

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



GE HealthCare

Département Génie Industriel

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel option :
Management Industriel

Optimisation du Wing to Wing Process à travers la conception de la Closed
Loop Supply Chain des équipements médicaux.

Application : GE Healthcare Algérie.

BENHAMMOUCHE Hocine & HAFED Ines

Sous la direction de **Dr.ZOUAGHI Iskander**

Présenté et soutenu publiquement le (25/06/2025)

Composition du jury :

Président :	Dr. ABBACI Ayoub	MCA	ENP
Examinatrice :	Dr. BELJOUDI Samia	MCA	ENP
Promoteur :	Dr. ZOUAGHI Iskander	MCA	ENP
Promoteur :	M. HAZI Mohamed	Logistics Manager	GE Healthcare
Invité :	M. IZEM Samy	Country Manager	GE Healthcare

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



GE HealthCare

Département Génie Industriel

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel option :
Management Industriel

Optimisation du Wing to Wing Process à travers la conception de la Closed
Loop Supply Chain des équipements médicaux.

Application : GE Healthcare Algérie.

BENHAMMOUCHE Hocine & HAFED Ines

Sous la direction de **Dr.ZOUAGHI Iskander**

Présenté et soutenu publiquement le (25/06/2025)

Composition du jury :

Président :	Dr. ABBACI Ayoub	MCA	ENP
Examinatrice :	Dr. BELJOUDI Samia	MCA	ENP
Promoteur :	Dr. ZOUAGHI Iskander	MCA	ENP
Promoteur :	M. HAZI Mohamed	Logistics Manager	GE Healthcare
Invité :	M. IZEM Samy	Country Manager	GE Healthcare

ملخص

يركز هذا العمل على تحسين سلسلة الإمداد الخاصة بشركة "جي إي للرعاية الصحية" في الجزائر، باعتبارها من الشركات الرائدة في مجال توزيع التجهيزات الطبية. وبالنظر إلى القيود التي يفرضها النموذج المركزي المعتمد حاليًا، خاصة من حيث التكاليف، وأجال التسليم، والبصمة الكربونية، يهدف هذا المشروع إلى تطوير حل لامركزي ومستدام يستند إلى مبادئ سلسلة الإمداد الدائرية.

تمثلت المرحلة الأولى في إجراء تقسيم جغرافي للعملاء اعتمادًا على خوارزمية التجميع، مما أتاح تحديد مناطق تغطية متجانسة. واستنادًا إلى هذه النتائج، تم استخدام نماذج تحديد المواقع وتخصيص الموارد من أجل اختيار المواقع المثلى لإنشاء مستودعات جديدة. تلا ذلك بناء نموذج لمسألة تخطيط مسارات المركبات الصديقة للبيئة، بهدف تحسين تدفقات التوزيع مع مراعاة قيود السعة، ونوع المنتجات، والأثر البيئي. وفي المرحلة الأخيرة، تم اعتماد منهجية التحليل الهرمي للمفاضلة بين عدة سيناريوهات لوجستية وفق معايير اقتصادية وتشغيلية وبيئية.

تهدف هذه المنهجية المتكاملة إلى تعزيز مرونة شبكة التوزيع لدى الشركة، وتحسين جودة خدمات ما بعد البيع، مع إدماج منطوق دائري يركز على استرجاع وإعادة استخدام قطع الغيار. وقد بينت النتائج المتوصل إليها وجود إمكانية كبيرة لتقليل التكاليف، وتقليل آجال التسليم، وخفض الانبعاثات الكربونية، مما يمهد الطريق نحو تحول لوجستي مستدام.

الكلمات المفتاحية: الإمداد، السلسلة الدائرية، التجميع العنقودي، تحديد المواقع، تخطيط المسارات البيئية، التحليل الهرمي، التجهيزات الطبية.

Abstract

This work focuses on optimising the supply chain of GE Healthcare Algeria, a key player in the distribution of medical equipment. In response to the limitations of the current centralised logistics model—particularly in terms of cost, delivery times, and carbon footprint—this project aims to design a decentralised and sustainable solution based on the principles of the Closed Loop Supply Chain. The first phase involved the geographical segmentation of clients using the K-means algorithm, enabling the definition of coherent coverage zones. Based on this segmentation, location-allocation models were applied to determine the optimal locations for new warehouses. A Green Vehicle Routing Problem (VRP) was then formulated to optimise distribution flows, incorporating constraints related to capacity, product types, and environmental impact. Finally, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to compare various logistics scenarios based on economic, operational, and environmental criteria.

These approaches aim to enhance the agility of GE Healthcare Algeria's logistics network, improve after-sales responsiveness, and integrate a circular approach to spare part recovery and reuse. The results demonstrate strong potential for reducing costs, delivery times, and CO emissions, paving the way for a sustainable transformation of the logistics model..

Keywords : Logistics, Closed Loop Supply Chain, K-means, Location-Allocation, Green VRP, AHP, Medical Equipment.

Résumé

Ce travail porte sur l'optimisation de la chaîne logistique de GE Healthcare Algérie, acteur majeur dans la distribution d'équipements médicaux. Face aux limites du modèle logistique centralisé en vigueur — notamment en termes de coûts, de délais et d'empreinte carbone — ce projet a pour objectif de concevoir une solution décentralisée et durable, fondée sur les principes de la Closed Loop Supply Chain. La première phase a consisté en une segmentation géographique des clients à l'aide de l'algorithme K-means, permettant de définir des zones de couverture cohérentes. Sur cette base, des modèles de localisation-allocation ont été mobilisés afin d'identifier les emplacements optimaux des entrepôts. Par la suite, un Green Vehicle Routing Problem (VRP) a été formulé pour optimiser les flux de distribution, en intégrant des contraintes de capacité, de typologie de produits et d'impact environnemental. Enfin, la méthode AHP a été utilisée pour comparer plusieurs scénarios logistiques, selon des critères économiques, opérationnels et écologiques. Ces approches visent à renforcer l'agilité du réseau logistique de GE Healthcare Algérie, tout en améliorant la réactivité du service après-vente et en intégrant une logique circulaire de récupération et réutilisation des pièces de rechange. Les résultats obtenus démontrent un fort potentiel de réduction des coûts, des délais de livraison et des émissions de CO₂, ouvrant la voie à une transformation durable du modèle logistique.

Mots clés : Logistique, Closed Loop Supply Chain, K-means, Localisation-Allocation, Green VRP, AHP, Équipements médicaux..

Remerciements

En préambule à ce mémoire, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide et ont contribué à l'élaboration de ce projet de fin d'études.

Nos mots de reconnaissance vont tout particulièrement à notre encadrant, M. Iskander Zouaghi, pour sa patience, ses conseils avisés, son encadrement et son soutien précieux non seulement durant toute la période de stage, mais aussi tout au long de notre parcours au sein du département.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble de l'équipe pédagogique du Département Génie Industriel de l'E.N.P., pour nous avoir formés, éclairés et accompagnés tout au long de ces trois années d'études spécialisées. Votre enseignement a été essentiel pour notre formation académique et professionnelle.

Un remerciement tout particulier s'adresse à M. IZEM Samy et M. HAZI Mohamed, nos promoteurs chez GE Healthcare, pour leur soutien continu, leurs conseils avisés et leurs enseignements qui ont enrichi notre expérience de stage de manière significative.

Un sincère merci aux membres du jury pour avoir pris le temps d'évaluer notre travail avec attention et rigueur.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée affectueuse pour nos familles, qui ont été présents et nous ont encouragés depuis notre enfance. Vous êtes les piliers fondateurs de ce que nous sommes aujourd'hui.

Pour terminer, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers l'École Nationale Polytechnique, cette école qui nous a vus grandir et qui a été pour nous une maison accueillante pendant de longues années.

Ines et Hocine.

Dédicaces

À la lumière de ma vie, mes parents :
Sans vous, je ne serais pas la personne que je suis aujourd'hui. Merci pour votre soutien,
votre accompagnement et pour avoir trouvé les bons mots pour me motiver quand je pensais abandonner.
Je vous aime énormément.

À ma tante Dalila, celle que je considère comme ma deuxième maman, toujours présente pour moi.

À mon frère Rayan et à ma sœur Lydia, qui m'ont toujours soutenue malgré tout.

À mes deux grands-mères, Ouardia et Nedjima, et à mon grand-père Saïd.

À mon grand-père Mohand, que j'aurais tant voulu connaître.

À tous les membres de ma famille présents depuis le début, à toutes mes tantes et tous mes oncles,
à tous mes cousins et toutes mes cousines.

À mes amies Sandra, Lyliya, Chaïma, Selma et Sarah, qui ont toujours été là, prêtes à m'écouter,
à me soutenir et à m'offrir leur bonne humeur. Vous êtes en or.

À mes amis les Indus : Amélia, Nazim, Yasmine, Liza, Souha et Dassine. Merci pour tous ces moments ;
sans vous, les trois années de spécialité n'auraient pas été les mêmes.

À toute personne ayant contribué de près ou de loin à cet accomplissement.

À mon binôme Hocine : au-delà d'être un binôme, tu es un ami.
Merci à toi pour tes idées, tous ces moments et expériences partagés.

Et enfin...
À moi-même.

Ines.

Dédicaces

Ce travail, je souhaite le dédier.

À mes parents, qui m'ont tant soutenu et accompagné, avec leurs mots apaisants, leur présence constante et surtout leurs sacrifices tout au long de ces années d'études. Merci infiniment à vous deux, car le chemin a été long et sinueux, depuis ces fameuses nuits traumatisantes passées sur la table de la cuisine jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Papa, Maman, merci pour tout votre amour et votre soutien. Que Dieu vous préserve et vous garde parmi nous.

À mes sœurs, qui m'ont tant soutenu et aidé, sur lesquelles je sais que je pourrai toujours compter, peu importe la situation. N'oubliez jamais que vous avez été de précieux prototypes pour mieux me concevoir. Que Dieu vous préserve.

*À toute ma famille : mes grands-parents, mes oncles Djamel, Rachid, Fatah et Manou,
mes tantes Dalila, Samira, Karima et Yasmina.
Et bien sûr, mes cousins Nassim, Didin, Mehdi, Salim, Younes, Raouf et Yacine,
grâce à vous, je connais le sentiment d'avoir des frères.*

Mes cousines Manel, Doudoucha et Nour, merci pour votre affection et votre présence.

À la mémoire de mes proches qui nous ont quittés ces dernières années. Que Dieu leur accorde Son vaste paradis et les enveloppe de Sa miséricorde.

À mes vrais amis Rayane et Moncif, qui ne savent jamais être sérieux, Aimen qui ne fait jamais de passes, Walid éternellement bloqué en 2010 avec ses blagues, Racim fidèle à ses délires qui n'ont aucun sens. Merci à vous pour les fous rires, la complicité et la légèreté.

Aux personnes que j'ai rencontrées grâce à mon cursus d'ingénieur : Omar, Aya, Karine, Raouf, Hani, Lotfi, et bien sûr la plus belle rencontre Yasmime, qui est de loin la personne la plus drôle et la plus « bon délire » que j'ai croisée dans ma vie..

Merci à tout ce groupe d'humain qui existe autour de moi.

*Sans oublier ma binôme, Ines, bien plus qu'une simple collègue de travail, une véritable amie avec qui j'ai traversé bien des épreuves pour mener à bien ce projet.
Merci à toi pour tous ces moments et ces expériences partagés.*

*La vie est une chose bien trop importante pour qu'on en parle sérieusement. —
Oscar Wilde*

Hodine BENHAMMOUCHE

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale	17
1 Etude de l'existant	19
1.1 Introduction	20
1.2 Marché des équipements médicaux et position de GE Healthcare	20
1.2.1 Marché international des équipements médicaux et GE Healthcare au niveau mondial	20
1.2.2 Marché des équipements médicaux et GE Healthcar en Algérie	26
1.3 Supply Chain de GE Healthcare Algérie et Wing to wing process	29
1.3.1 Position de la Supply Chain de GE Healthcare Algérie	29
1.3.2 Supply Chain de GE Healthcare Algérie	30
1.3.3 Le wing to wing process	32
1.4 Diagnostic interne et énoncé de la problématique	34
1.4.1 Modélisation SCOR du W2W	35
1.4.2 Bilan d'exploitation des équipements	42
1.4.3 Analyse des activités de support après livraison	47
1.5 Énoncé de la problématique	53
1.6 Conclusion du chapitre	54
2 Etat de l'art	55
2.1 Introduction	56

2.2	Closed loop Supply Chain dans l'industrie des dispositifs médicaux	56
2.2.1	Logistique et Supplychain management :	56
2.2.2	Durabilité et Closed loop Supply chain	58
2.2.3	Closed Loop Supply Chain dans l'industrie des dispositifs Médicaux	59
2.3	Supply Chain Design durable	62
2.3.1	Supply Chain Design	62
2.3.2	Supply Chain Design Multi echelons	63
2.3.3	Problème de Location-Allocation	64
2.4	Advanced Supply Chain Design	68
2.4.1	Optimisation de tournées de véhicules Durables	69
2.4.2	Segmentation géographique des clients : Algorithme du K-means	74
2.4.3	Choix entre centralisation et décentralisation par l'AHP	76
2.5	Conclusion du chapitre	80
3	Conception de la solution	81
3.1	Introduction	82
3.2	Détermination de la structure optimale du réseau de distribution.	82
3.2.1	Application du K Means pour la segmentation géographiques des clients	83
3.2.2	Application de modèles de location allocation pour la détermination d'un emplacement optimal des entrepôts	85
3.3	La détermination du point de conception optimal	89
3.3.1	Elaboration du modèle mathématique discret Multi-objectif :	89
3.3.2	Résultats du modèle	96
3.4	Optimisation des tournées de véhicules (VRP)	102
3.4.1	Construction des tournées par segment (Imaging, US, PCS)	103
3.4.2	Analyse comparative : centralisation vs décentralisation	105
3.5	Application de la méthode AHP	109
3.6	Perspectives futures	112
3.7	Conclusion du chapitre :	116
	Conclusion générale	117
	Bibliographie	119

Liste des tableaux

1.1	GE Healthcare en quelques chiffres	24
2.1	Exemple de matrice de comparaison par paires.	78
2.2	Échelle de préférences de Saaty((Saaty T. , 1984))	78
2.3	Valeurs de cohérence aléatoire selon Saaty (1984)	79
3.1	Comparaison des méthodes selon le coût logistique et l'émission carbone	101
3.2	Distances totales parcourues par zone et par segment	107
3.3	Émissions carbone par zone et par segment	107
3.4	Coûts de transport (en DA) selon la zone géographique et le segment	107
3.5	Synthèse des distances, coûts et émissions par segment	108
3.6	Comparaison centralisation vs décentralisation sur plusieurs critères	108
3.7	Matrice de comparaison AHP avec les poids associés aux critères	110
3.8	Mesures de cohérence pour la matrice AHP	110
3.9	Tableau des alternatives pondérées par critère	111
3.10	Synthèse des scores finaux des alternatives selon la méthode AHP	111

Table des figures

1.1	Évolution du marché mondial des dispositifs médicaux (Source : Fortune Business Insight, consulté le 13/04/2025)	21
1.2	Marché mondial des dispositifs médicaux (Source Fortune Business insight consulté le 13/04/2025)	21
1.3	Poids économique des géants de l'équipement médical en 2024 (en milliards USD)	22
1.4	Les parts de marchés des Géants de l'équipement médical.(GE Healthcare) . . .	22
1.5	Parts de marché des dispositifs médicaux par segment(Source :Fortune Business insight consulté le 13/04/2025)	23
1.6	Présence de GE Healthcare dans le monde (Document interne)	24
1.7	Chiffre d'affaire GE Healthcare(Document interne)	24
1.8	Illustration D'équipements GE Healthcare par segment(Site internet GE Healthcare consulté le 15/02/2025)	26
1.9	Concurrents de GE Healthcare en Algérie	27
1.10	Illustration D'équipements GE Healthcare par segment(Site internet GE Healthcare consulté le 15/02/2025)	28
1.11	Part de marché de GE Healthcare Algérie(document interne)	28
1.12	Organigramme structurel de GE HealthCare Algérie	29
1.13	Chaîne d'approvisionnement de GE Healthcare Algérie	30
1.14	BPMN du Wing to Wing process	33
1.15	BPMN Approvisionnement	35
1.16	BPMN Manufacturing	37
1.17	BPMN Distribution	37
1.18	Réseau international Imaging	38
1.19	Réseau international US	39
1.20	Réseau international PCS	39
1.21	clients imaging	40

1.22 clients US.	40
1.23 clients PCS.	41
1.24 BPMN Service Après Vente	41
1.25 Pourcentage de ventes par segment	43
1.26 Client GE Healthcare 2024	43
1.27 Commandes du premier trimestre 2025	44
1.28 Volume des commandes clients par wilaya et par segment	44
1.29 Les coûts logistique du premier trimestre de 2025	45
1.30 Pourcentage des distances parcourues	46
1.31 Evolution des coûts des distances parcoururent par type de camions	46
1.32 Taux d'utilisation des différents camions de transport par segment.	47
1.33 BMPN d'une intervention de maintenance	48
1.34 Evolution des prix d'importation des pièces de 2018 à 2024	49
1.35 Représentation graphique de l'Évolution des prix d'importation des pièces de 2018 à 2024	51
1.36 Exemple d'évolution de quelques pièces de rechange	51
2.1 Strucutre des flux de la Supply Chain(Cours SCM)	57
2.2 Diagramme de Venn ((Nafea, M. ; Shihata, L.A. ; Mashaly, M.,page 6))	58
2.3 A generic form of forward/reverse logistics ((Tonanont et al., 2008).page 2)	59
2.4 Configuration Healthcare Supply chain.(Govindan, K. ; Soleimani, H. ; Kannan, D : Adapted from Burns 2002, page 2)	60
2.5 Cadre décisionnel stratégique de la chaîne logistique de santé ((Zammit, A. ; Muscat, A. ; Portelli, J.), page 12)	60
2.6 : Design du réseau Closed loop supply chain((Pal, R. ; Torstensson, H. ; Mattila, H.),page 91109)	62
2.7 Global Supplychain Design((Santoso et al., EJOR, 2005.), Page 2)	63
2.8 Modèles de chaînes logistiques à un seul échelon vs multi-échelons((Nafea et al., Technologies, 2025.),Page 10)	63
2.9 Représentation du CVRP(Michel Nabaa, Besma Zeddini, Pierrick Tranouez. Approche décentralisée pour résoudre le problème du transport à la demande. Majestic 2007, Oct 2007)	71
2.10 Classification des algorithmes de résolution du VRP(d'après le rapport de re- cherche de Télécom Bretagne, 2011, p.16)	72

2.11	ÉIllustration du déroulement de l'algorithme du K Means (Standford 2024) . . .	76
2.12	Hiérarchie Générale de la méthode AHP(Kaouther FENNICHE 2019))	77
3.1	Algorithme du Kmeans sur Python	83
3.2	Résultats du K-means	83
3.3	Résultats du K-means	84
3.4	Résultats de l'affectation des nouveaux clients.	84
3.5	Résultats de l'affectations des clusters.	85
3.6	Application de la méthode du Barycentre	85
3.7	Résultats de la méthode du Barycentre pour les cluster Est et Ouest	86
3.8	Code Python de l'application de la méthode du p-centre	86
3.9	Résultat de l'application de la méthode du P-centre.	87
3.10	Code Python de la méthode du P-Médian	87
3.11	Résultat d'application de la méthode du P-médian	88
3.12	Chargement des données sur Python	94
3.13	Définition des variables de décisions sur Python	95
3.14	Définition de la fonction objectif Z3 sur Python	95
3.15	Définition de la fonction objectif Z1 et Z2 sur Python	95
3.16	Définition de la fonction objectif Z3 sur Python	96
3.17	Résultats d'ouverture des entrepôt	96
3.18	Cartographie géographique des résultats d'affectation des clients imaging	97
3.19	Cartographie Géographique des résultats d'affectation des clients US	97
3.20	Cartographie Géographique des résultats d'affectation des clients PCS	98
3.21	Nombre de trajets par type de camion selon les méthodes Barycentre et P-centre pour le segment imaging	98
3.22	Nombre de trajets par type de camion selon la méthode P-médian pour le segment imaging	99
3.23	Nombre de trajets par type de camion pour la methode du Barycentre et du P-centre pour le segment US	99
3.24	Nombre de trajets par type de camion selon la méthode du P-médian pour le segment US	100
3.25	Nombre de trajets par type de camion pour les méthodes Barycentre et P-centre pour le segment PCS	100

3.26	Nombre de trajets par type de camion selon la méthode du P-médian pour le segment PCS	101
3.27	Comparaison entre les coûts logistiques et émission carbone par méthode	101
3.28	Tournées de véhicule pour le segment Imaging	106
3.29	Tournées de véhicule pour le segment US	106
3.30	Tournées de véhicule pour le segment US	106
3.31	Tournées de véhicule pour les segments Imaging, US, PCS	108
3.32	Schéma représentatif de la prise de décisions	110
3.33	Visualisation des performances des alternatives selon la méthode AHP	111
3.34	Proposition d'une BMPN pour le processus de Harvest	112
3.35	Aperçu d'affichage pour la gestion des pièces	113
3.36	Plan d'action :Phase de conception Réorganisation des processus	114
3.37	Plan d'action :Phase de mise en œuvre opérationnelle	114
3.38	Plan d'action :Phase de transition et suivi	115
3.39	Plan d'action :Phase continue	115
3.40	Schéma simplifié du processus de dédouanement	124
3.41	Affichage Python des résultats de la variable Yijs pour le segment imaging selon les trois méthodes	126
3.42	Affichage Excel des résultats de la variable Yijs pour le segment imaging selon les trois méthodes	126
3.43	Affichage Python des résultats de la variable Yijs pour le segment US selon les trois méthodes	127
3.44	Affichage Excel des résultats de la variable Yijs pour le segment US selon les trois méthodes	127
3.45	Affichage Python des résultats de la variable Yijs pour le segment PCS selon les trois méthodes	128
3.46	Affichage Excel des résultats de la variable Yijs pour le segment PCS selon les trois méthodes	128
3.47	Affichage Python des résultats de la variable Zijt pour le segment imaging selon les trois méthodes	129
3.48	Affichage Excel des résultats de la variable Zijt pour le segment Imaging selon les trois méthodes	129
3.49	Affichage Python des résultats de la variable Zijt pour le segment US selon les trois méthodes	130

3.50	Affichage excel des résultats de la variable Z_{ijt} pour le segment US selon les trois méthodes	130
3.51	Affichage Python des résultats de la variable Z_{ijt} pour le segment PCS selon les trois méthodes	131
3.52	Affichage Excel des résultats de la variable Z_{ijt} pour le segment PCS selon les trois méthodes	131
3.53	Affichage Excel des résultats de la variable A_{ij} pour les segments Imaging, US et PCS	132
3.54	Code VRP : Déclaration des paramètres	133
3.55	Code VRP : Déclaration des Variables de décisions	133
3.56	Code VRP : Déclaration de la fonction objectif	133
3.57	Code VRP : Déclaration des contraintes	134
3.58	Code VRP : Résolution du modèle et affichage du résultat	135

Liste des acronymes

- **SCM** : Supply Chain Management
- **CLSC** : Closed Loop Supply Chain
- **OTR** : Order to Remittance
- **COD** : Create Order Demand
- **KYC** : Know Your Customer
- **COSD** : Customer Order Shipment Date
- **RDC** : Regional Distribution Center
- **FDA** : Food and drug administration.
- **GON** : Global Order Number
- **PJM** : Project Manager
- **US** : Ultrasons
- **PCS** : Patient Care Solution
- **DI** : Diagnostic Imaging
- **W2W** : Wing to wing

Introduction générale

“L'accès aux équipements médicaux ne doit pas dépendre de la distance mais de l'efficacité de la chaîne logistique.”

OMS, Rapport sur les systèmes de santé et la chaîne d'approvisionnement – 2010.

Les technologies de la santé occupent une place stratégique dans le fonctionnement et la performance des systèmes de soins. Les dispositifs médicaux en particulier, jouent un rôle crucial à chaque étape du parcours de santé : prévention, diagnostic, traitement et réadaptation des patients.

Dans un contexte mondial caractérisé par une intensification des contraintes pesant sur les chaînes logistiques, le secteur des dispositifs médicaux se distingue par la complexité de ses opérations, la sensibilité de ses flux et son influence directe sur l'efficacité des structures de santé. L'organisation rigoureuse et performante de la distribution des équipements médicaux constitue ainsi un enjeu stratégique majeur, en particulier dans les environnements où les besoins en soins sont élevés et la pression sur les systèmes sanitaires accrue.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, réalisé au sein de GE Healthcare, acteur mondial de référence dans le domaine des technologies médicales. La filiale algérienne de l'entreprise a pour mission d'assurer la disponibilité, la qualité et la maintenabilité de ses équipements médicaux à travers le territoire national. Elle se distingue notamment par un service après-vente structuré, réputé pour sa réactivité, sa couverture technique étendue et son engagement à accompagner les établissements de santé tout au long du cycle de vie des équipements.

Le présent projet s'inscrit dans une démarche d'optimisation globale du processus **Wing to Wing**, qui couvre l'ensemble du cycle logistique, depuis la réception de la commande jusqu'à l'installation finale de l'équipement chez le client, en intégrant également les opérations de service après-vente.

L'objectif visé consistait à concevoir une Closed Loop Supply Chain spécifiquement adaptée au contexte algérien, afin d'optimiser l'efficacité de la distribution, de structurer de manière durable le service après-vente, et d'intégrer une approche circulaire reposant sur la récupération, le traitement et la réutilisation

des pièces des équipements médicaux.

Pour ce faire, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** est consacré à l'étude de l'existant. La première partie est consacrée à la présentation du marché des dispositifs médicaux en déterminant la position de GE Healthcare tant au niveau international que national. La seconde partie du chapitre est consacrée à la supply chain de GE Healthcare en la situant par rapport à la structure de l'entreprise et en décrivant le wing to wing process. La troisième et dernière partie du chapitre présente un diagnostic interne de l'ensemble du wing to wing process. Cette analyse nous a conduit à nous poser la question suivante :

Comment repenser la structure de la chaîne logistique de GE Healthcare Algérie pour optimiser le Wing to Wing process ?

