلى تحسين قدرتهم التنافسية وتطوير إستراتيجيات أخرى تتألف من تحديد مواقع تتيح لهم الاقتراب من الأسواق وبناء شبكات تجارية من أجل البقاء في منطقتهم التطوير المستمر.

تتناول هذه الأطروحة مشكلة عشوائية لتحديد المواقع مع تسيير عدم توفر المواقع وذلك من خلال إقتراح طرق تسمح بإدارة فعالة لعدم توفر المواقع. يتم النظر في إشكالتين تتعلقان بنظرية تحديد الموقع: الأولى تتمثل في إدارة عدم التوفر من خلال إعادة توزيع زبائن على نحو مثالي على المواقع المتاحة باستخدام خوارزمية جينية التي تسمح بتقليل التكاليف الناتجة عن إدارة عدم التوفر والثاني هو استخدام مواقع متنقلة في بيئة ديناميكية حيث يمكن إغلاق كل موقع وفتحه وإعادة فتحه عدة مرات خلال أفق التخطيط. يُقترح نهج متعدد الأهداف قائم على خوارزمية جينية من أجل تقليل التكاليف اللوجستية وكمية انبعاث ثاني أكسيد الكربون. يتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها للمشكلتين وتحليلها لإظهار فعالية النهج المقترح.

الكلمات المفتاحية: تحديد المواقع، تسيير عدم التوفر، إعادة التوزيع، مواقع متنقلة، الخوارزميات الجينية، انبعاثات ثاني أكسيد الكربون