- **Le deuxième chapitre** constitue la base théorique du mémoire. Il expose les concepts, définitions et approches méthodologiques mobilisés dans le cadre de ce projet. Les notions abordées sont directement liées à la problématique traitée, notamment celles relatives à la Closed Loop Supply Chain à savoir : Supply chain Design durable, La data mining pour la segmentation géographique, l'optimisation des tournées de véhicules et l'Aide Multicritère à la Décision.
- **Le troisième chapitre** est consacré à la conception de la solution proposée. Il décrit les différentes étapes de modélisation et d'optimisation mises en œuvre pour restructurer la chaîne logistique de GE Healthcare Algérie. Il débute par une segmentation géographique des clients à l'aide de l'algorithme K-means, suivie de l'application de modèles de localisation-allocation permettant de déterminer les emplacements optimaux des entrepôts. La suite du chapitre est dédiée à l'optimisation des tournées de distribution à travers la résolution d'un Green Vehicle Routing Problem (VRP) intégrant les contraintes de capacité, de segment, et d'émission de CO. Enfin, une méthode d'aide multicritère à la décision (AHP) est mobilisée pour comparer les scénarios logistiques et sélectionner la solution la plus adaptée selon des critères économiques, environnementaux et opérationnels.

Notre travail se conclut par la présentation des résultats obtenus, suivie d'une réflexion sur les perspectives d'amélioration. Ces dernières visent à identifier les leviers opérationnels et stratégiques permettant d'accompagner une éventuelle mise en œuvre de la solution au sein de GE Healthcare Algérie.

Chapitre 1

Etude de l'existant

1.1 Introduction

Pilier du système de santé mondial, le secteur de l'industrie des équipements médicaux, agissant comme des alliés essentiels pour les professionnels de la santé, ont pour mission de fournir la disponibilité, la qualité et l'efficacité des dispositifs médicaux, qui jouent un rôle crucial à chaque étape du parcours de soins du patient que ce soit dans un environnement hospitalier, clinique ou même à domicile. Les entreprises opérant dans ce secteur sont peu nombreuses (108 établissements en 2023) et font face à une forte pression en raison de la concurrence croissante, des réglementations gouvernementales, de l'augmentation des coûts et de la demande d'une meilleure qualité de service.

Ce chapitre sera divisé en trois sections : La première portera sur une présentation de l'entreprise, de son domaine d'intervention principal et de sa position sur le marché des dispositifs médicaux. La seconde abordera le Wing to Wing process afin de comprendre le comportement de la supply chain de GE Healthcare et la troisième exposera un diagnostic intégral qui se conclura par l'énoncé de la problématique.

1.2 Marché des équipements médicaux et position de GE Healthcare

Le marché des dispositifs médicaux connaît une évolution rapide, portée par les avancées technologiques et les besoins croissants en matière de santé.

Dans cette section, nous aborderons d'une part, le marché des dispositifs médicaux au niveau international et national, en mettant en lumière sa dynamique concurrentielle. et d'autre part, nous présenterons la position de GE Healthcare au niveau du marché international et au niveau du marché algérien.

1.2.1 Marché international des équipements médicaux et GE Healthcare au niveau mondial

En 2024, la taille du marché mondial des dispositifs médicaux était estimée à 542,21 milliards USD. Elle devrait atteindre 572,31 milliards USD en 2025, puis progresser jusqu'à 886,68 milliards USD d'ici 2032, affichant un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 6,5% sur la période de prévision.

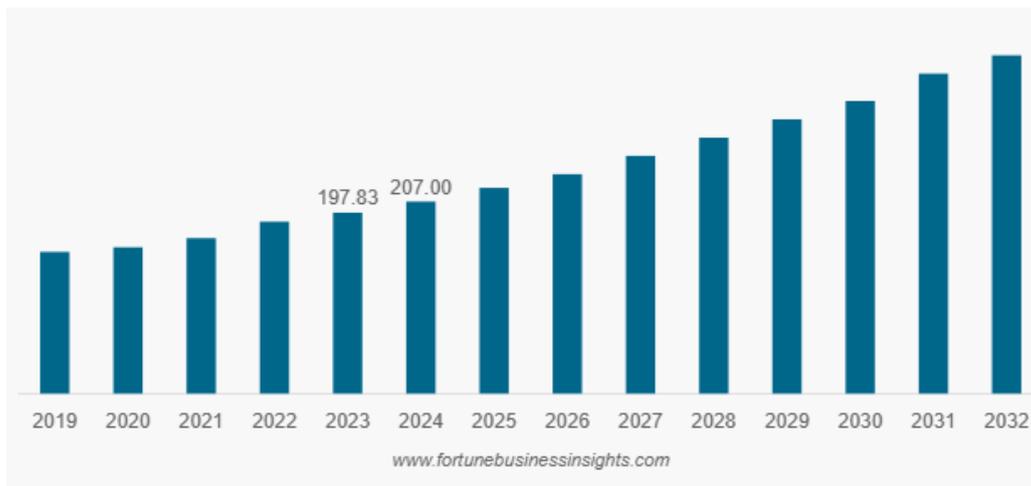


FIGURE 1.1 – Évolution du marché mondial des dispositifs médicaux (Source : Fortune Business Insight, consulté le 13/04/2025)

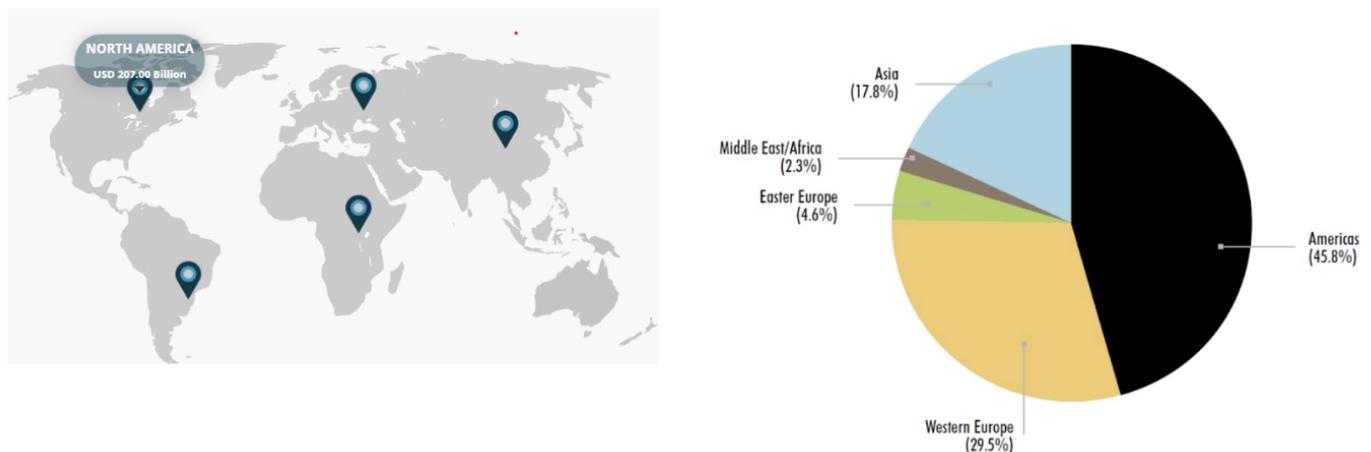


FIGURE 1.2 – Marché mondial des dispositifs médicaux (Source Fortune Business insight consulté le 13/04/2025)

À l'échelle mondiale, le marché des dispositifs médicaux est en pleine expansion, porté par le vieillissement de la population, l'augmentation des maladies chroniques et la généralisation des actes médicaux. Les avancées technologiques et la sensibilisation aux solutions de santé contribuent également à cette croissance.

Comme le montre la figure suivante, ce marché reste largement dominé par les États-Unis, suivis par l'Europe de l'Ouest et l'Asie.

L'Amérique du Nord, à elle seule, représente une part considérable du chiffre d'affaires mondial. Cette répartition reflète à la fois le niveau de développement des systèmes de santé et l'accès aux technologies médicales selon les régions.

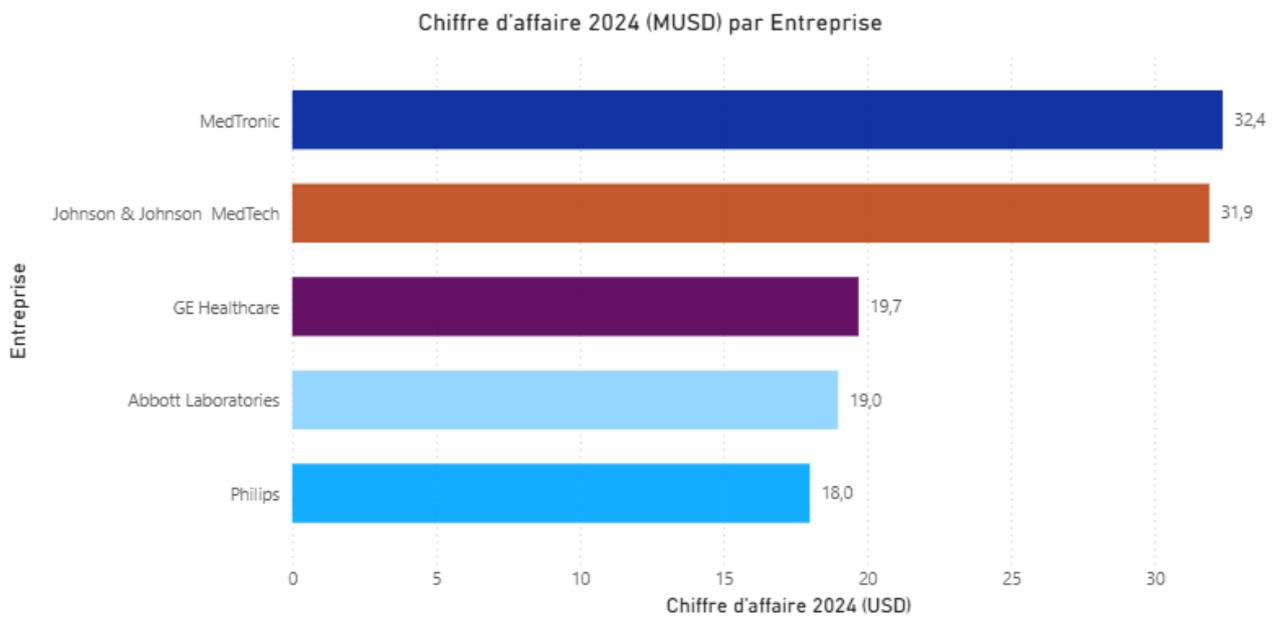


FIGURE 1.3 – Poids économique des géants de l'équipement médical en 2024 (en milliards USD)

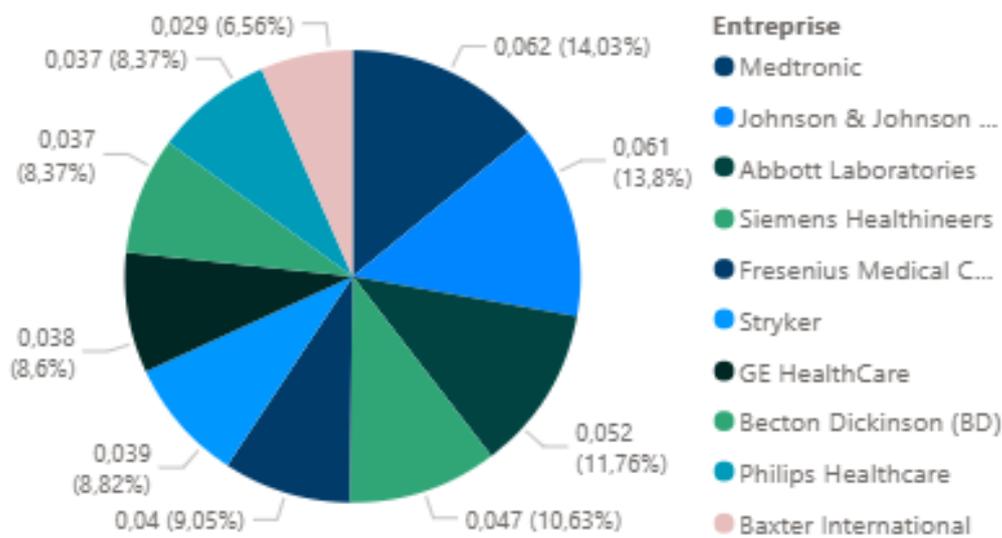


FIGURE 1.4 – Les parts de marchés des Géants de l'équipement médical.(GE Healthcare)

Par type, le marché est segmenté en dispositifs orthopédiques, dispositifs cardiovasculaires, dispositifs d'imagerie diagnostique, diagnostics in vitro (IVD), dispositifs de chirurgie mini-invasifs, gestion des plaies, dispositifs de soins du diabète, dispositifs en ophtalmique, dentaire dispositifs, dispositifs de néphrologie, chirurgie générale et autres.

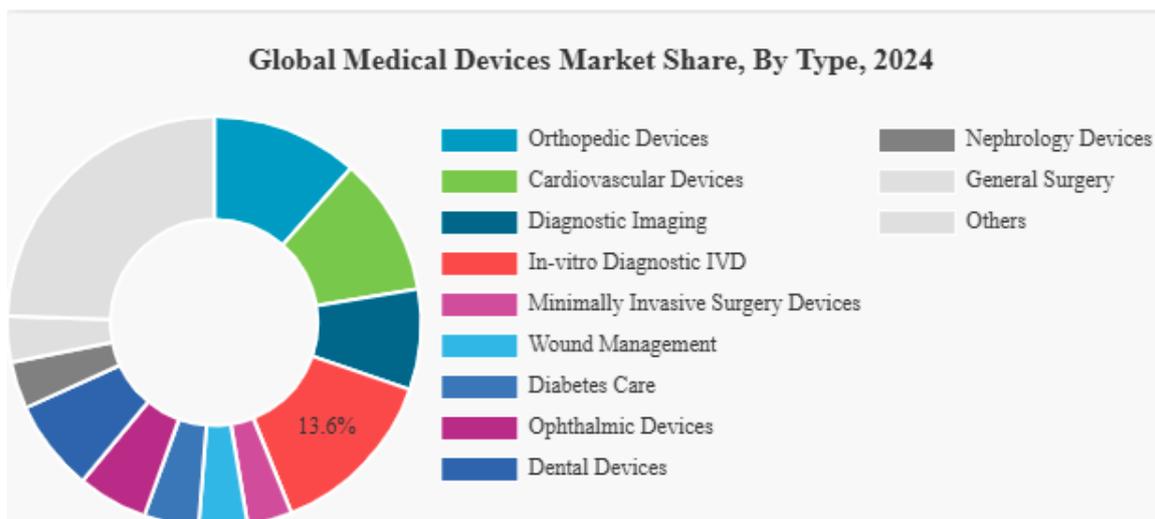


FIGURE 1.5 – Parts de marché des dispositifs médicaux par segment (Source :Fortune Business insight consulté le 13/04/2025)

GE Healthcare dans le monde

L'activité de GE Healthcare s'inscrit dans la stratégie globale du groupe General Electric, acteur majeur de l'industrie technologique mondiale. Avant d'aborder plus en détail le positionnement de GE Healthcare sur le marché international, il convient de revenir brièvement sur les origines et l'évolution de ce conglomérat.

a-Conglomérat General Electric

Fondée en 1892 à la suite de la fusion entre l'Edison General Electric Company et The Thomson-Houston Electric Company, General Electric (GE) est une entreprise américaine emblématique, présente dans 142 pays à travers 36 filiales. En 2023, GE a réalisé un chiffre d'affaires de 68 milliards de dollars, marquant une progression de 32 % par rapport à l'année précédente.

Au 9 août 2022, GE est structuré autour de trois pôles majeurs :

GE Aerospace se spécialise dans la fabrication de moteurs pour l'aviation civile et militaire, ainsi que dans la location et le financement d'avions commerciaux. **GE Vernova**, créé en avril 2024 à partir de la fusion et de la scission de GE Power, GE Renewable Energy, GE Digital et GE Energy Financial Services, regroupe les activités liées à l'énergie, incluant aussi bien le nucléaire que les énergies renouvelables.

Enfin, **GE Healthcare** est un leader mondial des technologies médicales, que nous aborderons dans le prochain titre.

b-Présence de GE Healthcare

GE Healthcare, fondée à New York et aujourd'hui basée à Chicago, est devenue une entité indépendante de General Electric en janvier 2023, à la suite d'une introduction en bourse stratégique. Elle accompagne chaque année plus d'un milliard de patients, avec un chiffre d'affaires de 19,6 milliards USD en 2023.

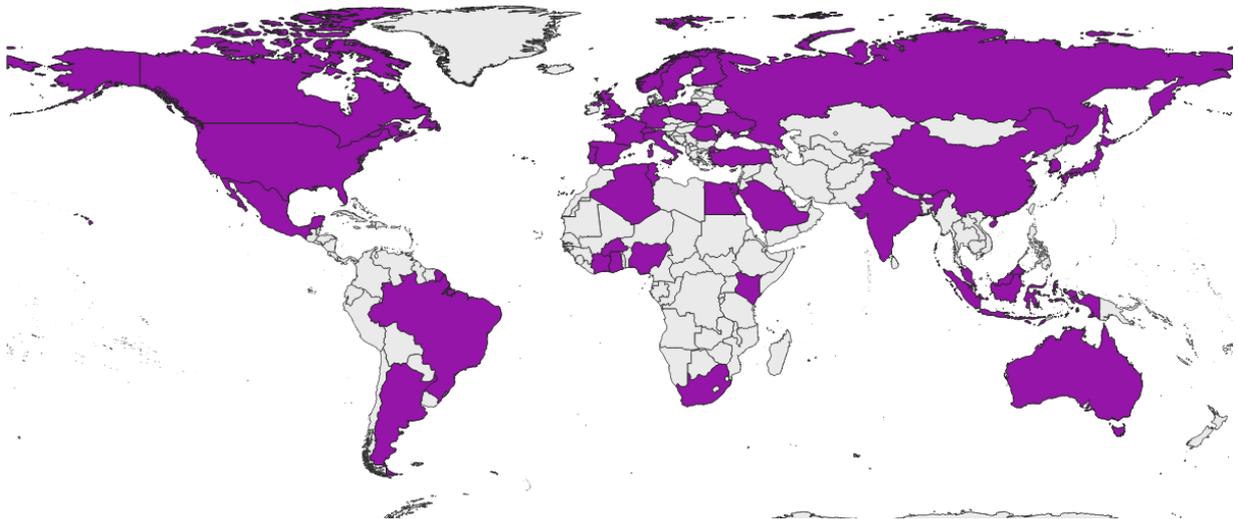


FIGURE 1.6 – Présence de GE Healthcare dans le monde (Document interne)

<p>+1 Billions Patients pris en charge chaque année</p>	<p>+125 Year Legacy</p>	<p>160 Pays avec clients</p>	<p>+4 millions Équipements de base installés</p>
--	--	---	---

TABLE 1.1 – GE Healthcare en quelques chiffres

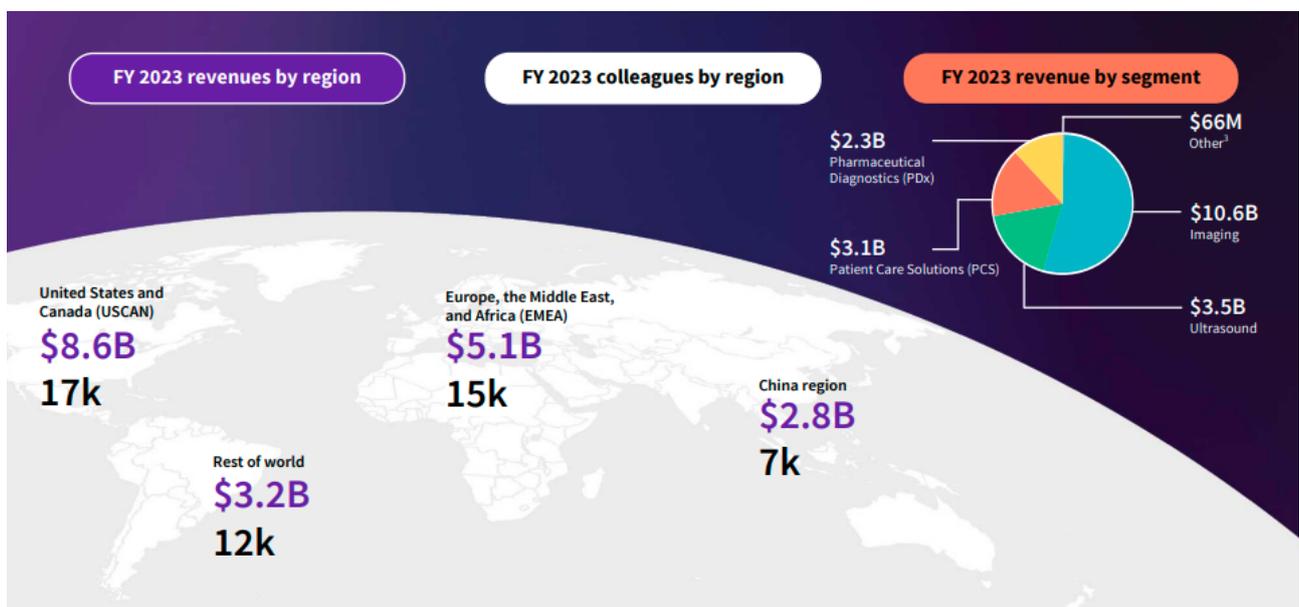


FIGURE 1.7 – Chiffre d'affaire GE Healthcare(Document interne)

L'implication de General Electric dans le domaine de la santé remonte à la fin du **XIXe siècle**, avec la fabrication des premiers équipements médicaux, tels que les appareils à rayons X et les lampes médicales, posant ainsi, les bases de ses activités dans le domaine de la santé.

En 1994, General Electric décide de regrouper l'ensemble de ses activités liées à la santé sous une entité unique, donnant ainsi naissance à GE Medical Systems. Cette entité est ensuite rebaptisée GE Healthcare en 2004, afin de refléter plus fidèlement la diversité croissante de ses activités dans le secteur médical.

Au cours des années 2000, GE Healthcare connaît une phase de croissance soutenue, portée par une stratégie d'acquisitions ciblées dans des domaines à fort potentiel tels que la biotechnologie, le diagnostic moléculaire et les technologies de soins intensifs.

Durant la décennie 2010, l'entreprise poursuit son développement en investissant massivement dans l'innovation technologique. Elle élargit continuellement son portefeuille de produits et de services, répondant ainsi aux besoins évolutifs des systèmes de santé.

Enfin, dans **les années 2020**, GE Healthcare s'impose comme un leader mondial de l'industrie de la santé, en proposant une large gamme de solutions à l'échelle internationale. L'entreprise continue de jouer un rôle clé dans l'amélioration des soins de santé grâce à ses innovations technologiques et à son engagement envers la qualité et l'accessibilité des services médicaux.

c-Activités de GE healthcare

Au service des patient depuis 125 ans, GE HealthCare est un acteur majeur des technologies médicales, du diagnostic pharmaceutique et des solutions numériques, engagé à proposer des solutions intégrées, des services et des analyses de données pour optimiser l'efficacité des hôpitaux, renforcer la performance des cliniciens, améliorer la précision des thérapies et favoriser le bien-être des patients.

Les activités de GE Healthcare opèrent autours de quatre segments : Imagerie, PCS, US et Pharmaceutical Diagnostic, en plus du service après vente.

-Imaging(Imagerie) :

Englobent les technologies d'imagerie diagnostique comme l'IRM, le scanner(CT), la radiologie, la mammographie et la médecine nucléaire.

-Patient Care Solution(PCS) :

Comprend les équipements de surveillance des patients, les équipements d'anesthésie, de cardiologie, les ventilateurs et autres dispositifs de soins critiques.

-Ultrasound(US) :

Regroupe les équipements liés à la Radiologie et soins primaires, la santé de la femme, le cardiovasculaire, les soins de proximité, ainsi que la visualisation et guidage chirurgicaux portables.

-Pharmaceutical Diagnostic :

Regroupe les médias de contraste et agents d'imagerie moléculaire qui sont des substances utilisées en imagerie médicale pour améliorer la visibilité des organes, des tissus et des anomalies dans le corps.

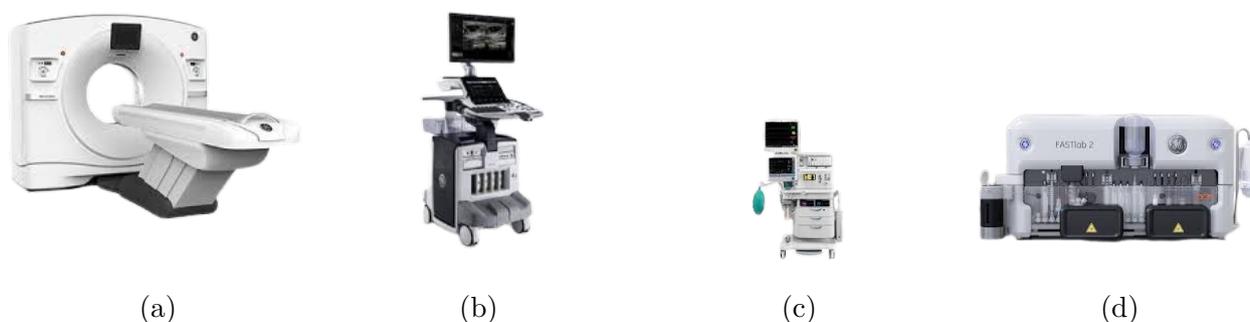


FIGURE 1.8 – Illustration D'équipements GE Healthcare par segment(Site internet GE Healthcare consulté le 15/02/2025)

Après avoir présenté les grandes tendances du marché mondial, il est important de s'intéresser à la situation nationale. L'analyse du marché algérien des dispositifs médicaux permet de mieux comprendre les enjeux locaux, les besoins spécifiques du secteur de la santé en Algérie, ainsi que les opportunités et contraintes auxquelles font face les acteurs du domaine.

1.2.2 Marché des équipements médicaux et GE Healthcar en Algérie

Le marché des équipements médicaux en Algérie, dominé par les importations, figure parmi les plus dynamiques d'Afrique du Nord et subsaharienne.

Sa croissance est alimentée par une demande croissante en services de santé, l'essor démographique et une large gamme de produits répondant aux besoins variés du système de santé, allant des équipements de diagnostic (tels que scanners, IRM, échographes, ECG et tests rapides), aux dispositifs thérapeutiques (comme les respirateurs, pompes à perfusion, lasers médicaux ou appareils

d'électrothérapie), en passant par le matériel de laboratoire (centrifugeuses, microscopes, analyseurs, incubateurs, hottes à flux laminaire) et les consommables médicaux (gants, seringues, compresses, cathéters ou réactifs chimiques).

Ce marché connaît une croissance soutenue, avec une demande particulièrement forte pour les équipements de diagnostic qui représente la plus grande part du marché, porté par l'essor des technologies d'imagerie médicale telles que les scanners et les échographes. Les dispositifs thérapeutiques, notamment les équipements de dialyse et les appareils respiratoires, enregistrent également une demande croissante.

Cependant, le marché algérien reste fortement encadré par une réglementation stricte, avec des procédures d'approbation longues et complexes. À cela s'ajoutent la concurrence étrangère intense et les difficultés d'accès au financement, qui constituent des défis majeurs pour les acteurs locaux comme pour les entreprises internationales.

Le marché des dispositifs médicaux en Algérie est marqué par une forte concurrence. Parmi les principaux concurrents de GE Healthcare figurent Siemens Healthineers, Philips Healthcare, Canon Medical, Toshiba Medical, Mindray et United Imaging. Ces entreprises proposent une large gamme de solutions diagnostiques, thérapeutiques et de monitoring, et rivalisent en termes d'innovation technologique, de couverture du territoire, de qualité de service après-vente et de compétitivité des prix. Cette concurrence dynamique pousse chaque acteur à renforcer sa présence locale et à adapter ses offres aux besoins spécifiques du marché algérien.



FIGURE 1.9 – Concurrents de GE Healthcare en Algérie

GE Healthcare en Algérie

Depuis son implémentation en Algérie en 2016, l'entreprise S.A.R.L GE Healthcare Algérie est au service des hôpitaux et cliniques à travers la commercialisation, l'importation, la distribution et l'installation des équipements médicaux sous ses différents segments : Imagerie, US et PCS.

A- Position de GE Healthcare sur le marché en Algérie

Depuis son implémentation en Algérie en 2016, l'entreprise S.A.R.L GE Healthcare Algérie est au service des hôpitaux et cliniques à travers la commercialisation, importation, distribution et installation des équipements médicaux sous ses différents segments : Imagerie, US et PCS.

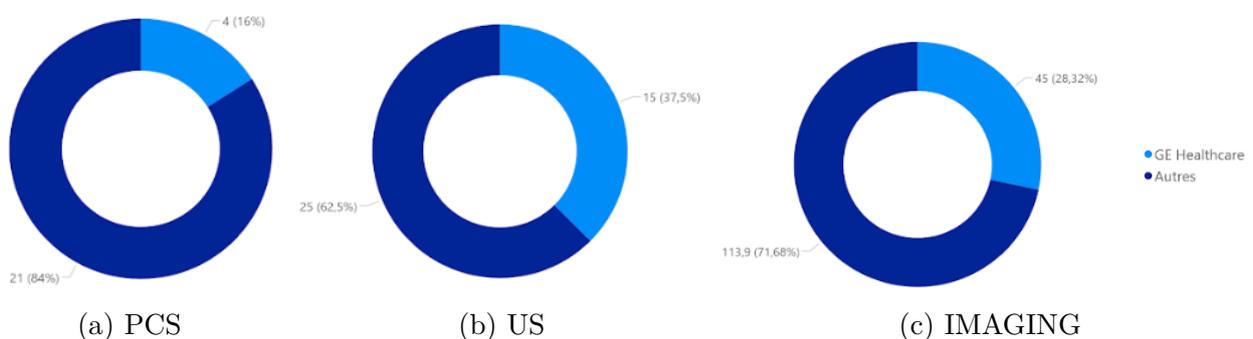


FIGURE 1.10 – Illustration D'équipements GE Healthcare par segment(Site internet GE Healthcare consulté le 15/02/2025)

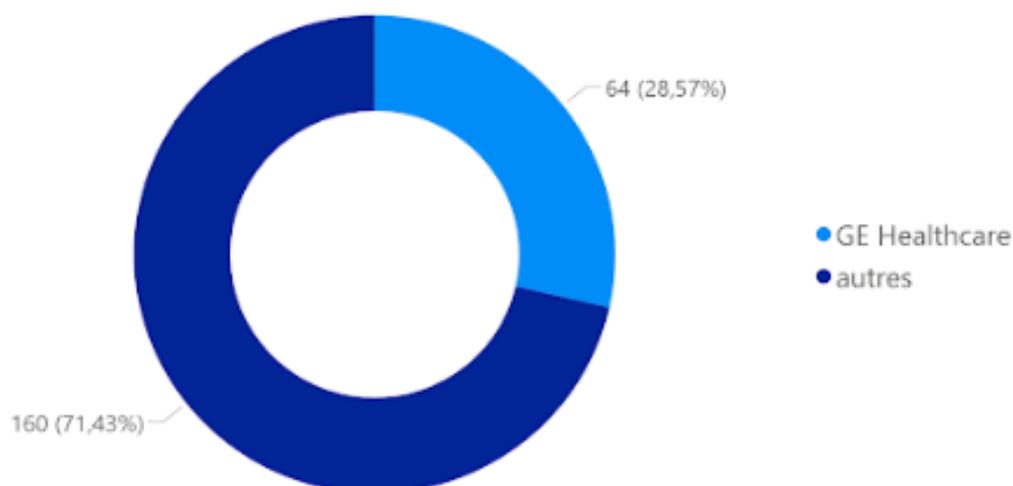


FIGURE 1.11 – Part de marché de GE Healthcare Algérie(document interne)

Après avoir présenté l'entreprise GE Healthcare ainsi que sa position sur les marchés international et national, la section suivante détaillera la supply chain de GE Healthcare Algérie.

1.3 Supply Chain de GE Healthcare Algérie et Wing to wing process

Cette section sera dédiée à la présentation de la supply chain de GE Healthcare Algérie et à la description du processus Wing to Wing, qui encadre l'ensemble des opérations logistiques. Il convient donc, dans un premier temps, d'examiner la structure organisationnelle de GE Healthcare afin de mieux comprendre la place qu'y occupe la supply chain.

1.3.1 Position de la Supply Chain de GE Healthcare Algérie

L'organigramme suivant illustre la structure hiérarchique de l'entreprise, en mettant en évidence les principaux départements

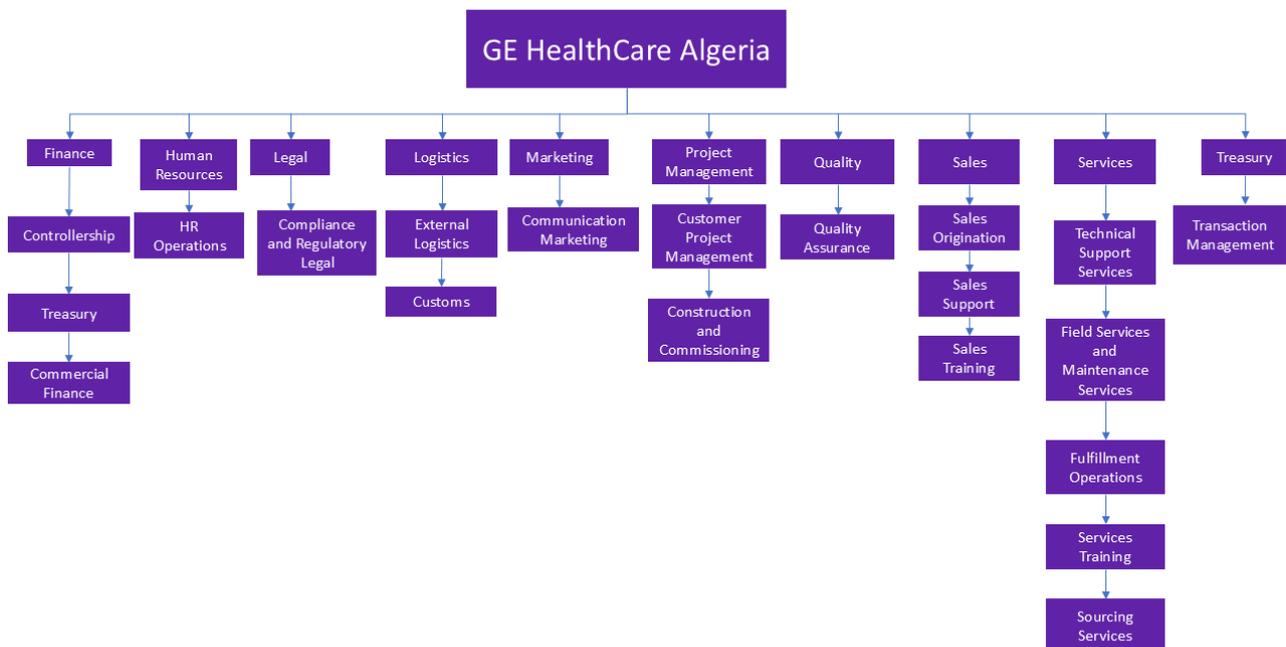


FIGURE 1.12 – Organigramme structurel de GE HealthCare Algérie

Les activités de l'entreprise installée à Alger sont donc réparties sur les départements suivants :

- **Département Finance** : Gestion de la comptabilité, de la trésorerie et du financement commercial.
- **Département Ressources Humaines** : Recrutement, gestion du personnel et développement des compétences.
- **Département Juridique** : Conformité réglementaire et gestion des aspects juridiques.

- **Département Logistique** : Coordination des flux logistiques externes et gestion des opérations douanières.
- **Département Marketing** : Communication et valorisation des produits et services.
- **Département Gestion de projets** : Supervision des projets clients, de l'installation à la mise en service.
- **Département Qualité** : Garantie de la conformité des produits et services aux normes en vigueur.
- **Département Sales** : Prospection, support commercial et formation des équipes de vente.
- **Département Services après vente** : Support technique, maintenance sur site, formation et gestion des fournisseurs.
- **Département Trésorerie** : Suivi des transactions financières et gestion des flux de trésorerie.

1.3.2 Supply Chain de GE Healthcare Algérie

GE Healthcare Algérie a structuré sa chaîne d'approvisionnement autour d'un modèle logistique externalisé, en s'appuyant sur ARAMEX, un prestataire 3PL (Third Party Logistics) reconnu au niveau international pour son expertise dans les solutions logistiques intégrées. Ce partenariat stratégique permet à GE Healthcare de se concentrer sur ses activités médicales et technologiques, tout en confiant la gestion des flux physiques, du stockage, de la distribution et des retours à un opérateur logistique spécialisé

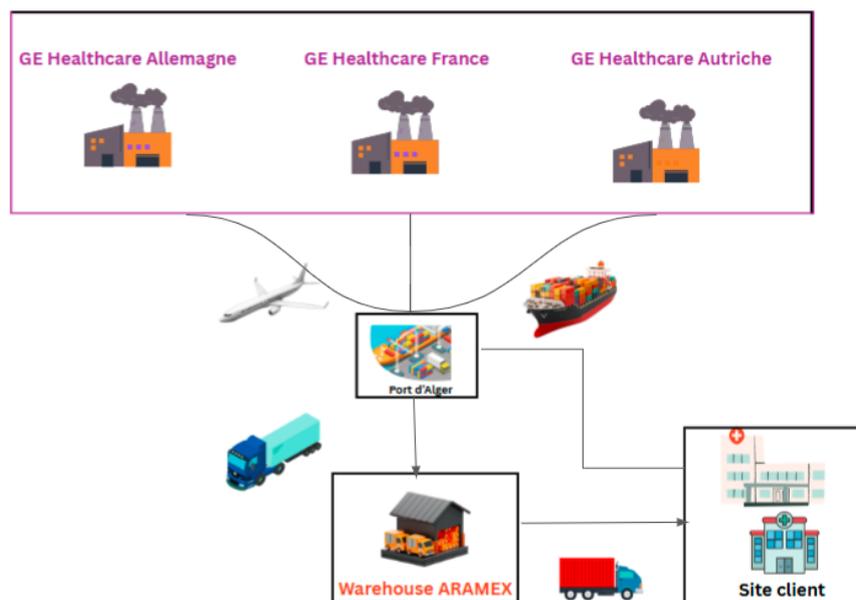


FIGURE 1.13 – Chaîne d'approvisionnement de GE Healthcare Algérie

Le cœur de ce dispositif repose sur un entrepôt central situé à Khemis El Khechna, à l'est d'Alger, offrant une position géographique optimale pour gérer les flux d'importation via le port d'Alger et la distribution nationale vers les établissements de santé publics et privés.

L'entrepôt joue un rôle pivot dans l'architecture logistique : il centralise les opérations de réception, de stockage, de préparation de commandes, de livraison finale et de reverse logistics. L'infrastructure dispose de quatre allées de stockage en hauteur sur cinq niveaux :

-Deux allées sont affectées aux équipements lourds (imagerie médicale, échographes, moniteurs, etc.), avec une capacité de 560 palettes.

-Deux autres allées sont dédiées aux pièces détachées et composants de maintenance, avec une capacité de 1200 palettes.

Le stockage au sol est réservé aux machines et accessoires à forte rotation, tandis que le stockage en hauteur concerne les articles à faible rotation, permettant une gestion optimisée des espaces et des fréquences de prélèvement.

Les activités logistiques assurées par Aramex couvrent l'ensemble des maillons critiques de la chaîne d'approvisionnement de GE Healthcare Algérie :

Transport amont : Aramex assure le dédouanement, la manutention portuaire et le transfert sécurisé des équipements médicaux depuis le port d'Alger jusqu'à l'entrepôt de Khemis El Khechna, en conformité avec les exigences réglementaires applicables aux dispositifs médicaux.

Réception et inspection : À leur arrivée, les produits font l'objet d'un contrôle de conformité (quantité, qualité, certification) et sont ensuite enregistrés dans le WMS (Warehouse Management System) assurant la traçabilité complète des articles.

Stockage intelligent et gestion d'inventaire : Le WMS permet de suivre les mouvements de stock, de gérer les seuils de réapprovisionnement, et d'optimiser la préparation des commandes, tout en assurant un taux d'erreur minimal.

Distribution et livraison finale : Aramex se charge de l'acheminement des dispositifs médicaux vers les clients finaux — hôpitaux, cliniques, distributeurs — en respectant des standards stricts de qualité, de sécurité et de ponctualité. Les livraisons peuvent inclure des prestations à valeur ajoutée, telles que la livraison sur site avec coordination d'installation.

Gestion des retours (reverse logistics) : Les dispositifs médicaux retournés (non conformes, à réparer, ou en fin de cycle) sont collectés, identifiés, contrôlés et remis en état à l'entrepôt.

Ce processus est rigoureusement suivi afin de garantir la traçabilité, la rapidité d'intervention et la qualité du service après-vente.

Support technique logistique : Aramex assiste également GE Healthcare dans la logistique des interventions techniques, en assurant la mise à disposition rapide des pièces détachées nécessaires aux équipes terrain pour la maintenance curative ou préventive.

1.3.3 Le wing to wing process

Le wing to wing Process qui est une approche qui couvre de bout en bout une supply chain. Dans le cadre de GE Healthcare, le processus Wing-to-Wing (W2W) couvre l'ensemble du cycle opérationnel, depuis la planification de la demande consécutive à la signature du contrat commercial, jusqu'à l'installation finale de l'équipement chez le client.

Afin de mieux analyser les étapes clés de ce processus, celui-ci est généralement segmenté en deux grandes phases : le W2W amont et le W2W aval.

-Phase 1 : W2W Amont

La phase amont englobe toutes les activités s'étendant de **la signature du contrat jusqu'à la production de l'équipement**.

Elle commence par l'intervention de l'équipe commerciale, qui établit un contact avec le client (principalement des établissements de santé tels que hôpitaux ou cliniques) afin de formaliser les besoins, les spécifications techniques, les conditions de livraison, les éventuelles contraintes réglementaires, ainsi que l'état de préparation du site d'installation.

Une fois le contrat conclu, l'équipe Order-to-Remittance (OTR) prend le relais. Elle est responsable de l'exécution et du suivi global de la commande, jusqu'à la réception du paiement final. Une étape de Contract Review est menée afin de valider la cohérence, l'exhaustivité et la conformité des informations contractuelles. Après validation, le Project Manager (PJM) génère une Customer Order Document (COD), enregistrant officiellement la commande dans le système ERP.

La commande est ensuite transmise à l'unité de production, en fonction du segment et de la localisation géographique de l'usine. Un Global Order Number (GON) est attribué au client, permettant le suivi de fabrication. L'usine confirme une Customer Order Ship Date (COSD), qui est communiquée au PJM.

Une fois la fabrication finalisée, l'équipement est consolidé dans un centre de consolidation régional (RDC). La Distribution & Consolidation (DC) Team assure le regroupement, le stockage temporaire et la préparation de l'expédition vers l'Algérie, généralement par voie maritime.

La description du processus est présentée dans la cartographie BPMN suivante :

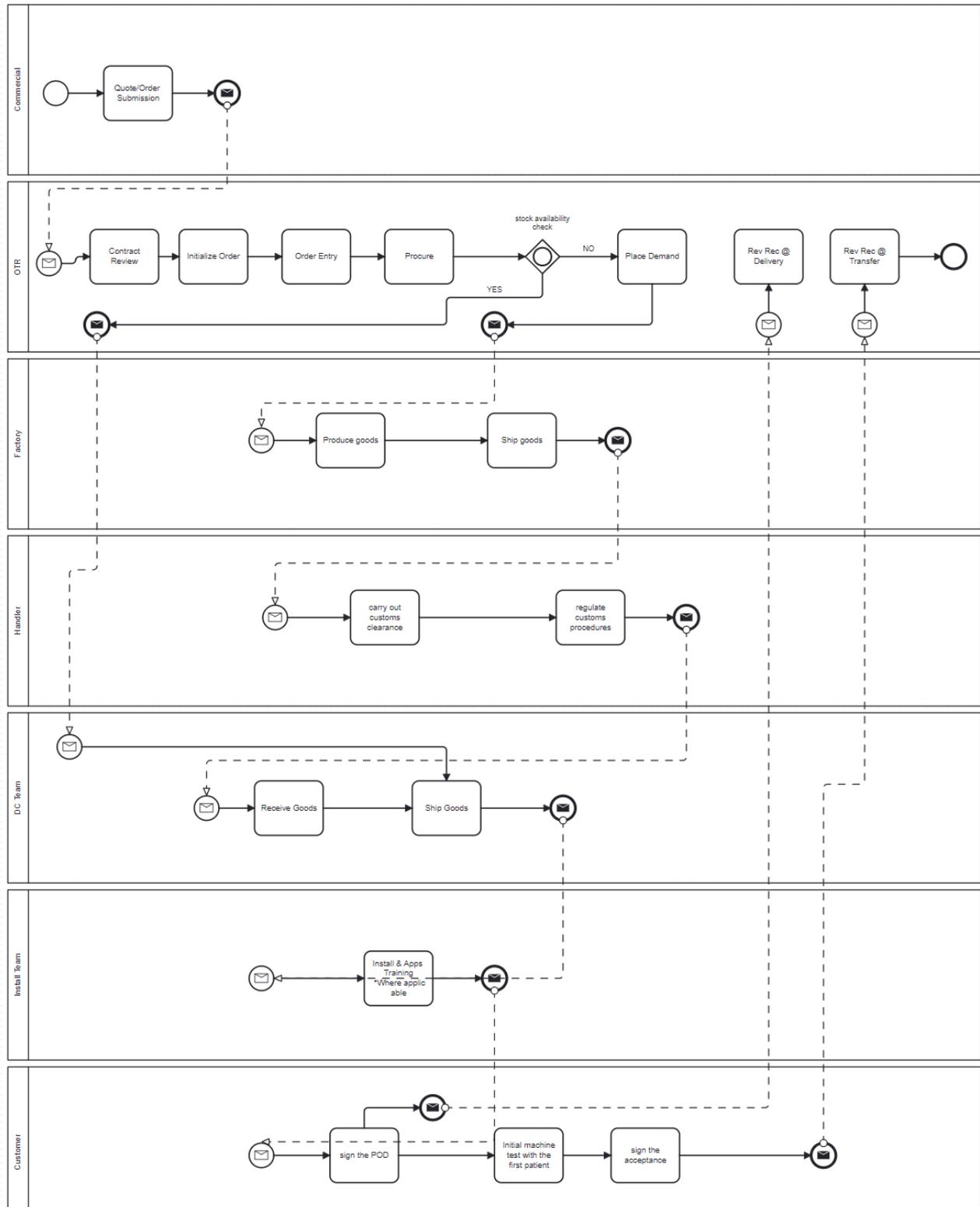


FIGURE 1.14 – BPMN du Wing to Wing process

-Phase 2 : W2W Aval

La phase aval comprend toutes les étapes postérieures à l'arrivée de l'équipement sur le territoire algérien, jusqu'à son installation opérationnelle chez le client. Une fois les formalités douanières finalisées (voir annexe 1), deux cas de figure peuvent se présenter :

-Si le site du client est prêt à accueillir l'équipement, la livraison est organisée directement depuis le port vers le site final.

-Si le site n'est pas encore prêt, l'équipement est stocké temporairement dans l'entrepôt de GE Healthcare en Algérie.

L'équipe Installation intervient ensuite pour procéder à l'installation physique de l'équipement et à la formation des utilisateurs. À la suite de la livraison, un Proof of Delivery (POD) est émis par le médecin référent du site. Conformément aux termes contractuels, une formation à l'utilisation est organisée pour les professionnels de santé concernés.

Une fois la formation achevée et les équipes médicales prêtes, un premier test clinique est réalisé pour vérifier le bon fonctionnement de l'équipement. L'ensemble du processus est finalisé par la signature du procès-verbal d'acceptation, qui marque la clôture formelle de la commande et la fin du cycle W2W

La section suivante s'attachera à détailler les différentes étapes du processus Wing to Wing.

1.4 Diagnostic interne et énoncé de la problématique

Dans cette section, nous avons tout d'abord opté pour la modélisation Business Process Model and Notation (BPMN), afin de bien comprendre l'interaction entre les différents services qui prennent en charge les différentes étapes du Wing to wing process

La suite de la section sera consacrée à une analyse approfondie des coûts logistiques et des coûts d'importation des pièces de rechange supportés par GE Healthcare Algérie, ainsi qu'à l'évaluation de leur impact environnemental à travers le calcul du bilan carbone.

Ce diagnostic interne nous permettra de mieux comprendre les contraintes actuelles du modèle logistique, de mettre en évidence les dysfonctionnements observés et d'en dégager les causes racines. Ces éléments serviront de socle pour formuler de manière rigoureuse la problématique centrale de ce mémoire.

1.4.1 Modélisation SCOR du W2W

Nous avons utilisé la méthode SCOR(Supply Chain Operations Reference) comme référentiel de diagnostic de notre chaîne de valeur qui va permettre de comprendre la structure de la supply chain de GE Healthcare Algérie.

1-Planification

La planification des équipements est effectuée par segment :

a-Pour le segment imaging :

La planification et le lancement de la commande ainsi que la production se font en Make to order.

b-Pour les segments PCS et US :

La planification de commande est effectuée en make to order et en make to stock. Les prévisions sont faites par Quarter, à la fin de chaque trimestre les prévisions des commandes sont ajustées en fonction des commandes précédentes.

La stratégie de GE Healthcare est d'atteindre un objectif de Zéro stock

2-Approvisionnement

L'approvisionnement concerne toutes les étapes liées à l'initiation de la commande au lancement de la demande d'approvisionnement.

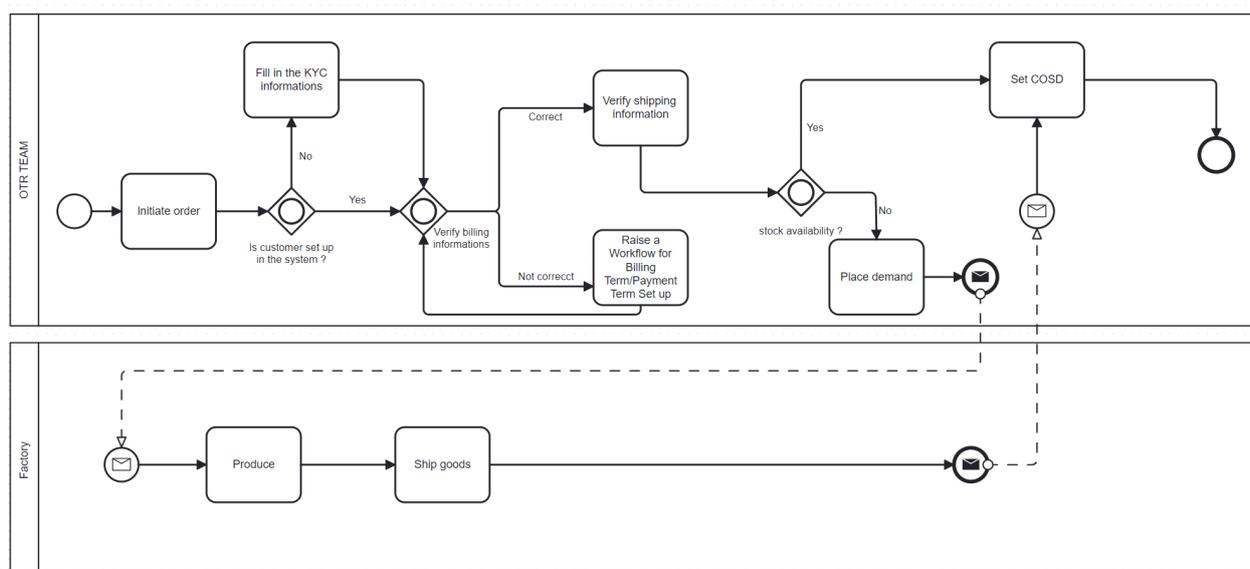


FIGURE 1.15 – BPMN Approvisionnement

Initialisation de la commande – “Initiate Order”

Dès lors que le contrat est validé par le service commercial et que la documen-

tation contractuelle est jugée conforme par l'équipe OTR, une commande est officiellement initiée dans le système ERP (généralement Oracle ou SAP).

Cette étape est cruciale, car elle déclenche tout le processus d'exécution logistique en aval :

-Si le client est déjà enregistré, le processus continue sans interruption.

-Si le client n'existe pas encore dans le système, l'équipe OTR prend en charge la création d'une nouvelle fiche (KYC) qui consiste à la saisie des informations client (Raison sociale de l'entreprise cliente, Numéro d'Identification Fiscale (NIF), RIB ou coordonnées bancaires professionnelles, Agrément du médecin ou de l'entité). Ces informations permettent non seulement de sécuriser les transactions, mais aussi de garantir la traçabilité et la transparence des relations commerciales.

Une fois les données client, facturation et livraison validées, le système déclenche un contrôle automatique de la disponibilité des articles commandés :

-Cas PCS/US :

-Si les articles sont disponibles immédiatement en stock, la commande peut être exécutée sans délai, et une COSD est générée, c'est-à-dire une date d'expédition prévue pour le client.

-Si les articles sont indisponibles ou partiellement disponibles, une demande d'approvisionnement est lancée. Cela signifie que le processus bascule vers la planification logistique ou la production, selon le type de produit et le modèle de gestion.

-Cas Imaging

Pour ce type de machine, la commande est directement lancée aux usines une fois, toutes les vérifications nécessaires effectuées.

Lancement de la demande d'approvisionnement ou de fabrication

Si l'équipement est disponible en stock, le processus logistique de préparation et d'expédition est alors immédiatement enclenché. En cas d'indisponibilité de l'équipement dans le stock, un ordre de fabrication est transmis à l'usine, conformément aux paramètres prédéfinis (réapprovisionnement, seuils de sécurité).

3-Production

GE Healthcare par l'intermédiaire des Projects managers (PJM) communique avec les usines du monde entier, comme les USA, la Chine et la France.

Le processus commence dès que l'usine reçoit la commande et la valide, programme la production en fonction de sa capacité et du calendrier de fabrication puis fixe une date appelée Factory Promised Date (FPD).

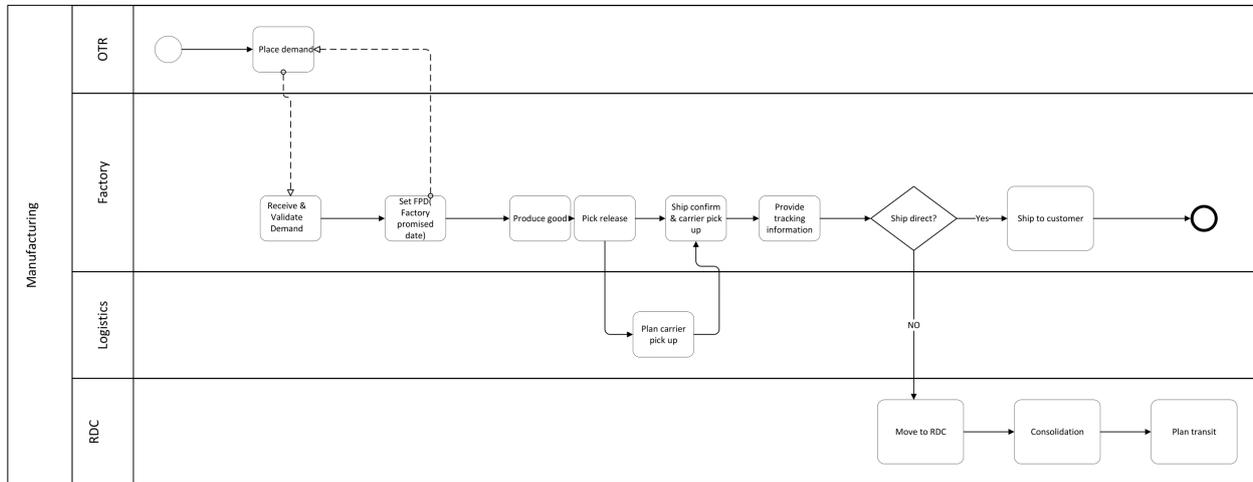


FIGURE 1.16 – BPMN Manufacturing

4-Distribution

Une fois les produits fabriqués, ils sont préparés pour l'expédition à travers une étape appelée Pick Release. La logistique prend ensuite le relais en planifiant l'enlèvement des marchandises avec le transporteur. Une fois le "pick" confirmé, les informations de suivi sont communiquées au client. Deux scénarios de livraison sont alors possibles : soit la commande est expédiée directement au client final cas de livraison national, soit elle est d'abord acheminée vers un centre de distribution régional (RDC) ou un centre de consolidation(cas d'exportation). Dans le second cas, la commande poursuit son traitement logistique (consolidation, planification du transit) avant d'être livrée au destinataire final.

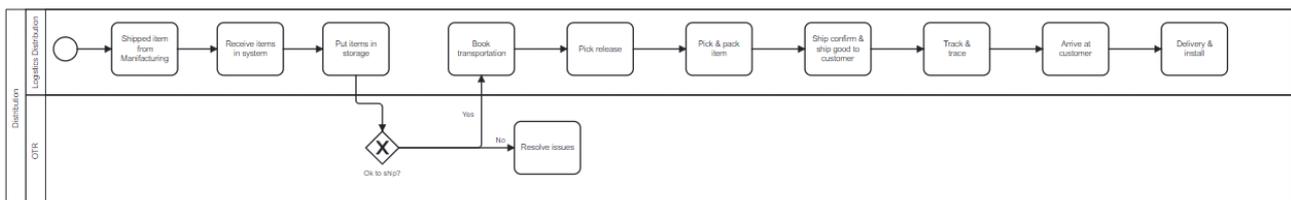


FIGURE 1.17 – BPMN Distribution

Réseau de distribution de GE Healthcare

Afin de mieux comprendre le fonctionnement du "Networking" d'un point de vue géographique, nous avons choisi de modéliser le réseau de fournisseurs(au niveau international) et le réseau de client(au niveau national), en utilisant le Geographic Based Mapping.

a- Réseau de distribution international

Étant donné que GE Healthcare n'a pas d'activités de production en Algérie, l'entreprise importe ses équipements depuis ses différentes usines réparties à travers le monde. Ces usines répondent aux commandes en fonction de la demande spécifique. Le choix des sites de production varie selon le segment concerné : certaines pièces de l'équipement sont fabriquées dans un pays, d'autres dans un second, tandis que la consolidation finale peut avoir lieu dans un troisième pays. Ce processus de fabrication et d'assemblage est donc segment-dépendant et s'adapte aux spécificités logistiques et industrielles de chaque produit.

Les figures suivantes représentent le réseau international de fabrication et de consolidation en fonction du segment : Imaging, US, PCS.

a.1- Réseau International Imaging :

Production : États-Unis d'Amérique, Chine, France, Mexique, Suède.

Consolidation : France

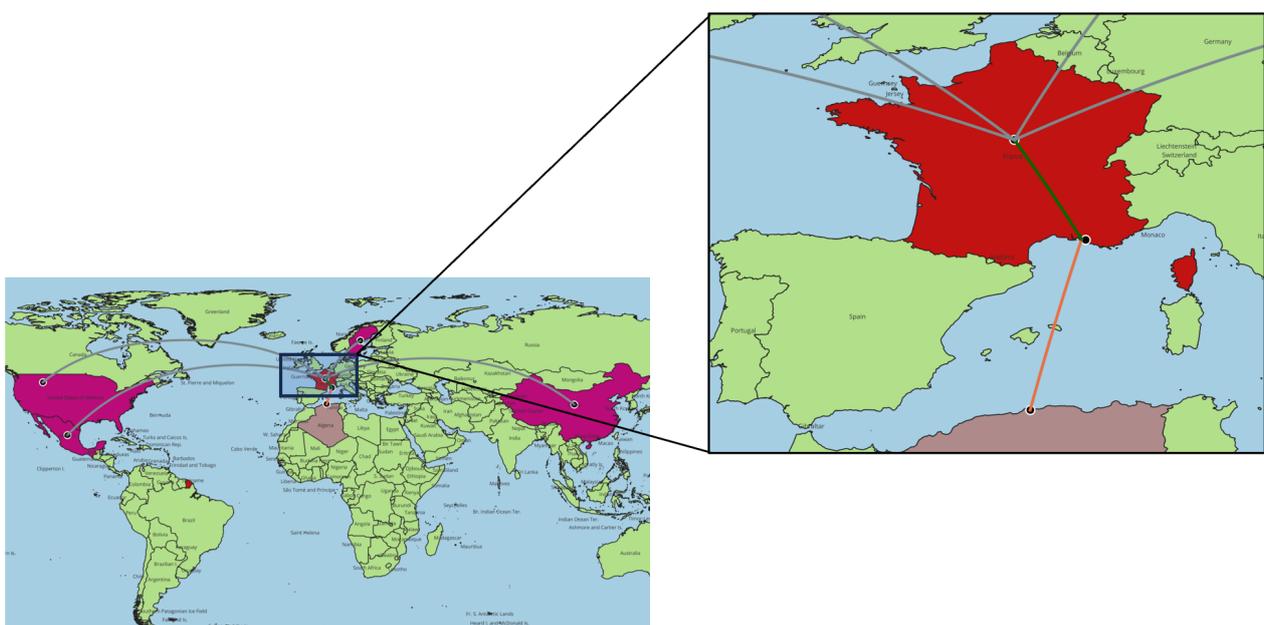


FIGURE 1.18 – Réseau international Imaging

a.2- Réseau International Ultrasons(US) :

Production : Allemagne, Autriche, Chine, Mexique, Corée du Sud, Norvège.

Consolidation : Allemagne, Autriche.

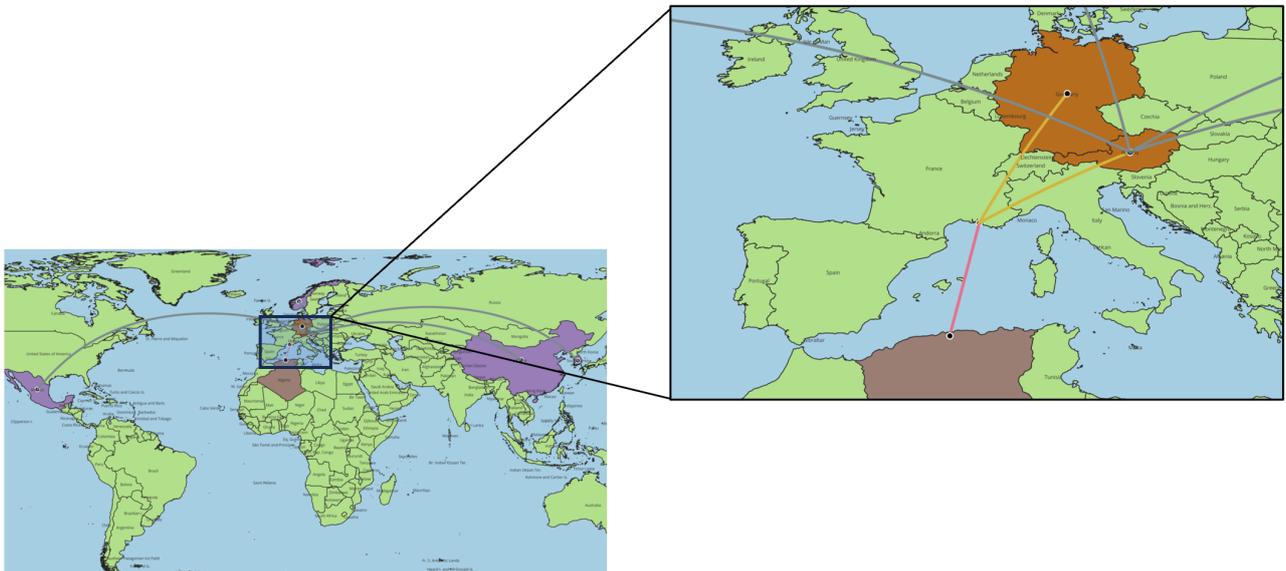


FIGURE 1.19 – Réseau international US

a.3- Réseau International Patient Care Solution (PCS) :

Production : États-Unis d'Amérique, Chine, Finlande, France, Inde.

Consolidation : Allemagne.

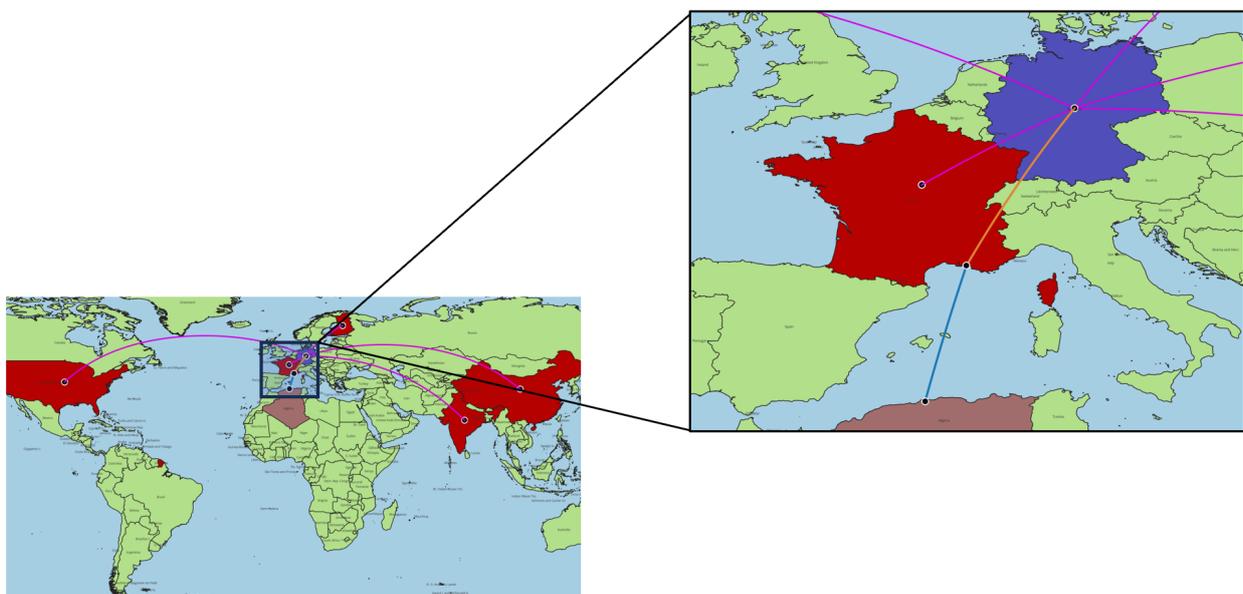


FIGURE 1.20 – Réseau international PCS

b- Réseau Géographique de distribution National clients en 2024

Les clients imaging sont majoritairement concentrés autour de la Zone centre



FIGURE 1.21 – clients imaging

Les clients US sont majoritairement répartis dans le Nord d'Algérie.

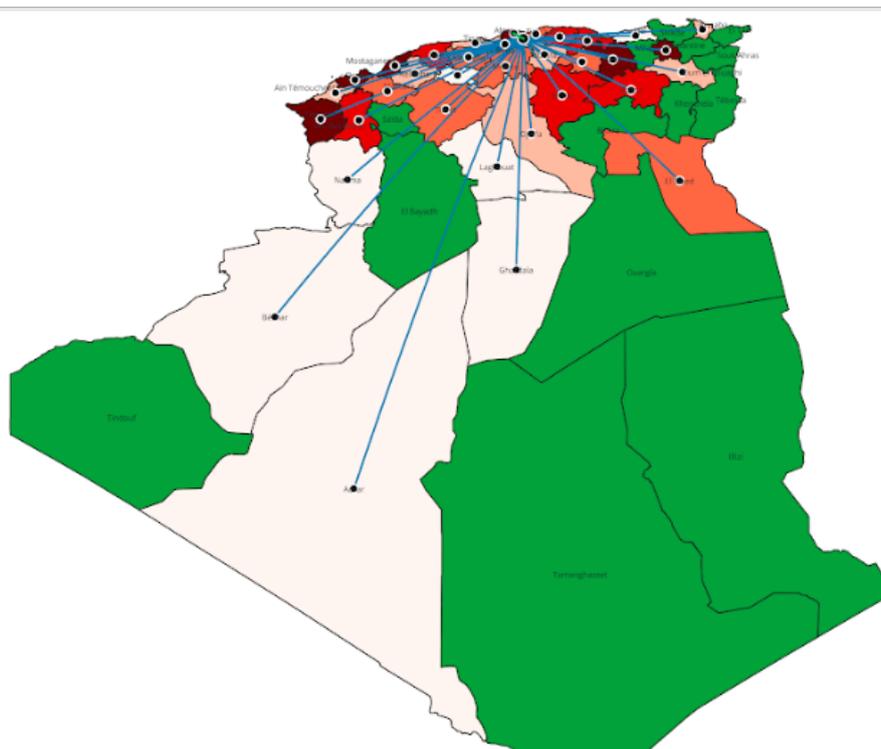


FIGURE 1.22 – clients US.

Les clients PCS sont plus concentrés dans la zone Ouest.

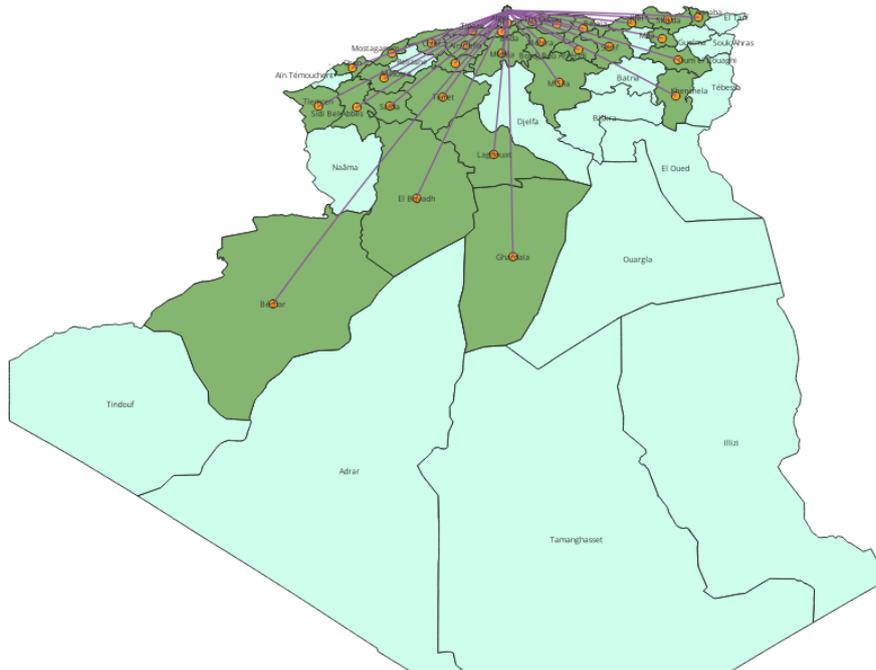


FIGURE 1.23 – clients PCS.

5-Service après vente

L'un des principaux avantages concurrentiels de GE Healthcare réside dans la qualité de son service, notamment à travers un service après-vente assuré pendant au moins 10 ans. En moyenne, la durée de vie d'une génération de machines est de 10 ans, avant d'être remplacée par de nouveaux modèles plus performants intégrant des technologies plus avancées.

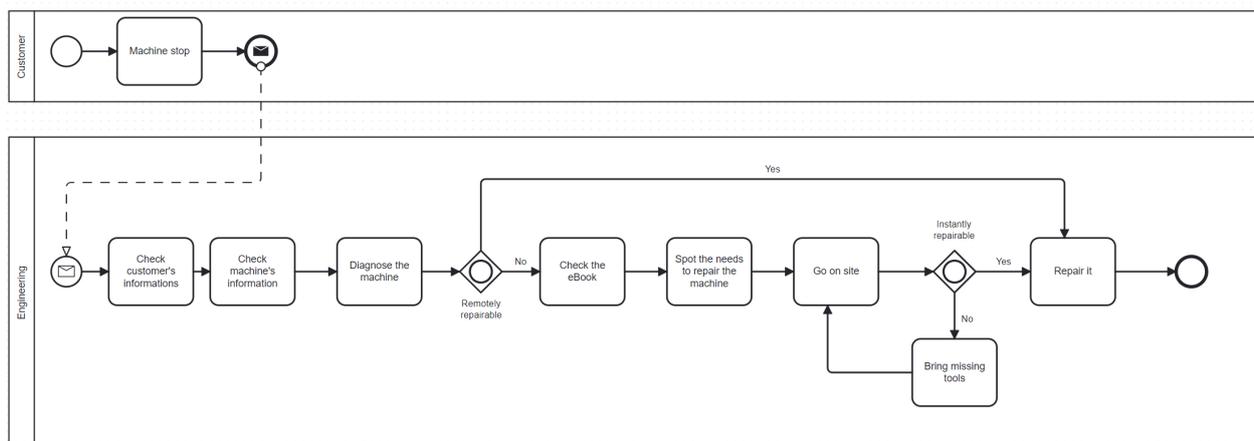


FIGURE 1.24 – BPMN Service Après Vente

Le service après-vente de GE Healthcare est structuré de manière méthodique afin d'assurer une prise en charge rapide et efficace des incidents rencontrés par les clients.

Lorsque la machine s'arrête, le client déclenche une alerte. L'équipe d'ingénierie commence par vérifier les informations du client ainsi que celles de la machine concernée. Une fois ces vérifications effectuées, une phase de diagnostic est réalisée afin d'identifier l'origine du problème.

Si la machine est réparable à distance, la réparation est immédiatement effectuée. Dans le cas contraire, l'ingénierie consulte la documentation technique (e-book) pour mieux cerner les besoins en réparation.

Lorsque la réparation ne peut être réalisée à distance, un déplacement sur site est planifié. Sur place, l'équipe évalue si la machine est instantanément réparable avec les moyens disponibles. Si oui, la réparation est effectuée immédiatement. Sinon, les pièces manquantes et outils nécessaires sont identifiés et rapportés lors d'une seconde intervention pour finaliser la réparation. Mais cela arrive dans de rares cas car l'équipe de maintenance se déplace rarement avant d'avoir la certitude que la panne sera réparée à la première visite

Ce processus garantit une réactivité optimale tout en minimisant les temps d'arrêt des équipements médicaux critiques, contribuant ainsi à maintenir la satisfaction client et la performance des installations.

Le Service Après Vente s'occupe également d'assurer, des maintenances préventives et curatives de leurs clients. Des ingénieurs spécialisés, formés directement par l'entreprise, sont responsables de la réparation et de l'entretien de ces machines en suivant des procédures et des directives techniques précises, rigoureusement définies et mises à jour quotidiennement

Le Wing-to-Wing process illustre la rigueur et l'organisation sur lesquelles repose l'activité de GE Healthcare, depuis la commande jusqu'à l'installation finale des équipements. Cette approche intégrée, appuyée par des outils de modélisation clairs, permet non seulement d'assurer une exécution fluide des opérations, mais aussi de renforcer la collaboration entre les différents acteurs internes. Elle constitue un cadre structurant essentiel pour garantir la satisfaction client et la continuité du service.

1.4.2 Bilan d'exploitation des équipements

a-Analyse des commandes et des ventes

A partir de l'historique des ventes et des commandes par segment (Imaging, US, PCS) durant les années 2022, 2023 et 2024. Nous avons obtenu les résultats suivants :

-Les ventes pour l'année 2024 :

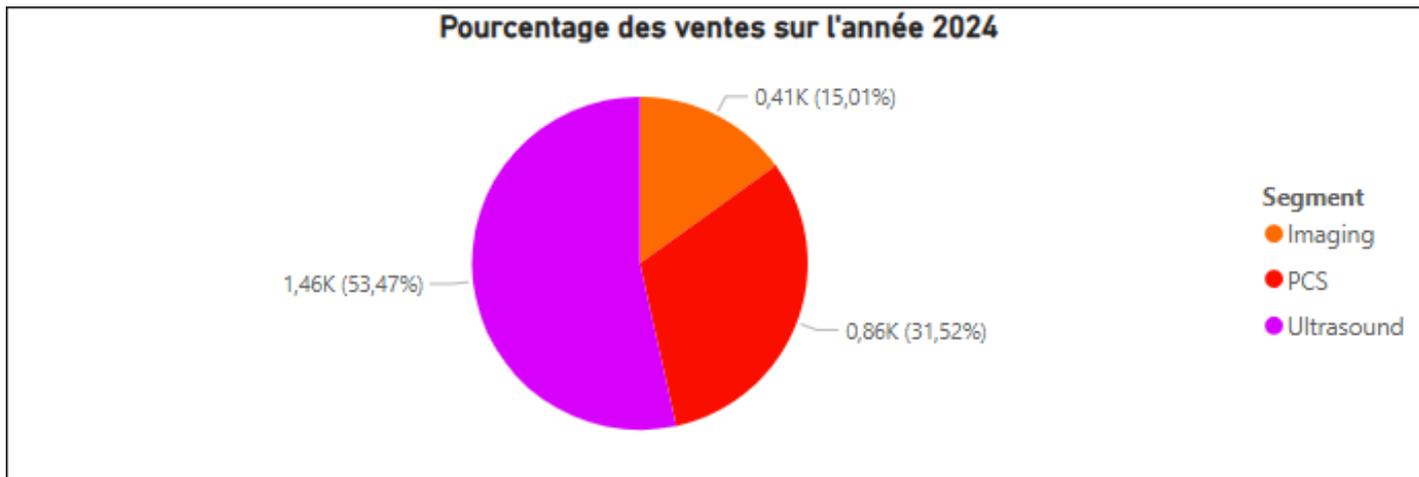


FIGURE 1.25 – Pourcentage de ventes par segment

D'après ces résultats, nous pouvons constater que 53,47% des équipements vendus sont de type Ultrasound, 31,52 % sont de type PCS et 15,01% des ventes sont de type Imaging.



FIGURE 1.26 – Client GE Healthcare 2024

Nous pouvons également constater que les commandes passées concernent majoritairement la partie Est d'Algérie.

-Commandes des clients par segments :

Nous allons analyser et comparer les commandes des clients du premier trimestre de 2025 :

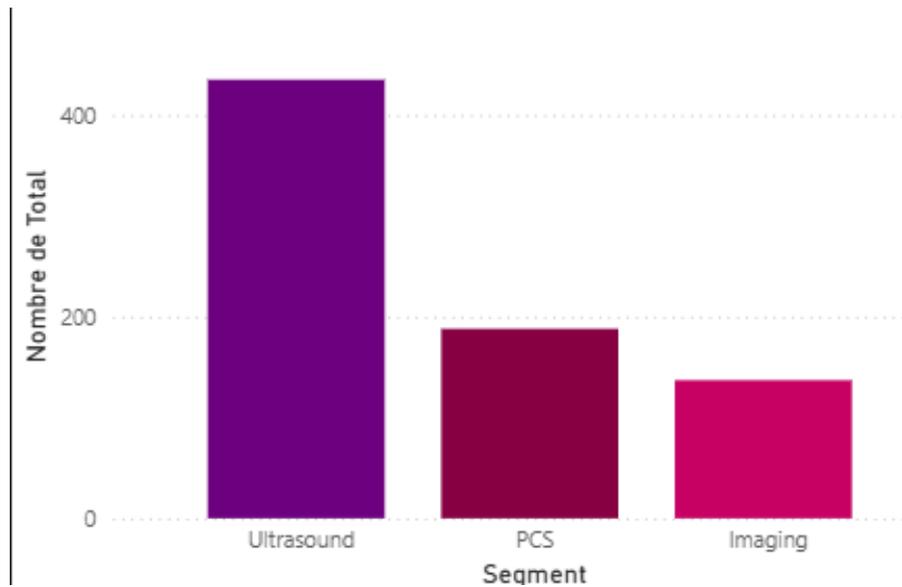
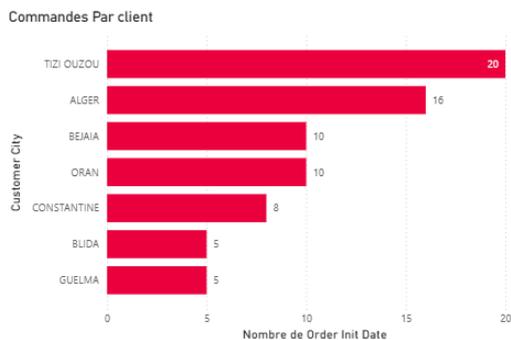


FIGURE 1.27 – Commandes du premier trimestre 2025

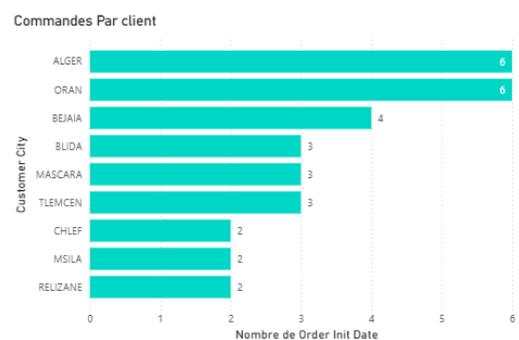
D’après ces résultats nous pouvons conclure que les commandes sont majoritairement pour les Ultrasons et les PCS.

b-Les commandes client durant le premier trimestre de 2025 :

Afin d’appuyer les résultats précédents, nous avons procédé à l’analyse des commandes passées durant le premier trimestre de 2025(Janvier, Février, Mars) afin de déterminer la concentration des clients par segments.



(A) Imaging



(B) US



(C) PCS

FIGURE 1.28 – Volume des commandes clients par wilaya et par segment

Ainsi, à partir de ces résultats nous pouvons observer la concentration des clients.

-Pour les équipements US les clients sont majoritairement concentrés à Alger, Oran et Bejaia.

-Pour les équipements Imaging la concentration des clients est autour d'Alger et de Tizi Ouzou.

-Pour les équipements PCS la demande est plus élevée à Ghardaia, Oran, Alger et Tizi Ouzou.

c-Analyse des coûts logistiques :

Toutes les livraisons sont assurées par Aramex depuis Khemis EL Khechna vers tout le territoire national qui pourrait engendrer des coûts logistiques élevés, c'est pour cela que nous avons visualisé les coûts de transport et de ce qui y est relatif par rapport à l'ensemble des coûts logistiques de l'entreprise.

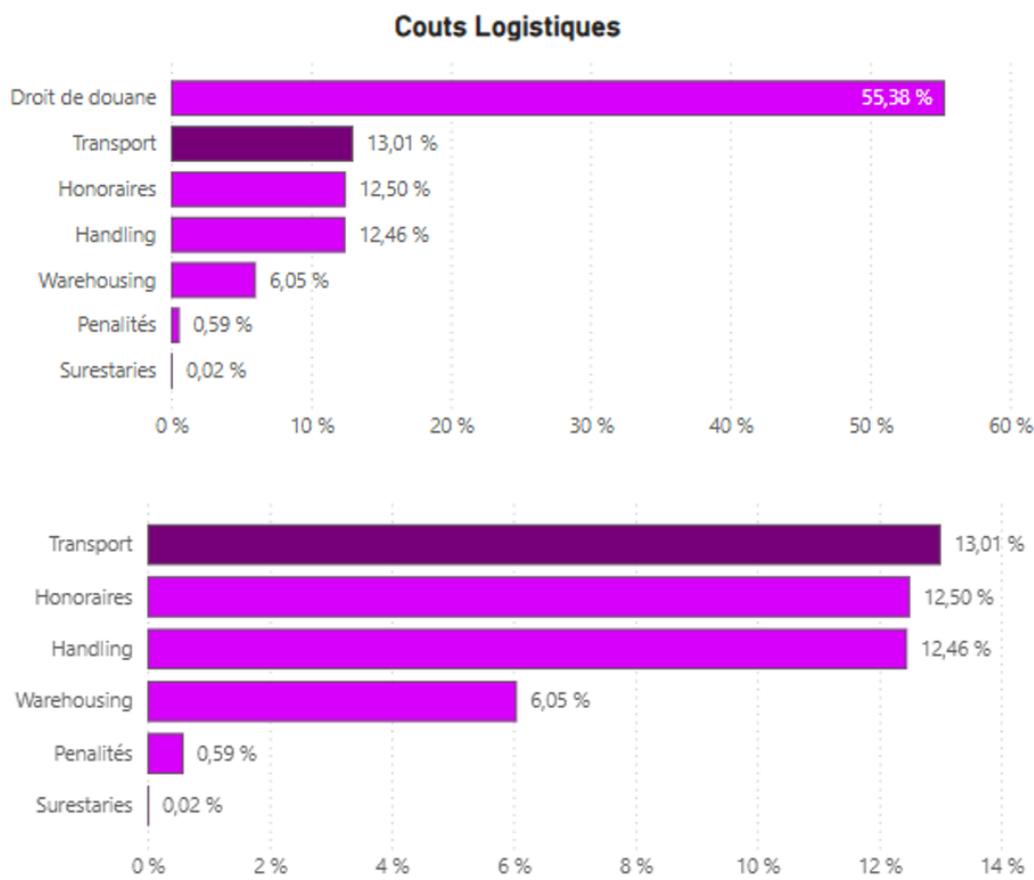


FIGURE 1.29 – Les coûts logistiques du premier trimestre de 2025

Nous pouvons constater qu'en dehors des droits de douanes qui ne changent pas, les coûts de transport, les honoraires et les coûts de manutention qui sont liés contribuent énormément à l'augmentation des coûts logistiques.

d-Distances parcourues et coût par camion de transport :

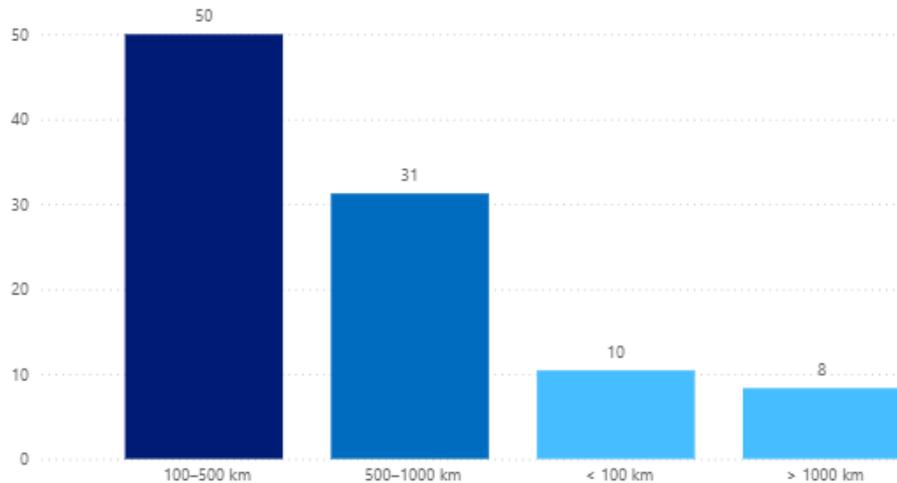


FIGURE 1.30 – Pourcentage des distances parcourues

Cette figure nous montre le pourcentage des distances entre les clients et l'entrepôt, ce qui représente un problème pour l'entreprise, parce qu'il cause des coûts de distributions élevés et des retards pour l'opération de livraison. Sachant que l'on peut observer que 50% des opérations de livraisons concernent les clients qui se trouvent entre 100 et 500 km, et 31% entre 500 et 1000 km.

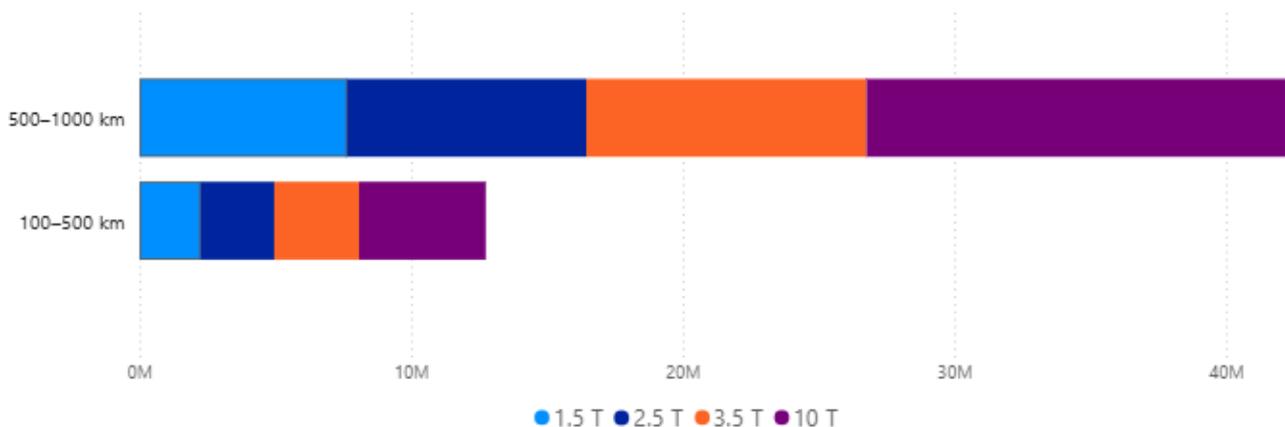


FIGURE 1.31 – Evolution des coûts des distances parcourues par type de camions

La figure suivante nous montre le taux d'utilisation des Camion 1.5 T, 2.5 T, 3.5 T et 10 T par segment, nous pouvons constater que les ultrasons utilisent la majorité de ses machines.

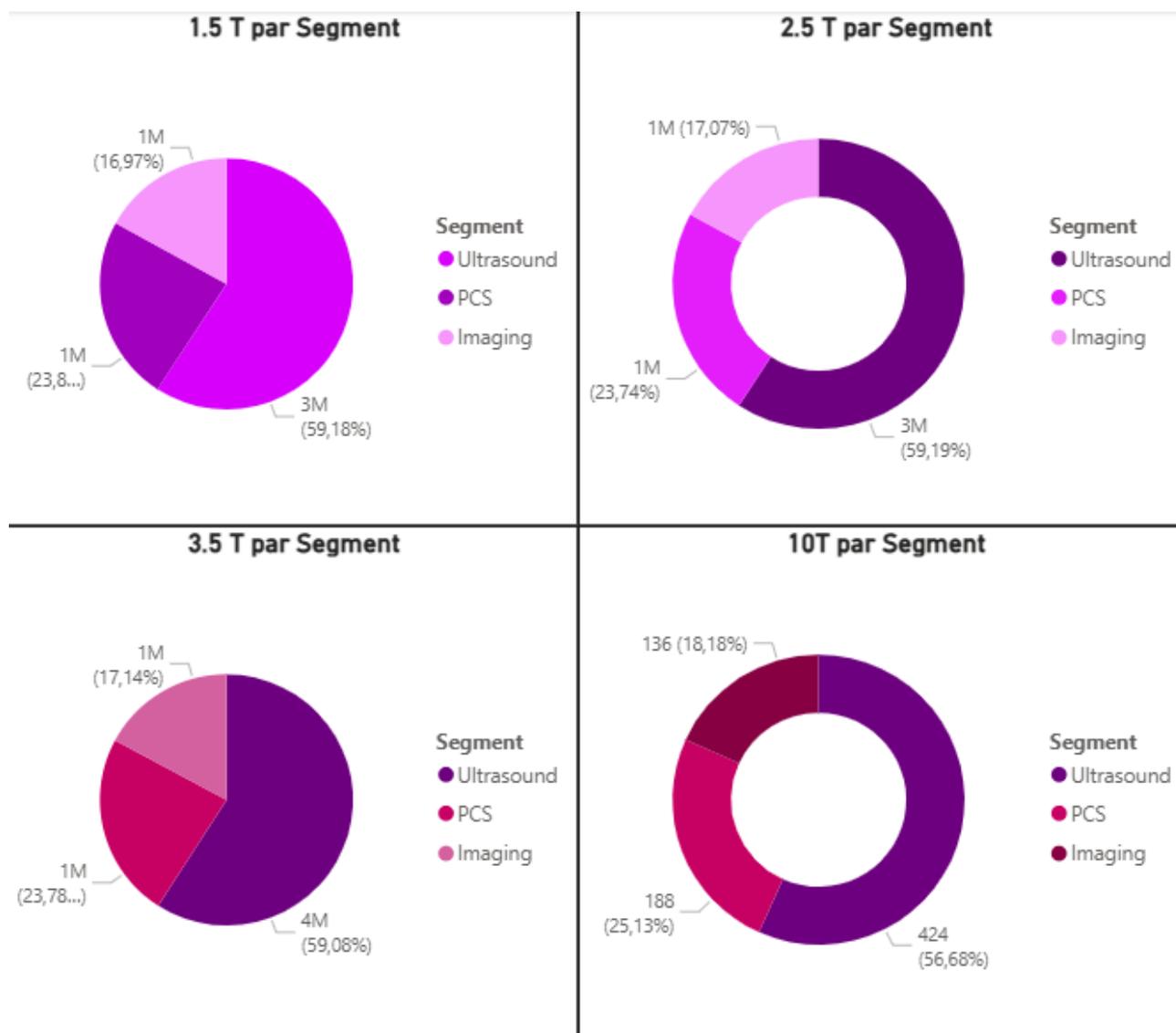


FIGURE 1.32 – Taux d'utilisation des différents camions de transport par segment.

1.4.3 Analyse des activités de support après livraison

Avant de faire une intervention, il est impératif de s'assurer d'avoir la pièce de rechange adéquate, afin de garantir le bon fonctionnement de la machine dès la première visite.

Cette exigence est une condition impérative, car il est important de rappeler que GE Healthcare se distingue de ses concurrents principalement par la qualité, la réactivité et l'efficacité de son service après-vente. Ne pas résoudre le problème dès la première intervention peut entraîner des conséquences sur l'image de l'entreprise et la satisfaction client.

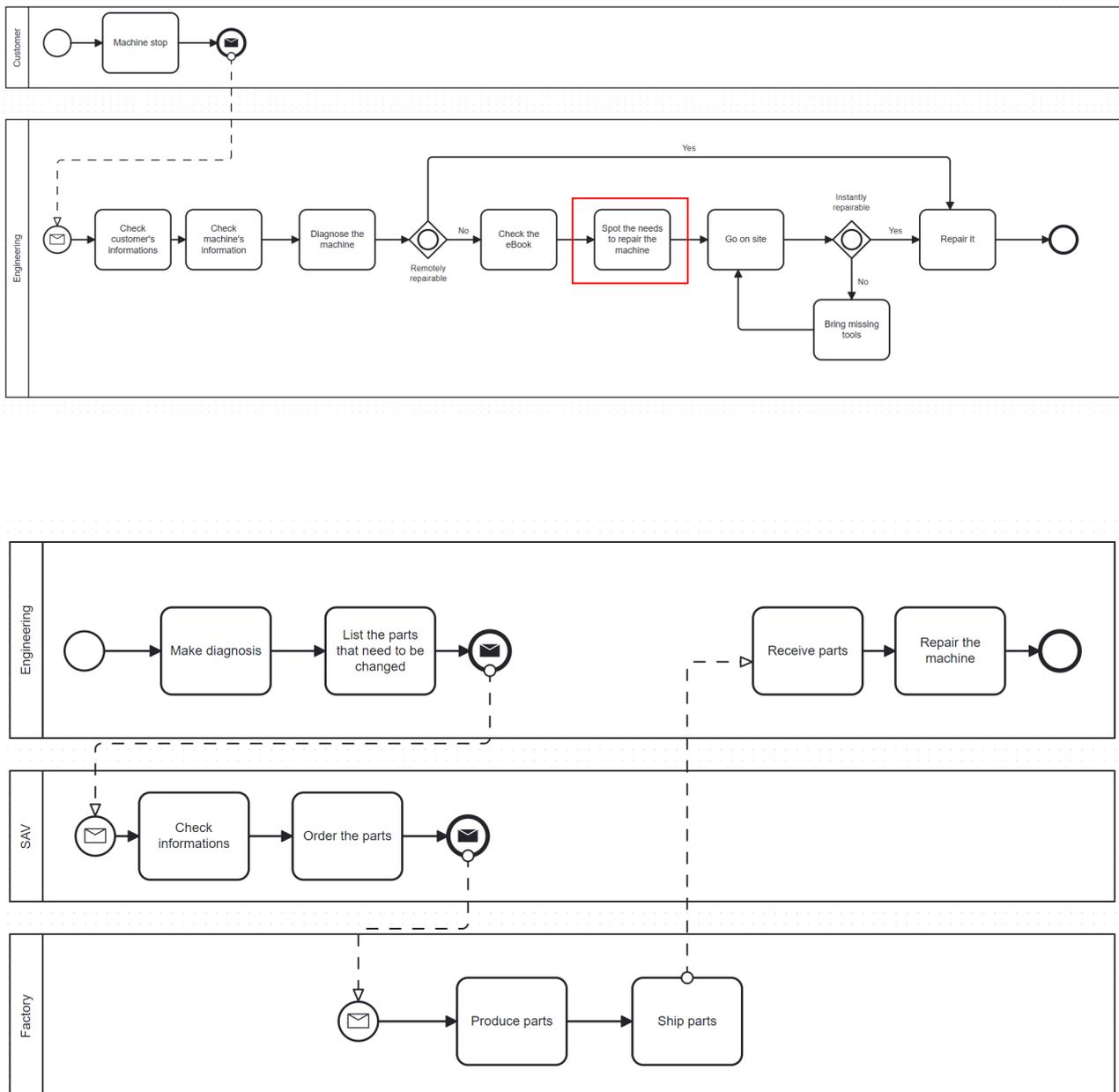


FIGURE 1.33 – BPMN d'une intervention de maintenance

La législation algérienne interdit formellement l'importation de pièces usées, et ce, même si la pièce concernée est encore au tout début de son cycle de vie et reste parfaitement fonctionnelle. Cette contrainte réglementaire impose donc à l'entreprise l'obligation de commander exclusivement des pièces neuves, souvent auprès de fournisseurs répartis sur plusieurs continents.

Cette situation génère des coûts particulièrement élevés, impactant directement la gestion financière et logistique de l'entreprise :

-Achats de pièces neuves : obligation d'acquérir des pièces d'origine, neuves et certifiées.

-Importation des pièces par avion : pour répondre aux exigences de rapidité d'intervention et minimiser les temps d'arrêt des machines, les pièces sont importées par transport aérien, solution rapide mais extrêmement coûteuse.

-Frais de douane : à l'entrée sur le territoire national, les pièces importées sont soumises à des frais de dédouanement, calculés en fonction de la valeur des marchandises et de leur catégorie tarifaire.

-Taxes de sortie de l'aéroport : une fois les formalités douanières accomplies, des frais supplémentaires sont exigés pour la récupération des marchandises sur la zone aéroportuaire.

-Frais de stockage temporaire : en cas de retard ou de problème administratif, des frais de garde peuvent être facturés par l'aéroport ou l'entrepôt de transit.

-Frais d'assurance transport : afin de couvrir les risques liés au transport aérien (perte, vol, détérioration), une assurance complémentaire est souvent souscrite, représentant un coût supplémentaire non négligeable.

-Frais de manutention et de dégroupage : lors de la réception des pièces, des frais de traitement, de vérification et de préparation logistique peuvent être appliqués avant leur acheminement vers les sites d'intervention.

-Analyse des coûts liés à l'importation des pièces détachées

Lors de cette analyse, nous allons nous concentrer sur l'évolution des coûts assumés par GE Healthcare au cours des sept dernières années, en lien direct avec l'importation des pièces détachées nécessaires à la maintenance de ses équipements.

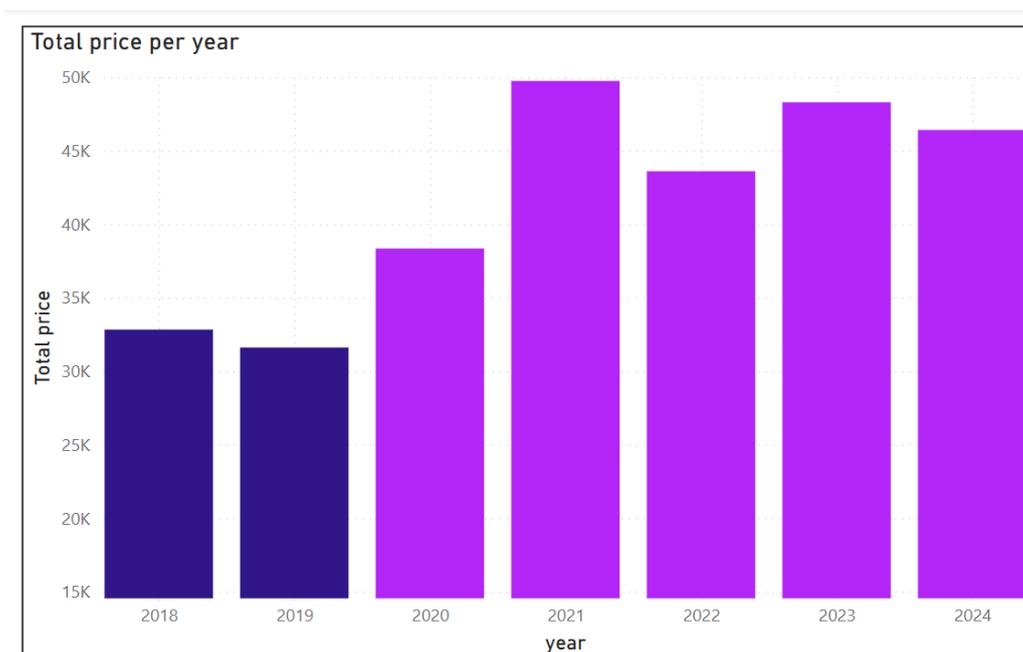


FIGURE 1.34 – Evolution des prix d'importation des pièces de 2018 à 2024

Par souci de confidentialité, les données financières utilisées dans cette étude ont été volontairement biaisées par l'application d'un paramètre inconnu, afin de préserver la sensibilité des informations et d'éviter toute divulgation de données stratégiques de l'entreprise. Néanmoins, ce biais n'altère en rien l'interprétation globale des tendances observées.

Le diagramme en barres présenté illustre les montants globaux payés chaque année par GE Healthcare pour l'achat cumulé de toutes les pièces importées. L'analyse visuelle et chiffrée de ces données révèle une augmentation considérable des coûts d'achat auprès des usines partenaires au fil du temps. Cette hausse est multifactorielle : elle peut notamment s'expliquer par l'inflation mondiale, l'impact économique de la crise sanitaire liée à la COVID-19, ainsi que par la flambée des prix des matières premières nécessaires à la fabrication des pièces. D'autres éléments comme l'augmentation des coûts logistiques et des frais de transport international ont également contribué à alourdir la facture finale.

Afin de mieux comprendre cette évolution, nous allons diviser notre étude en deux périodes distinctes :

-Avant la crise sanitaire liée à la COVID-19 (2018–2019) : durant cette période, les coûts d'acquisition des pièces (prix d'achat uniquement, hors frais annexes tels que le transport, les taxes ou le stockage) étaient relativement stables, avec une moyenne enregistrée d'environ 31 500 dollars par an.

-Après l'apparition de la COVID-19 (2020–2024) : durant cette seconde période, marquée par d'importantes perturbations économiques mondiales, la moyenne annuelle des seuls coûts d'achat des pièces a significativement augmenté pour atteindre environ 45 000 dollars, toujours hors frais logistiques, douaniers et administratifs.

Ce passage d'une moyenne de 31 500 dollars à 45 000 dollars correspond à une augmentation de l'ordre de 43%, traduisant l'ampleur de l'impact que la conjoncture mondiale et les facteurs économiques externes ont eu sur les opérations d'approvisionnement de GE Healthcare.

Le graphique suivant est plus représentatif de l'escalade de ces prix :

Total price par year

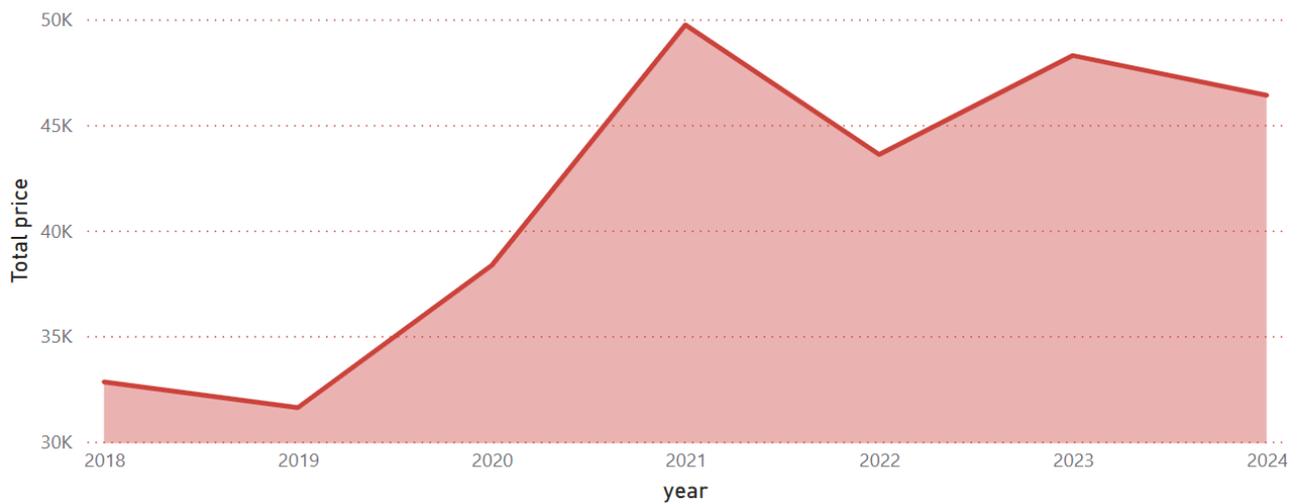


FIGURE 1.35 – Représentation graphique de l'Évolution des prix d'importation des pièces de 2018 à 2024

Après avoir présenté l'évolution globale du coût des pièces détachées sur les sept dernières années, il est pertinent d'examiner de plus près le comportement individuel de certaines pièces représentatives. Cette analyse plus fine permet de mieux comprendre les disparités observées, d'identifier les postes les plus coûteux, et d'orienter de manière ciblée les axes d'optimisation.

Pour des raisons de confidentialité, les pièces concernées seront désignées sous les noms de pièce A, pièce B, pièce C et pièce D.

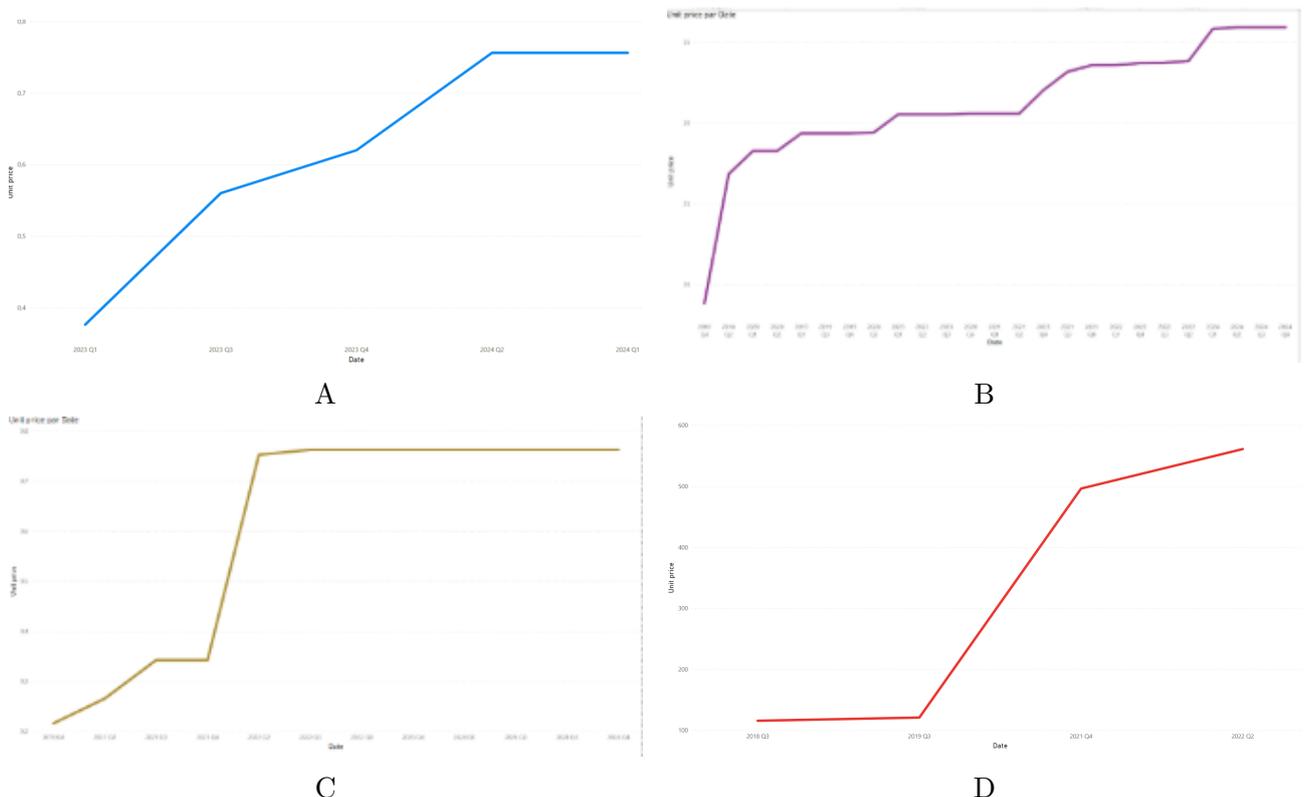


FIGURE 1.36 – Exemple d'évolution de quelques pièces de rechange

Pièce	Prix de première commande (\$)	Prix de dernière commande (\$)	Augmentation de :
A	0,22 \$	0,76 \$	245,45 %
B	19,36 \$	35,92 \$	85,55 %
C	0,36 \$	0,76 \$	111,11 %
D	115,68 \$	560,95 \$	384,93 %

Exemple d'évolution des coûts quelques pièces de rechange.

Bilan carbone lié à l'importation des pièces détachées

Dans la continuité du diagnostic économique précédemment établi, il est essentiel d'aborder une dimension aujourd'hui incontournable dans toute activité industrielle ou logistique : **l'impact environnemental**. Plus précisément, l'importation régulière de pièces détachées par GE Healthcare Algérie engendre des émissions significatives de gaz à effet de serre (GES), en particulier du dioxyde de carbone (CO₂), contribuant au réchauffement climatique. Ce volet vise donc à quantifier l'empreinte carbone de ces opérations d'importation, afin de proposer par la suite des leviers d'amélioration responsables.

Comme établi précédemment, la législation algérienne interdit l'importation de pièces usagées, obligeant GE Healthcare à commander des pièces neuves depuis l'étranger, principalement depuis l'Europe, l'Amérique du Nord ou l'Asie, qui seront toutes rapatriées vers le centre de stockage de Saint-Witz avant d'être expédiées par avion depuis l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle vers l'aéroport international d'Alger Houari Boumediène. La voie aérienne constitue un mode logistique rapide, mais également l'un des plus polluants en termes d'émissions de CO₂ par kilogramme transporté.

L'estimation des émissions de gaz à effet de serre associées à l'importation des pièces détachées repose sur une approche quantitative normalisée, permettant d'évaluer les impacts environnementaux du transport en fonction des volumes déplacés, des distances parcourues et du mode logistique utilisé.

Le calcul s'appuie sur la formule de base appliquée dans la comptabilité carbone des flux logistiques :

$$\text{Émissions (kg CO}_2\text{e)} = \text{Distance (km)} \times \text{Poids (tonnes)} \times \text{Facteur d'émission} \quad (1.1)$$

Les données mobilisées pour ce calcul comprennent :

- **Le poids total annuel** des pièces importées, exprimé en tonnes, déterminé à partir de la consolidation des données logistiques de l'année 2024, qui est de **29,89 tonnes**.
- **La distance parcourue** par les marchandises, estimée sur la base du trajet standard entre le centre logistique de Saint-Witz (France) et le site de réception à Alger, via l'aéroport Paris-Charles de Gaulle et l'aéroport Houari Boumédiène, soit une distance aérienne approximative de **1 350 kilomètres**.
- **Le facteur d'émission** applicable au transport de fret par voie aérienne, référencé dans la Base Carbone de l'ADEME, fixé à **0,602 kg CO₂e par tonne.kilomètre**.

Le calcul des émissions s'effectue selon la formule suivante :

$$\text{Émissions (kg CO}_2\text{e)} = 1\,350 \times 29,89 \times 0,602 \quad (1.2)$$

$$\text{Émissions (kg CO}_2\text{e)} \approx 24\,290,2 \quad (1.3)$$

1.5 Énoncé de la problématique

GE Healthcare Algérie occupe une position clé dans le secteur de la santé en tant que fournisseur de solutions technologiques avancées, notamment par l'importation et la vente de machines médicales

Après avoir présenté l'entreprise, son marché, ses activités ainsi que réalisé un diagnostic interne du wing to wing process et de son réseau de distribution, l'étude détaillée des coûts logistiques a permis de constater que les coûts de transport représentent une part significative des coûts logistiques. Ces coûts élevés sont en grande partie dus aux longues distances parcourues par les camions pour assurer les livraisons à partir d'un seul entrepôt pour tout le territoire.

Par ailleurs, afin d'assurer la bonne qualité du service après-vente et de la maintenance de ces équipements, l'entreprise dépend fortement de l'importation de pièces de rechange neuves notamment depuis Saint Witz, France. Toutefois, cette dépendance génère des coûts élevés, une empreinte carbone préoccupante et des délais d'approvisionnement importants, impactant à la fois la rentabilité de l'entreprise et la satisfaction client.

Cette situation soulève des interrogations quant à la pertinence de la structure actuelle de la Supply Chain. Ainsi, une réflexion s'impose sur une éventuelle réorganisation logistique visant à optimiser la couverture géographique, réduire les distances parcourues, et par conséquent, diminuer les coûts de transport ainsi que l'impact environnemental. Dans cette même logique, il devient également stratégique d'envisager l'optimisation du processus de récupération de pièces détachées encore fonctionnelles à partir de machines déjà sur le marché. Ce processus de "harvest" permettrait non seulement de réduire les coûts d'importation, mais aussi de renforcer l'efficacité logistique et environnementale de l'entreprise.

En effet, ceci nous conduit à formuler la problématique suivante :

« Comment repenser la structure de la chaîne logistique de GE Healthcare Algérie pour optimiser le Wing to Wing process ? »

Cette question se décline en trois sous-questions principales :

1. Comment optimiser la distribution des équipements médicaux à l'échelle nationale tout en réduisant les coûts logistiques ?
2. Comment améliorer le processus de récupération des pièces des équipements médicaux afin de limiter les coûts d'importation ?
3. Comment réduire l'empreinte carbone globale de la chaîne logistique ?

1.6 Conclusion du chapitre

Ainsi, l'étude de l'existant à travers ses trois sections, nous a permis de cerner les enjeux du secteur des dispositifs médicaux, de comprendre le positionnement de GE Healthcare Algérie et d'identifier les pistes d'amélioration quant à la conception de sa supply chain actuelle à travers le diagnostic réalisé. Pour introduire la solution envisagée, il est important de poser les bases conceptuelles de la problématique constitueront l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Introduction

Dans un contexte où la demande en termes de dispositifs médicaux est en constante évolution, les entreprises du secteur sont confrontées à la nécessité de concevoir un réseau logistique performant, durable et résilient.

La distribution et le transport sont les éléments fonctionnels les plus importants des activités logistiques, et leur bonne conception constitue un avantage concurrentiel à toutes les parties prenantes.

Ce chapitre, fondamental à notre projet, abordera les notions essentielles liées à la supply chain et à la logistique, il présentera la supply chain design, les différents problèmes qui y sont associés, ainsi que les méthodes de résolution existantes.

2.2 Closed loop Supply Chain dans l'industrie des dispositifs médicaux

Le Supply chain management(SCM) peut être défini comme l'interconnexion des organisations impliquées dans la chaîne logistique. Qu'il s'agisse des clients ou des fournisseurs, cette interconnexion est assurée par des liaisons en amont et en aval qui nécessitent une coordination entre les parties concernées. Pour produire un produit final ou fournir un service donné au consommateur, plusieurs activités et processus sont nécessaires pour atteindre cet objectif (Mentzer et al. (2001) et Chopra Meindl (2015)) Bien que les principes de la SCM soient universels, leur application varie selon les secteurs d'activité, dans notre cas nous traiterons la Supply chain des dispositifs médicaux ainsi que les spécifications de cette dernière.

2.2.1 Logistique et Supplychain management :

La logistique désigne le processus de coordination, de gestion et de déplacement des ressources, qu'il s'agisse de personnes, de matériaux, d'équipements ou de stocks depuis leur point d'origine jusqu'à leur destination finale. L'objectif principal est d'optimiser ces flux afin de réduire les coûts, tout en assurant une disponibilité adéquate des ressources au bon endroit et au bon moment.

Dans les entreprises industrielles, la logistique ne se limite plus au simple transport ou au stockage. Elle s'étend en amont vers les fonctions d'approvisionnement et d'achat, et en aval vers la distribution et la gestion commerciale.

Cette extension naturelle du champ d'action logistique a donné naissance à une approche plus globale : la Supply Chain Management (SCM).

La SCM représente aujourd'hui une vision intégrée de la logistique, qui ne se contente plus de gérer les flux internes à une entreprise, mais vise à coordonner et optimiser l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur : fournisseurs, sous-traitants, prestataires logistiques, distributeurs et clients. Cette approche repose sur la collaboration, la transparence des données, et une planification fine des ressources, dans le but d'aligner au mieux l'offre avec la demande.

Une chaîne logistique est fréquemment décrite comme un enchaînement d'activités et d'acteurs reliant le fournisseur du fournisseur au client du client. Elle couvre l'ensemble des étapes nécessaires à la conception, la production, la distribution et la livraison d'un produit ou service, en intégrant aussi bien les flux physiques que les flux d'informations et financiers. Cette vision étendue permet de comprendre la supply chain comme un réseau interconnecté, dans lequel chaque maillon a un impact direct sur la performance globale et la satisfaction du client final.

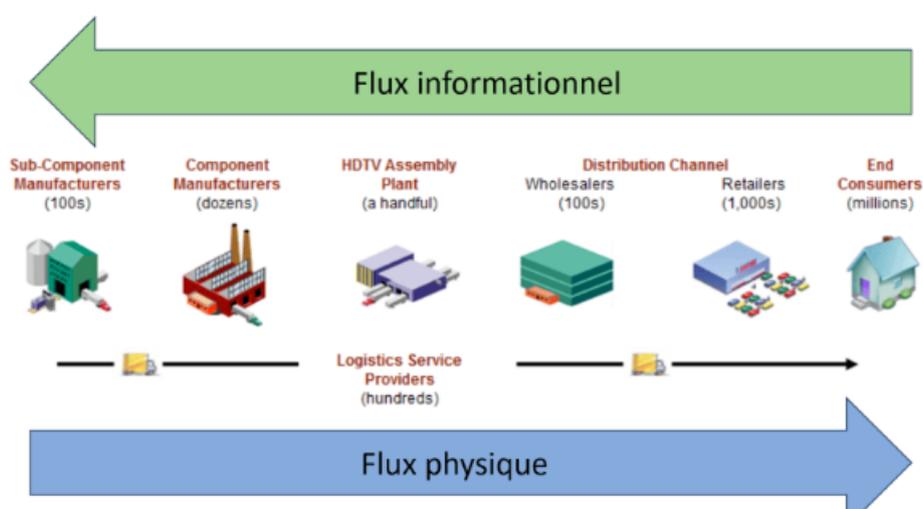


FIGURE 2.1 – Structure des flux de la Supply Chain(Cours SCM)

Dans un contexte économique marqué par une concurrence accrue et une demande croissante d'exigence, le SCM occupe une place stratégique au sein des entreprises. Une gestion performante de la chaîne logistique constitue aujourd'hui un levier essentiel de compétitivité, permettant de réduire les coûts, d'améliorer les délais de livraison, et d'accroître la satisfaction client. Conscientes de ces enjeux, de nombreuses entreprises, issues de secteurs aussi variés que l'automobile, l'industrie pharmaceutique, l'aéronautique, l'industrie des gaz ou encore le luxe, investissent massivement dans l'optimisation de leur supply chain. Pour ces acteurs, maîtriser et moderniser leur logistique est devenu un facteur clé de différenciation et de pérennité sur des marchés toujours plus exigeants.

2.2.2 Durabilité et Closed loop Supply chain

La Sustainable Supply Chain Management (SSCM) est défini comme étant la gestion des flux d'informations, de capitaux et de matériaux, tout en assurant l'interopérabilité entre les entreprises et les parties prenantes tout au long de la chaîne logistique, en prenant simultanément en compte les trois dimensions du développement durable : économique, environnementale et sociale. (Carter et Rogers, 2008) Le concept de durabilité repose sur trois dimensions fondamentales, souvent désignées sous le terme de triple bottom line, qui englobent la dimension environnementale, sociale et économique. Ce cadre stipule que toutes les entreprises, et en particulier les industries manufacturières, doivent prendre en compte ces trois aspects de manière simultanée et équilibrée afin de répondre aux objectifs du développement durable (Correia, 2019).

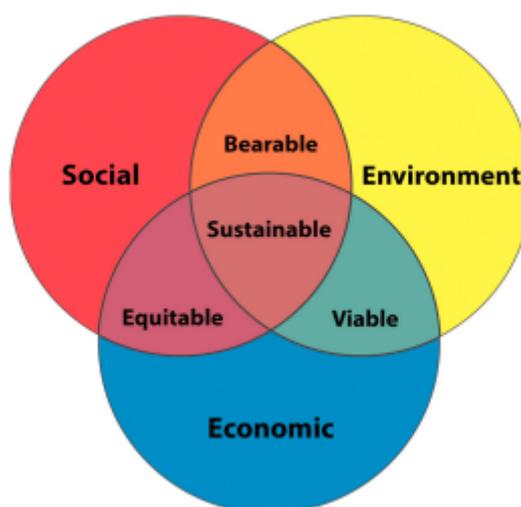


FIGURE 2.2 – Diagramme de Venn ((Nafea, M. ; Shihata, L.A. ; Mashaly, M.,page 6))

La véritable durabilité n'est atteinte que dans la zone centrale, où les trois dimensions se superposent parfaitement (Mani Delgado, 2018).

-Closed Loop Supply Chain et logistique inverse

La Closed-Loop Supply Chain (Supply chain en boucle fermée) désigne une approche intégrée de la gestion logistique, qui combine de manière cohérente les flux traditionnels de production et de distribution (du fournisseur au client) avec les flux inverses (du client vers l'entreprise). Contrairement aux chaînes logistiques classiques, la CLSC est conçue pour prendre en compte l'ensemble du cycle de vie des produits, depuis leur fabrication jusqu'à leur fin de vie, en intégrant des processus tels que le retour de produits usagés, leur réparation, leur remise à neuf, leur réutilisation, ou encore leur recyclage.

Cette approche est motivée non seulement par des contraintes réglementaires

croissantes en matière de durabilité et de gestion des déchets, mais également par des opportunités économiques liées à la récupération de valeur résiduelle dans les produits retournés.

D'un point de vue stratégique, la CLSC permet d'optimiser les performances économiques et environnementales de la chaîne logistique globale en favorisant une gestion circulaire des flux, dans une logique de développement durable. Elle se distingue de la simple logistique inverse par son intégration systémique : elle ne traite pas les flux retours de manière isolée, mais les planifie et les contrôle en lien direct avec les opérations amont (production, approvisionnement, distribution). Selon la revue exhaustive menée par Govindan et al. (2015), la CLSC représente aujourd'hui un champ de recherche en pleine expansion, avec de nombreux défis méthodologiques, notamment en matière de conception de réseaux, de coordination des acteurs, et de prise en compte de l'incertitude dans les retours.

La logistique inverse est le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle d'un flux efficace et rentable de matières premières, de stocks en cours, de produits finis et d'informations associées, depuis le point de consommation jusqu'au point d'origine, dans le but de récupérer de la valeur ou de procéder à une élimination appropriée. (Rogers Tibben-Lembke, 1998)

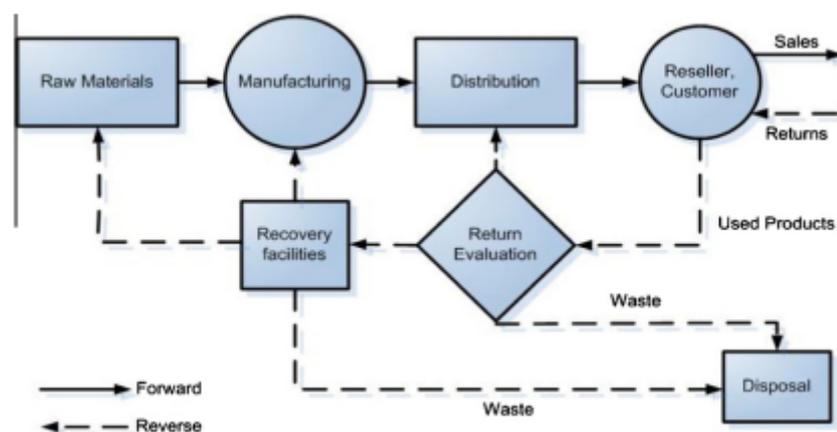


FIGURE 2.3 – A generic form of forward/reverse logistics ((Tonanont et al., 2008).page 2)

2.2.3 Closed Loop Supply Chain dans l'industrie des dispositifs Médicaux

La Supply chain du secteur médical est généralement plus complexe et plus fragmentée que celle d'autres secteurs, sa gestion doit tenir compte de plusieurs enjeux importants, spécifiques à ce secteur, où des vies sont souvent en jeu, car dans ce cas la nous parlons du bien être des patients. Néanmoins la gestion de ce type de supply chain est particulièrement exigeante car, comparée à d'autres

secteurs, elle est souvent plus fragmentée et sujette à de fortes incertitudes, notamment en raison des enjeux vitaux.

Malgré ces spécificités, les principes fondamentaux du supply chain management (SCM) restent les mêmes : il s'agit d'assurer une supervision globale des fournisseurs, des produits, des processus, des systèmes et des flux d'information. Cela comprend la conception, la planification et la coordination du réseau logistique, ainsi que la mise en œuvre de mécanismes permettant de prévoir et de planifier les perturbations ou les risques éventuels, et d'y réagir le plus rapidement possible.

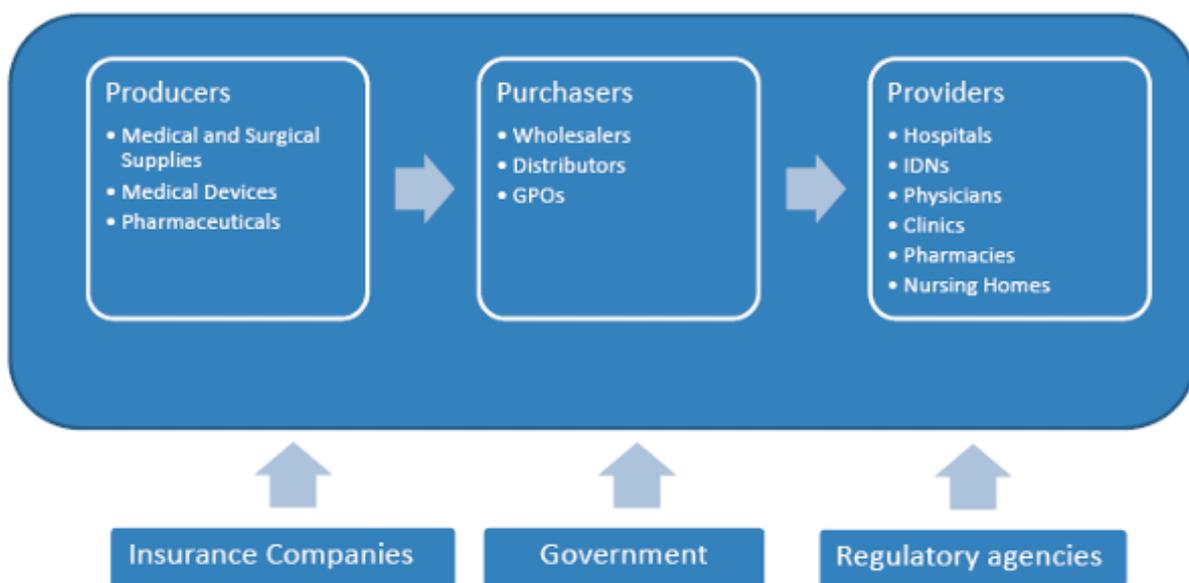


FIGURE 2.4 – Configuration Healthcare Supply chain. (Govindan, K. ; Soleimani, H. ; Kannan, D : Adapted from Burns 2002, page 2)

Les opérations menées visent à minimiser les coûts et les retards de traitement tout en maintenant les normes les plus élevées en matière de soins et de sécurité des patients.



FIGURE 2.5 – Cadre décisionnel stratégique de la chaîne logistique de santé ((Zammit, A. ; Muscat, A. ; Portelli, J.), page 12)

-Pratiques adoptées visant à améliorer la gestion de la Healthcare supply chain :

Compte tenu de l'importance de la chaîne d'approvisionnement pour les performances financières et opérationnelles des entreprises et organismes de santé, ainsi que pour les résultats des patients, il est impératif d'investir dans des pratiques fiables, durables et rentables. Parmi ces pratiques la pratique suivante :

-Optimize Network Design and Distribution(Optimiser la conception et la distribution du réseau)

Les entreprises doivent analyser fréquemment leur réseaux actuels afin d'identifier de potentielles inefficacités cela implique : Examiner l'emplacement des fournisseurs, des centres de distribution et des établissements de santé. Évaluer les modes de transport et les itinéraires. Contrôler les niveaux de stock en divers points du réseau Examiner les processus d'exécution des commandes.

Closed Loop Supply Chain et logistique inverse dans le secteur des dispositifs médicaux

La closed loop Supply chain des dispositifs médicaux comprend la livraison initiale des dispositifs médicaux, ainsi que la collecte, réparation, recyclage ou mise au rebut des produits retournés.

Le réseau logistique modélisé comprend ainsi quatre niveaux dans la chaîne directe (fournisseurs, usines, centres de distribution, clients) et cinq types d'installations dans la chaîne inverse, à savoir : les centres de collecte, de réparation, de recyclage, de revente sur le marché secondaire, et d'élimination. Les produits réparables sont remis en circulation, tandis que les matériaux issus du recyclage sont réinjectés dans la chaîne via les fournisseurs, assurant ainsi une fermeture effective de la boucle.

Cette approche vise non seulement à minimiser les coûts logistiques et environnementaux, mais aussi à maximiser les retombées sociales positives. L'intégration d'un système de partage d'information renforce la transparence et l'efficacité opérationnelle du réseau, ce qui est particulièrement crucial dans le contexte des dispositifs médicaux, pour lesquels la fiabilité et la traçabilité des flux sont essentielles (Mehrjerdi Shafiee, 2021 ; Zhalechian et al., 2016 ; Pourjavad Mayorga, 2018)

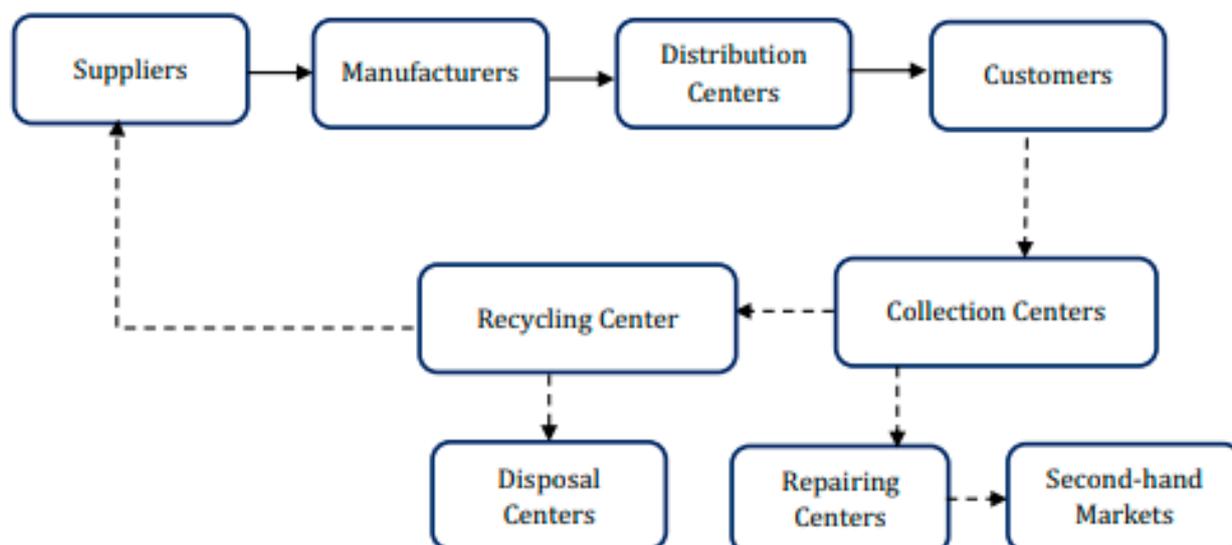


FIGURE 2.6 – : Design du réseau Closed loop supply chain((Pal, R. ; Torstensson, H. ; Mattila, H.),page 91109)

2.3 Supply Chain Design durable

2.3.1 Supply Chain Design

Selon Beamon (1998), une supply chain bien conçue repose sur l'interaction cohérente de ces processus afin de répondre efficacement aux exigences en termes de coûts, de délais, de flexibilité et de satisfaction client.

La conception de la chaîne logistique consiste à structurer et organiser l'ensemble des activités interconnectées allant de l'approvisionnement en matières premières à la distribution des produits finis impliquant différents acteurs tels que les fournisseurs, les fabricants, les centres de distribution et les clients finaux.

La Supply Chain Design consiste à élaborer des modèles mathématiques de la chaîne logistique, dans le but de résoudre diverses problématiques, telles que l'allocation et la localisation des installations, la conception des systèmes de distribution (notamment les problématiques de transport), la planification de la production, ainsi que la gestion des stocks. Ces modèles sont ensuite soumis à des techniques d'optimisation, permettant d'identifier et d'évaluer la solution la plus efficace, afin d'assurer une performance économique, environnementale et sociale maximale.



FIGURE 2.7 – Global Supplychain Design((Santoso et al., EJOR, 2005.), Page 2)

2.3.2 Supply Chain Design Multi échelons

La supply chain design multi-échelons désigne la conception stratégique d'un réseau logistique où, les échelons représentent plusieurs niveaux fonctionnels, à travers lesquels transitent les produits, les informations et les flux financiers, depuis les fournisseurs initiaux jusqu'aux clients finaux. Contrairement aux chaînes logistiques à un seul niveau, où la marchandise est directement acheminée du fournisseur au client, la structure multi-échelons repose sur une organisation hiérarchique et segmentée du réseau. Chaque échelon joue un rôle spécifique dans le stockage, le traitement, la consolidation ou la distribution des produits.

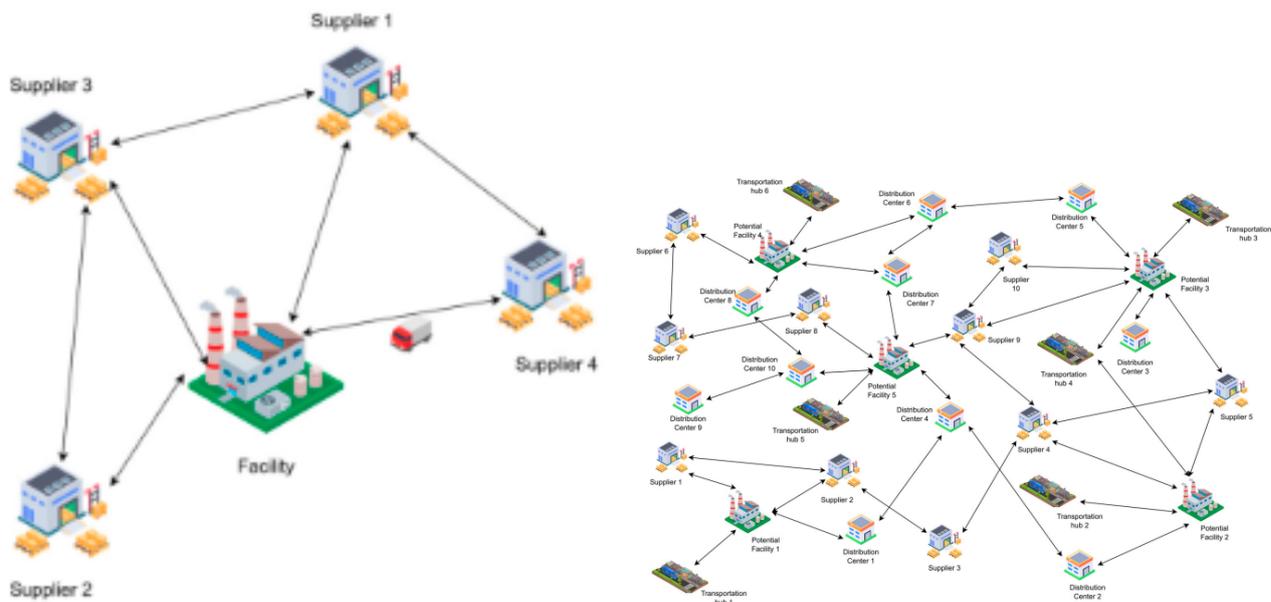


FIGURE 2.8 – Modèles de chaînes logistiques à un seul échelon vs multi-échelons((Nafea et al., Technologies, 2025.),Page 10)

2.3.3 Problème de Location-Allocation

Le problème de Location-Allocation, consiste à trouver un ensemble optimal de points de localisations pour y établir des centres d'installation et affecter chaque point de demande à un centre d'installation dans le but de minimiser les coûts de transport tout en satisfaisant la demande des clients. Ce type de problème se pose souvent lorsqu'il s'agit d'implanter des services comme des entrepôts ou des centres de distribution. Dans certains cas, les emplacements possibles sont déjà définis, ce qui correspond à une approche dite « discrète ». Dans d'autres cas, les installations peuvent être implantées n'importe où, même sur des sites vierges, ce qui relève alors d'une approche « continue ». Ces deux modèles permettent de traiter les problèmes de localisation et d'allocation. (Rushton et Phil, 2014)

2.4.A-Facility Location Model

Ce modèle est utilisé pour placer intelligemment un nombre limité de centres logistiques afin de maximiser la couverture de la population et de minimiser les distances, dans un contexte critique. Dessouky, M., Ordóñez, F., Jia, H., Shen, Z. (2005)

Le modèle mathématique :

-Les paramètres

-Pop_i : Population au point de demande i

-d_{ij} : Distance entre i et j.

-D_i : Distance maximale acceptable pour que le j puisse desservir i

-Q_i : Nombre minimal d'installations qui doivent couvrir i.

-P : Nombre maximal de sites à couvrir.

-N_i : Ensemble de sites pouvant couvrir le point i $N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq D_i\}$

Variables de decision

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si une installation est placée sur le site } j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si le site } j \text{ dessert le point de demande } i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

-Fonction objectif : Minimiser la distance totale

$$\min z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{Pop}_i \cdot d_{ij} \cdot z_{ij}$$

-Contraintes :

1. Le nombre de sites placés ne doit pas dépasser le nombre maximal de sites à couvrir :

$$\sum_{j \in J} x_j \leq P$$

2. Un site peut couvrir un point seulement s'il est activé :

$$z_{ij} \leq x_j \quad \forall i \in I, j \in J$$

3. Chaque point i doit être couvert par Q_i installations proches :

$$\sum_{j \in N_i} z_{ij} \geq Q_i \quad \forall i \in I$$

4. $x_j, z_{ij} \in \{0, 1\}$

2.4.B-P-median model

Le modèle P-médian a pour objectif de minimiser la distance moyenne entre un point de demande et l'installation qui le dessert.

Il sélectionne exactement p sites d'implantation, de façon à minimiser la distance moyenne pondérée (par exemple en fonction de la population ou de la demande) entre chaque point de demande et l'installation à laquelle il est affecté (*Desouky, Ordóñez, Jia, & Shen, 2005*)

Dans ce modèle, il n'y a pas de contraintes de capacité dans les installations.

-Le modèle mathématique :

- Les paramètres :

- $I = \{1, 2, \dots, n\}$: ensemble de clients
- $J = \{1, 2, \dots, n\}$: ensemble d'entrepôts potentiels
- f_j : coût d'installation pour ouvrir une installation en j
- h_i : quantité de la demande d'un client i
- s_j : capacité de l'entrepôt j
- c_{ij} : coût de transport entre le client i et l'installation j

- **Variables de décisions :**

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si le client } i \text{ est assigné à l'installation } j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{si une installation est ouverte sur le site } j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

- **Fonction objectif : Minimiser le coût total**

$$\min Z = \sum_{j \in J} f_j y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij}$$

- **Contraintes :**

1. Le client doit être satisfait par un seul entrepôt :

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I$$

2. La capacité de l'entrepôt ne doit pas être dépassée :

$$\sum_{i \in I} h_i x_{ij} \leq s_j y_j \quad \forall j \in J$$

3. Le nombre d'entrepôts ouverts ne dépasse pas P :

$$\sum_{j \in J} y_j \leq p \quad \forall j \in J$$

4. Contraintes d'intégrité :

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J$$

2.4.C-P-centre model

Cette méthode vise à localiser exactement p installations (entrepôts, centres logistiques) de manière à minimiser la distance maximale entre un client et le centre auquel il est affecté. Autrement dit, elle cherche à réduire au maximum la pire distance rencontrée dans l'ensemble du système logistique. Elle est particulièrement utile lorsque les points de demande (clients) sont mal répartis sur le territoire, cela correspond à des cas de clustering ou d'isolement géographique.

- Le modèle mathématique :

- Paramètres :

- $I = \{1, 2, \dots, n\}$: ensemble de clients
- $J = \{1, 2, \dots, n\}$: ensemble d'entrepôts potentiels
- f_j : coût d'installation pour ouvrir une installation en j
- h_i : quantité de la demande d'un client i
- s_j : capacité de l'entrepôt j
- c_{ij} : coût de transport entre le client i et l'installation j

- Fonction objectif :

Minimiser la distance maximale entre un client et l'entrepôt auquel il est assigné.

$$\min z$$

- Variables de décision :

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si le client } i \text{ est assigné à l'installation } j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$w_j = \begin{cases} 1, & \text{si une installation est ouverte sur le site } j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Contraintes :

1. La distance entre un client i et son entrepôt assigné ne dépasse pas z , pour tous les clients.

$$\sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \leq z \quad \forall i \in I$$

2. Le nombre total d'entrepôts ouverts ne doit pas dépasser p .

$$\sum_{j \in J} y_j \leq p$$

3. Chaque client i doit être assigné à un seul entrepôt.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I$$

4. La somme des demandes des clients assignés à l'entrepôt j ne doit pas dépasser la capacité de ce dernier.

$$\sum_{i \in I} h_i x_{ij} \leq s_j y_j \quad \forall j \in J$$

5. Contraintes d'intégrité

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J$$

La méthode de Barycentre

La méthode du Barycentre est une approche qui cherche à calculer les coordonnées géographiques d'une nouvelle installation potentielle qui minimise les coûts et développe le réseau de distribution.

- Hypothèses du modèle :

- Les quantités à expédier à chaque destination sont fixes.
- La linéarité des coûts de distribution en fonction de la distance et de la quantité.

- Éléments de base de la méthode :

x_i, y_i : Les coordonnées géographiques.

p_i : Le poids du modèle.

- La formule mathématique du modèle :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i \in I} x_i p_i}{\sum_{i \in I} p_i} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i \in I} y_i p_i}{\sum_{i \in I} p_i}$$

2.4 Advanced Supply Chain Design

Le choix entre centralisation et décentralisation des entrepôts constitue une décision stratégique influencée par des facteurs structurels. La centralisation permet une meilleure maîtrise des stocks, des coûts et des compétences, tandis que la décentralisation favorise la réactivité et la proximité client.

Dans cette section nous aborderons les concepts permettant de faire le choix entre la centralisation et décentralisation des entrepôts.

2.4.1 Optimisation de tournées de véhicules Durables

Le problème de tournées de véhicules est une extension classique du problème du voyageur de commerce. Ce dernier figure parmi les thématiques les plus explorées en optimisation combinatoire, en raison de sa capacité à modéliser diverses situations concrètes, notamment dans les domaines de la logistique et du transport. Cette classe de problèmes constitue un outil stratégique pour les entreprises, leur permettant d'optimiser l'utilisation de leur flotte de véhicules tout en réduisant les coûts opérationnels. Le principe du VRP repose sur l'élaboration de plans de tournées visant à desservir un ensemble de clients à l'aide de plusieurs véhicules, avec pour objectif principal la minimisation des coûts de livraison. L'approche d'optimisation du VRP s'articule autour de deux étapes clés : la modélisation du problème à résoudre, puis la sélection d'une méthode de résolution appropriée.

-A. Définition du problème : VRP Classique

Le problème est défini à partir d'un ensemble de n clients et d'une flotte de m véhicules au maximum. Il s'agit de trouver une tournée pour chaque véhicule p afin de leur permettre de visiter l'ensemble des clients. Chaque ville doit être visitée au plus une seule fois par un seul véhicule.

-Modèle mathématique :

- Les paramètres :

- n : Nombre de clients (villes)
- m : Nombre maximal de véhicules disponible
- $V = \{0, 1, \dots, n\}$: Ensemble de nœuds
- A : Ensemble des arcs entre les nœuds
- $(i, j) \in A(i, j)$: un arc entre les villes i et j
- F : fonction de coût à minimiser/maximiser

- Variables de décisions :

$$x_{ijp} = \begin{cases} 1, & \text{si le véhicule } p \text{ parcourt l'arc } (i, j) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{ip} = \begin{cases} 1, & \text{si le véhicule } p \text{ visite la ville } i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

- Fonction objectif :

$$Z = (\min / \max) F$$

F représente un critère comme le coût total des trajets effectués, la distance totale parcourue.

- **Contraintes :**

- **Le nombre de véhicules quittant le dépôt est le même que celui entrant dans le dépôt :**

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq 0}} \sum_{p=1}^m x_{0ip} \leq m$$

$$\sum_{\substack{j \in V \\ j \neq 0}} \sum_{p=1}^m x_{j0p} \leq m$$

- **Chaque ville est visitée une et une seule fois :**

$$\sum_{p=1}^m y_{ip} \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

- **Conservation des flux (entrée/sortie) :** Le nombre de véhicules traversant tous les arcs entrants est égal au nombre de véhicules traversant les arcs sortants :

$$\sum_{i=0}^n x_{ijp} = y_{jp}, \quad \forall j = 1, \dots, n, p = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijp} = y_{ip}, \quad \forall i = 1, \dots, n, p = 1, \dots, m$$

- **Variables binaires :**

$$x_{ijp}, y_{ip} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j = \{1, \dots, n\}, p = \{1, \dots, m\}$$

-Problème de tournée de véhicules capacitaire(CVRP) :

Le CVRP a été proposé pour la première fois par Dantzig and Ramser [Dantzig 1959] sous le nom de "track dispatching problem". C'est l'une des variantes les plus classiques et importante du problème de tournée de véhicules VRP. Le principe consiste à planifier les tournées d'une flotte de véhicules à capacité limitée, partant d'un dépôt central pour livrer les clients tout en minimisant le coût total.

- Caractéristiques principales :

- Tous les véhicules partent et reviennent d'un seul et même dépôt
- La demande des clients à satisfaire est connue.

- Chaque véhicule a une capacité maximale Q .
- Chaque client doit être visité une et une seule fois.

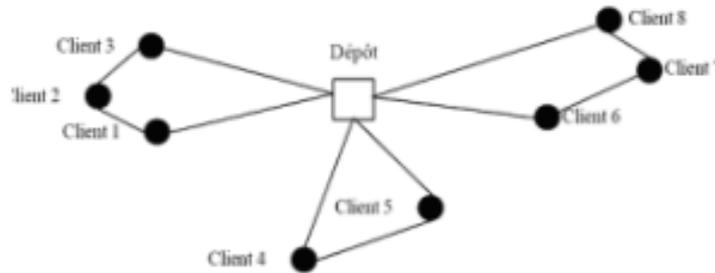


FIGURE 2.9 – Représentation du CVRP(Michel Nabaa, Besma Zeddini, Pierrick Tranouez. Approche décentralisée pour résoudre le problème du transport à la demande. Majestic 2007, Oct 2007)

-Modèle mathématique :

- Paramètres :

- $V = \{0, 1, \dots, n\}$: ensemble des nœuds
- d_i : Demande du client i
- Q : capacité maximale d'un véhicule
- c_{ij} : coût ou distance entre les nœuds i et j

- Variables de décisions :

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si un véhicule parcourt l'arc } (i, j) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

- **Fonction objectif** : Minimiser le coût total des trajets effectués par l'ensemble des véhicules :

$$Z = \min \sum c_{ij} z_{ij}$$

-Problème de tournée de véhicules sélectives (TOP) :

Le problème de tournées de véhicules sélectives (TOP "Team Orienteering Problem") a d'abord été étudié par Chao et al. [Chao 1996] et il appartient à la famille des problèmes de tournées de véhicules avec profit. Contrairement au VRP où tous les clients doivent être servis, dans le TOP on choisit quels clients visiter pour maximiser les gains, sans dépasser une contrainte de temps ou de distance par véhicule. Le problème repose sur un ensemble de clients, chacun étant associé à un profit fixe lorsqu'il est visité. Chaque véhicule disponible dispose d'une contrainte opérationnelle, telle qu'une limite maximale de distance,

de temps ou de coût. Tous les véhicules partent d'un dépôt central et doivent y revenir en fin de tournée. De plus, chaque client ne peut être visité qu'une seule fois au maximum. L'objectif principal de ce problème est de déterminer les tournées optimales permettant de maximiser le profit total cumulé, tout en respectant les contraintes imposées aux véhicules.

Méthodes de résolution du problème : VRP

La figure suivante illustre les techniques les plus couramment utilisées pour la résolution du problème de tournées de véhicules (VRP). Étant donné que le problème des tournées de véhicules est un problème NP-difficile, et ajoutant à cela que la prise en compte des incertitudes fait augmenter sa complexité, plusieurs travaux se sont intéressés à l'application des méthodes méta-heuristiques. Ces méthodes permettent de trouver des solutions proches-optimales en un temps raisonnable. Ces méthodes sont bien adaptées dans le cas des problèmes du monde réel qui sont généralement de grande taille.



FIGURE 2.10 – Classification des algorithmes de résolution du VRP(d'après le rapport de recherche de Télécom Bretagne, 2011, p.16)

B.Green VRP : Une Approche plus durable

Face à l'accroissement des préoccupations environnementales et aux politiques de développement durable, le VRP a progressivement évolué vers des variantes intégrant des considérations écologiques « Green Vehicle Routing Problem (Green-VRP) », une extension du VRP traditionnel qui intègre la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), la consommation énergétique, et d'autres impacts environnementaux dans sa formulation.

Les objectifs d'optimisation ne se limitent plus à l'efficacité économique mais prennent aussi en compte des dimensions environnementales (réduction des émissions, carburants alternatifs) et sociales (satisfaction des parties prenantes, nuisances sonores, qualité de l'air) (*Asghari, M., & Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J. (2020)*).

Le modèle Mathématique :

- Paramètres :

N	Ensemble des clients (nœuds)
V	Ensemble des nœuds, incluant le dépôt
d_{ij}	Distance entre les nœuds <i>i</i> et <i>j</i>
v_{ij}	Vitesse du véhicule entre les nœuds <i>i</i> et <i>j</i>
q_i	Demande du client <i>i</i>
Q	Capacité maximale du véhicule
α, β	Coefficients de consommation de carburant
cf	Coût du carburant par litre
ef	Émission de CO ₂ par litre de carburant
ce	Coût des émissions de CO ₂

- Variables de décisions :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si l'arc } (i, j) \text{ est emprunté par un véhicule} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$f_{ij} = \begin{cases} \text{quantité de marchandise transportée sur l'arc } (i, j), & \text{si } x_{ij} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

t_i : Heure d'arrivée du véhicule au client *i*

o Fonction objectif :

Minimiser le coût total, combinant le coût du carburant consommé et le coût environnemental lié aux émissions.

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ij} \cdot FC_{ij} \cdot (cf + ce \cdot ef)$$

Z : Coût total à minimiser

FC_{ij} : fonction non linéaire représentant la consommation de carburant

$$FC_{ij} = \alpha \cdot d_{ij} + \beta \cdot d_{ij} \cdot \left(\frac{f_{ij}}{Q} \right)$$

- **Contraintes :**

1. Chaque client i doit être visité une seule fois par un véhicule (chaque demande est satisfaite une fois) :

$$\sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N$$

2. Conservation du flux de marchandise (quantité livrée au client correspond bien à sa demande q_i) :

$$\sum_{j \in V} f_{ji} = \sum_{j \in V} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in N$$

3. Capacité maximale du véhicule (quantité transportée ne doit pas dépasser la capacité maximale Q) :

$$f_{ij} \leq Q \cdot x_{ij} \quad \forall i, j \in V$$

4. Le véhicule part du dépôt et y revient une seule fois :

$$\sum_{j \in V, j \neq 0} x_{0j} = 1 \quad \text{et} \quad \sum_{j \in V, j \neq 0} x_{j0} = 1$$

5. Sous-tour élimination (MTZ ou autres méthodes) :

$$t_j \geq t_i + s_i + \frac{d_{ij}}{v} - M \cdot (1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in N, i \neq j$$

2.4.2 Segmentation géographique des clients : Algorithme du K-means

Fondamentaux de la data mining

La *data mining*, également appelée *Knowledge Discovery in Data*, est une composante essentielle des sciences d'analyse de données volumineuses. Elle consiste à extraire des modèles ou des connaissances intéressants (non triviaux, implicites, inconnus auparavant et potentiellement utiles) à partir de grandes quantités de données (big data) pour les transformer en savoir.

C'est un processus dont l'objectif est double : d'une part, rendre ces données plus compréhensibles, et d'autre part, découvrir des **corrélations significatives**. Ces corrélations se traduisent par des règles de classification et de prédiction, dont la finalité est de faciliter la prise de décision.

Cette analyse permet aux sociétés d'établir des rapports de recherches sur les différents marchés, de manière à augmenter leur compétitivité. Avec l'essor du Big Data, le data mining, qui permet d'analyser de vastes ensembles de données, est plus que jamais d'actualité.

Il est possible de dénombrer cinq méthodes de *data mining* : Classification, Association, Analyse des séquences, *clustering* et prédiction.

Le clustering est une technique d'apprentissage non supervisé qui englobe plusieurs méthodes mathématiques de base permettant d'identifier des groupes d'objets similaires, appelés *clusters*, en fonction des variables caractérisant chaque objet. Le clustering a pour objectif de regrouper les objets jugés similaires dans un même cluster et de séparer les objets dissimilaires dans des clusters distincts.

-Le K Means pour la segmentation des clients

Le principe est de regrouper un ensemble de points de données (non étiquetés) en **K clusters** en minimisant la distance entre chaque point et le centre de son cluster.

- Étapes de déroulement de l'algorithme du Kmeans :

1. Means Initialization

On commence par choisir aléatoirement un nombre initial de clusters K .

2. Cluster Assignment

Chaque point de données est assigné au centroïde le plus proche (par la distance euclidienne). Pour chaque point $x^{(i)}$, on choisit le cluster j dont le centroïde μ_j est le plus proche :

$$c^{(i)} = \arg \min_j \|x^{(i)} - \mu_j\|^2$$

3. Means Update

Les centroïdes sont ensuite **recalculés** en prenant la **moyenne des points affectés à chaque cluster** :

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^m \mathbb{1}_{\{c^{(i)}=j\}} \cdot x^{(i)}}{\sum_{i=1}^m \mathbb{1}_{\{c^{(i)}=j\}}}$$

4. Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à avoir une stabilité des clusters.

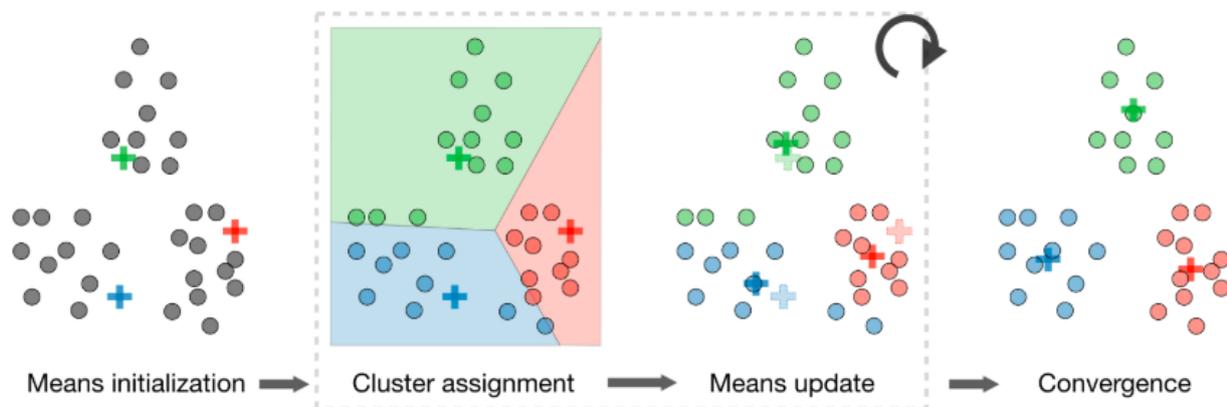


FIGURE 2.11 – Éillustration du déroulement de l'algorithme du K Means (Stanford 2024)

2.4.3 Choix entre centralisation et décentralisation par l'AHP

-L'Aide Multicritère à la décision

En se basant sur le postulat d'optimum qu'il existe au moins une solution optimale démontrée objectivement, l'AMD aide à résoudre ce problème du choix de la meilleure solution tout en considérant plusieurs aspects du problème lui-même.

Un problème de décision Multicritère, consiste à choisir entre plusieurs alternatives en tenant compte de plusieurs critères souvent conflictuels, dans le but de trouver le compromis le plus satisfaisant selon les priorités du décideur.

La sélection d'une méthode multicritère pour traiter un problème particulier est elle-même un problème de décision multicritère qui n'a pas de solution évidente (Al-Shemmeri, 1997).

-Analytic Hierarchy Process(AHP)

La méthode AHP est un outil à la disposition des décideurs et des chercheurs ; et c'est l'un des outils de prise de décision à critères multiples les plus largement utilisés (Kumar Vaidya, 2006). Elle permet de modéliser un problème de décision sous forme d'une structure hiérarchique, mettant en évidence les relations entre les différents éléments.

Elle repose sur des comparaisons par paires afin d'évaluer l'importance relative de chaque critère, et aboutit à la détermination des priorités des alternatives ou actions possibles.

1-Etablissement de la structure Hiérarchique :

Le problème de décision est divisé en ses principaux composants selon une hiérarchie comprenant : l'objectif, critères principaux, critères secondaires (le cas échéant) et les alternatives, représentant la partie la plus importante et la plus créative du processus de prise de décisions.

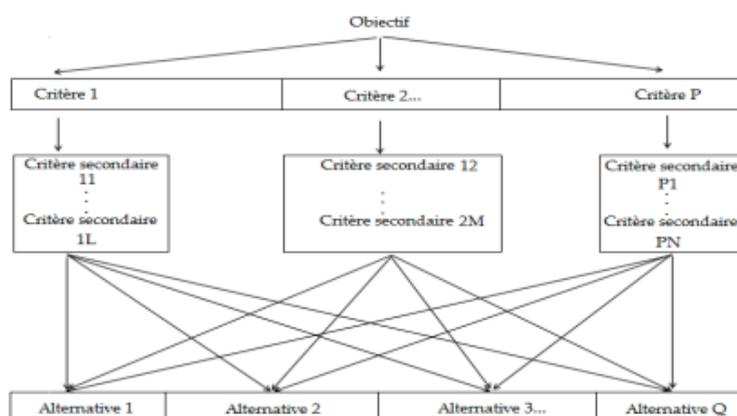


FIGURE 2.12 – Hiérarchie Générale de la méthode AHP(Kaouther FENNICHE 2019))

2-Établissement des priorités :

La première étape pour établir les priorités des différents éléments faisant partie d'un problème de décision est d'effectuer des comparaisons par paire des éléments du même niveau de la hiérarchie deux à deux par rapport à un critère donné, tout en alliant la pensée logique à l'expérience.

La matrice présente le cadre le plus efficace pour effectuer de telles comparaisons. Pour aborder le processus de comparaisons par paires, il faut commencer au sommet de la hiérarchie et sélectionner le critère C ou propriété qui sera utilisée pour effectuer la première comparaison. Ensuite à partir du niveau immédiatement inférieur, il faut considérer les éléments à comparer : A1,A2, A3, etc.

C	A_1	A_2	A_3	\cdots	\cdots	A_7
A_1	1	C_{12}	C_{13}	\cdots	\cdots	C_{17}
A_2	C_{21}	1	C_{23}	\cdots	\cdots	C_{27}
A_3	C_{31}	C_{32}	1	\cdots	\cdots	C_{37}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots		\vdots
A_7	C_{71}	C_{72}	C_{73}	\cdots	\cdots	1

TABLE 2.1 – Exemple de matrice de comparaison par paires.

Pour remplir la matrice des comparaisons binaires, on utilise l'échelle de Saaty pour représenter l'importance relative d'un élément par rapport à un autre en fonction de la priorité.

L'échelle définit et explique les valeurs de 1 à 9 attribuées aux appréciations dans la comparaison des paires d'éléments semblables à chaque niveau d'une hiérarchie par rapport à un critère du niveau immédiatement supérieur

Jugement verbal	Évaluation numérique
extrêmement plus important	9
	8
très fortement plus important	7
	6
fortement plus important	5
	4
modérément plus important	3
	2
importance égale	1

TABLE 2.2 – Échelle de préférences de Saaty((Saaty T. , 1984))

3-Synthétisation :

Cette étape consiste à calculer la priorité de chaque critère en relation avec sa contribution vers l'atteinte de l'objectif (choisir un CLARCK) Les étapes de calculs de la matrice des priorités sont les suivantes :

-Faire la somme des valeurs de chaque colonne.

-Diviser chaque élément de la matrice par le total de sa colonne

-Calculer la moyenne des éléments de chaque rangée de la matrice. Ces moyennes donnent un estimé des priorités du critère.

4-Cohérence des jugements :

La méthode AHP évalue la cohérence globale des appréciations au moyen d'un ratio de cohérence.

La valeur du ratio de cohérence doit être égale ou inférieure à 10%. Si elle est supérieure à 10%, les appréciations risquent d'être quelque peu aléatoires et peuvent alors exiger certaines révisions (Saaty T., 1984).

La formule du ratio de cohérence est la suivante :

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Ou :

- IC : Indice de cohérence

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Où n est la dimension de la matrice et λ_{\max} est la valeur propre maximale.

- IA : Indice de cohérence aléatoire, la valeur varie en fonction de la dimension n (Saaty T., 1984)

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cohérence aléatoire	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

TABLE 2.3 – Valeurs de cohérence aléatoire selon Saaty (1984)

5-Prise de décision :

Une fois les étapes ci-dessus terminées, il est maintenant possible de prendre une décision. Ceci constitue la dernière étape de l'analyse AHP. Pour cela, il faut comparer les priorités globales obtenues et ainsi sélectionner l'alternative la plus avantageuse et élaborer un plan d'action.

2.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté les fondements théoriques relatifs à la logistique durable, en mettant l'accent sur la Closed Loop Supply Chain appliquée aux dispositifs médicaux. Les concepts de localisation-allocation, de segmentation géographique et d'optimisation des tournées de véhicules ont été exposés.

Ces éléments fournissent ainsi un cadre méthodologique solide, sur lequel s'appuie la démarche développée dans le chapitre suivant pour l'élaboration de la solution proposée pour GE Healthcare.

Chapitre 3

Conception de la solution

3.1 Introduction

Après avoir défini la problématique de notre projet et présenté les concepts clés liés à sa résolution, ce chapitre vise à proposer une solution logistique optimisée, en s'appuyant sur des modélisations mathématiques et des outils d'aide à la décision.

La conception de notre solution repose sur le schéma directeur suivant :

- **Étape 1** : Définition d'une nouvelle architecture de distribution, fondée sur une segmentation géographique des clients à l'aide de l'algorithme K-Means, puis affinée par l'application des modèles de localisation-allocation : barycentre, p-médian et p-centre.
- **Étape 2** : Élaboration d'un modèle mathématique discret à objectifs multiples, intégrant conjointement les dimensions économiques, environnementales et la réutilisation des pièces, dans une logique de supply chain circulaire (Closed Loop Supply Chain).
- **Étape 3** : Optimisation des tournées de distribution à travers un modèle VRP, permettant de comparer les scénarios de centralisation et de décentralisation.

Le choix de la stratégie optimale est ensuite appuyé par une méthode d'aide multicritère à la décision (AHP), garantissant une sélection fondée sur des critères objectifs et pondérés.

Nous concluons ce chapitre en proposant quelques perspectives d'amélioration pour le système logistique étudié.

3.2 Détermination de la structure optimale du réseau de distribution.

Lors de cette étape nous procéderons à une segmentation géographique des clients de GE Healthcare en appliquant l'algorithme du K-means afin de regrouper les points les plus pertinents en clusters géographiques. Cette classification nous permettra ensuite d'identifier les emplacements optimaux pour l'implantation des entrepôts.

3.2.1 Application du K Means pour la segmentation géographique des clients

Grâce à la data mining en utilisant un algorithme de clustering, nous allons pouvoir déterminer les zones géographiques adéquates à partir desquelles nous pourrions identifier les emplacements optimaux pour nos entrepôts.

Pour le choix du nombre de clusters, nous avons opté pour une segmentation en trois groupes ($k=3$), en raison de la répartition géographique des clients, majoritairement concentrés dans trois zones distinctes : Est, Ouest et Centre. Ce choix est également justifié par l'existence d'un entrepôt déjà opérationnel, ce qui implique l'ouverture de deux entrepôts supplémentaires afin de couvrir efficacement l'ensemble du territoire national.

```

k = 3
kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
df['Cluster'] = kmeans.fit_predict(coords)
# Afficher les villes regroupées par cluster
print("\nVilles regroupées par cluster :")
print("\nVilles regroupées par cluster :")
for cluster in range(k):
    villes = df[df['Cluster'] == cluster]['City'].unique()
    print(f"\nCluster {cluster} : {list(villes)}")

```

FIGURE 3.1 – Algorithme du Kmeans sur Python

Les résultats de l'algorithme sont représentés par la figure suivante selon les résultats des ventes de l'année 2024.

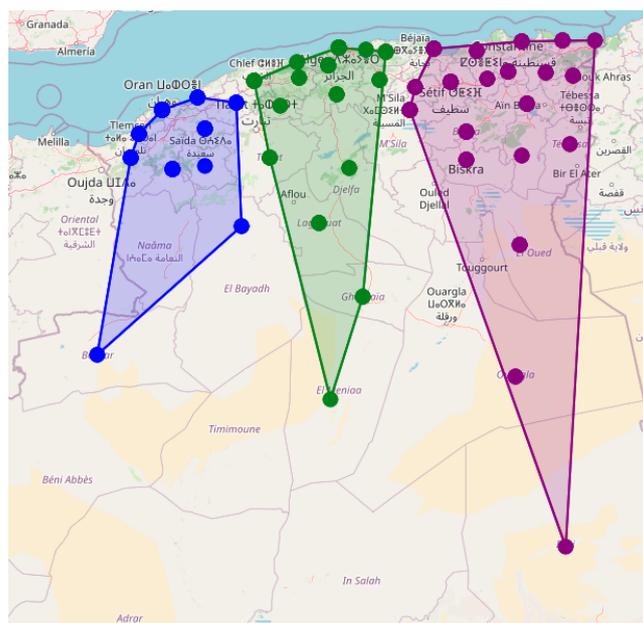


FIGURE 3.2 – Résultats du K-means

Dans le cadre de notre démarche, nous avons complété notre script Python par une étape supplémentaire permettant l'affectation de nouveaux clients aux clusters déjà définis par l'algorithme K-means.

Les coordonnées géographiques (latitude et longitude) ont été importées, nettoyées, puis traitées à l'aide de la méthode `.predict()` de l'objet `kmeans`. Cette méthode permet d'attribuer chaque nouveau client au cluster le plus proche, sans devoir exécuter l'ensemble de l'algorithme. Les résultats obtenus ont été enregistrés dans un fichier de sortie, assurant une traçabilité des affectations. Cette démarche garantit une intégration rapide et cohérente des nouveaux points au sein du modèle existant.

Nous avons donc ajouté les ventes pour le premier trimestre de 2025.

```
print("\nNouvelles villes affectées aux clusters :")
for cluster in range(k):
    villes = nouveaux_df[nouveaux_df['Cluster'] == cluster]['City'].unique()
    print(f"\nCluster {cluster} : {list(villes)}")

# 17. Sauvegarder les nouvelles affectations
nouveaux_df.to_csv('nouveaux_clients_avec_clusters.csv', index=False)
print("Fichier 'nouveaux_clients_avec_clusters.csv' enregistré avec les clusters attribués.")
# Afficher la liste complète des nouvelles villes et leur cluster affecté
print("\nAffectation des nouvelles villes aux clusters :")
for i, row in nouveaux_df.iterrows():
    print(f"- {row['City']} → Cluster {row['Cluster']}")
```

FIGURE 3.3 – Résultats du K-means

Le résultat est présentée dans la figure suivante, où les points de couleurs clair représentent les clients du premier trimestre de 2025 affectée aux cluster :

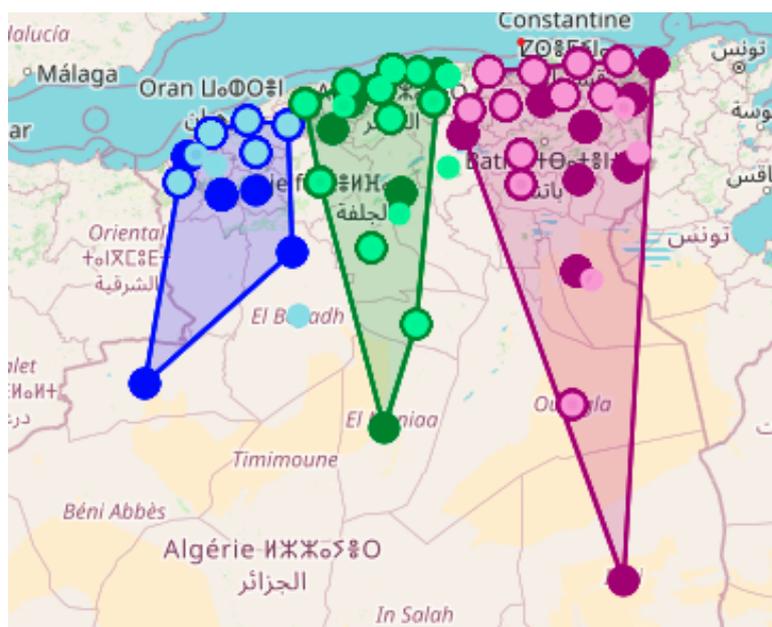


FIGURE 3.4 – Résultats de l'affectation des nouveaux clients.

Les trois clusters sont donc définis de la manière suivante :

Cluster 0 : Zone Est	CONSTANTINE, GUELMA, BEJAIA, SKIKDA, Batna, JIJEL, TEBESSA, OUARGLA, SÉTIF, BATNA, 'EL OUED, BISKRA, SOUK AHRAS, ANNABA, BORDJ BOU ARRERIDJ
Cluster 1 : Zone centre	ALGER, TIZI OUZOU, M'SILA, BLIDA, CHLEF, LAGHOUAT, MÉDÉA, DJELFA, TIARET, BOUMERDES, BOUIRA, TIPAZA, AIN DEFLA, GHARDAÏA
Cluster 2 : Zone Ouest	SIDI BEL ABBES, ORAN, RELIZANE, MOSTAGANEM, ADRAR, EL BAYADH, TLEMENEN, MASCARA, AIN TËMOUCHENT

FIGURE 3.5 – Résultats de l'affectations des clusters.

Après avoir obtenu la segmentation géographique des clients, nous allons appliquer trois modèles de localisation-allocation dans le but d'identifier les emplacements les plus adaptés pour les nouveaux entrepôts à implanter dans les zones Est (cluster 0) et Ouest (cluster 2).

3.2.2 Application de modèles de location allocation pour la détermination d'un emplacement optimal des entrepôts

Au cours de cette étape nous présenterons les résultats obtenus lors de l'application des méthodes du barycentre, du p-centre et du p-médian. Ces approches nous permettront d'identifier le meilleur emplacement qui réduira les coûts logistiques.

Pour ce faire nous avons réuni les coordonnées géographiques des clients de la Zone Est (Cluster C0) et de la Zone Ouest (Cluster C1) dans un fichier excel et à l'aide d'un programme python nous avons pu obtenir les coordonnées géographiques des emplacements potentiels d'implantation des entrepôts.

a-Résultats de la méthode du barycentre :

L'application de la méthode de barycentre sur les régions Est et Ouest a permis de trouver le centre de gravité de plusieurs points de demande (clients) qui sont, dans notre cas, les wilaya des clusters, chaque client a été pondéré par le nombre de demande, afin de refléter l'importance relative de chaque point dans la localisation finale.

```
def calcul_barycentre(df_cluster):
    lat = np.average(df_cluster["Latitude"], weights=df_cluster["Total"])
    lon = np.average(df_cluster["Longitude"], weights=df_cluster["Total"])
    return lat, lon
```

FIGURE 3.6 – Application de la méthode du Barycentre

Pour la région Est, les coordonnées Géographiques du Cluster C0 sont les suivantes :

$X^* = 35.915200$, $Y^* = 6.112616$, correspondant à la Wilaya de **Sétif**.

Pour la région Ouest, les coordonnées Géographiques du Cluster C2 sont les suivantes :

$X^* = 35.408090$, $Y^* = -0.536756$, Correspondant à la wilaya d'**Oran**.

-Les emplacements géographiques des trois entrepôts sont représentés dans la figure suivante :

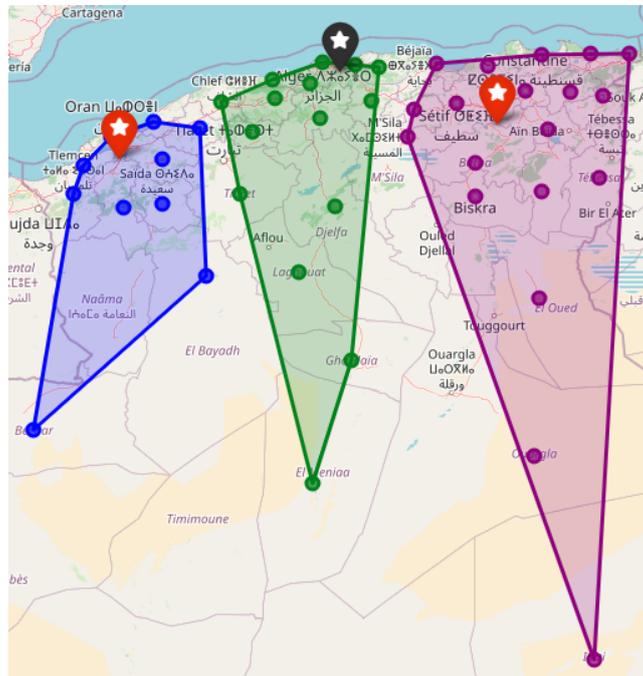


FIGURE 3.7 – Résultats de la méthode du Barycentre pour les cluster Est et Ouest

b-Résultats de la méthode du P-centre :

A l'aide d'un programme python nous avons pu appliquer la méthode du P centre, les résultats obtenu sont les suivants :

```
# Calcul des P-Centres
pc_lat1, pc_lon1 = calcul_pcentre(cluster2)
pc_lat0, pc_lon0 = calcul_pcentre(cluster0)

# Affichage dans la console
print(f"P-Centre du Cluster C2 : Latitude = {pc_lat1:.6f}, Longitude = {pc_lon1:.6f}")
print(f"P-Centre du Cluster C0 : Latitude = {pc_lat0:.6f}, Longitude = {pc_lon0:.6f}")

P-Centre du Cluster C2 : Latitude = 34.881789, Longitude = -1.316699
P-Centre du Cluster C0 : Latitude = 33.361671, Longitude = 6.861597
```

FIGURE 3.8 – Code Python de l'application de la méthode du p-centre

Nous obtenons donc :

-Pour la région EST(Cluster C0) :

$X^* = 34.881789$, $Y^* = -1.316699$

Correspondant à la wilaya EL Oued

-Pour la région OUEST(Cluster C2) :

$X^* = 33.361671$, $Y^* = 6.861597$

Correspondant à la wilaya de Tlemcen

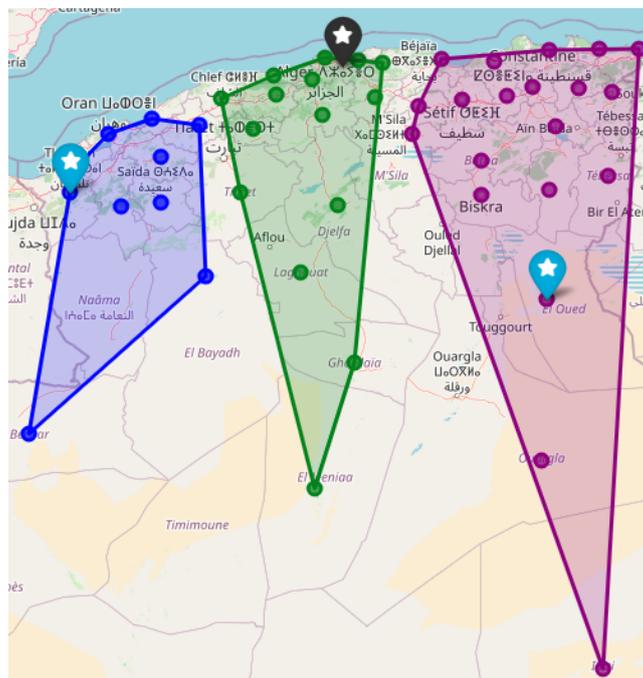


FIGURE 3.9 – Résultat de l'application de la méthode du P-centre.

c-Résultats de la méthode du P-médian :

L'application du code python pour la méthode du P-médian a permis d'obtenir les résultats suivants :

```
#Fonction de calcul du P-Médiane
def calcul_pmediane(df_cluster):
    coords = df_cluster[["Latitude", "Longitude"]].values
    dist_matrix = cdist(coords, coords, metric='euclidean')
    sum_distances = dist_matrix.sum(axis=1)
    best_index = sum_distances.argmin()
    return coords[best_index]

# Calcul du P-Médiane pour les clusters C0 et C2
pm0 = calcul_pmediane(cluster0)
pm2 = calcul_pmediane(cluster2)
```

FIGURE 3.10 – Code Python de la méthode du P-Médian

Pour le Cluster de L'EST(Cluster C0) :

$$X^* = 35.810581, Y^* = 7.018418$$

Correspondant à la Wilaya **Oum el Bouaghi**

Pour le Cluster de L'OUEST(Cluster C1) :

$$X^* = 34.682268, Y^* = -0.435756$$

Correspondant à la Wilaya de **Sidi Bel Abbes**

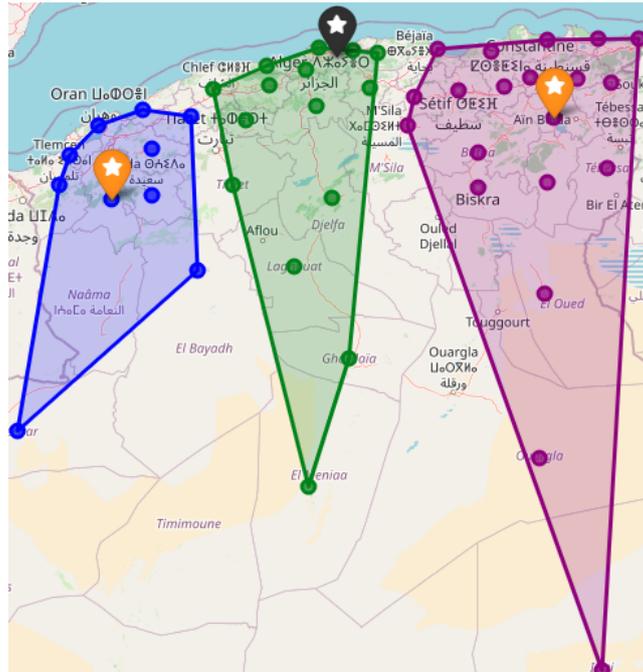


FIGURE 3.11 – Résultat d'application de la méthode du P-médian

Dans ce qui précède, nous avons d'abord appliqué l'algorithme du K-means afin de regrouper les clients en trois clusters géographiques. Bien que cette méthode ait permis d'obtenir une segmentation cohérente, celle-ci ne prend pas en compte les volumes de demande des segments Imaging, US et PCS, mais repose uniquement sur la proximité géographique des clients.

A partir des résultats obtenus, nous avons ensuite appliqué les méthodes du barycentre, du p-centre et du p-médian aux clients des clusters C0 (Est) et C2 (Ouest), dans le but d'identifier l'emplacement optimal des entrepôts permettant de minimiser les distances parcourues, et par conséquent, les coûts logistiques. Ces trois méthodes ne prennent pas en considération la demande, les clients des autres régions ni les coûts.

D'où la nécessité d'aller vers un modèle discret afin d'avoir un résultat plus précis qui prend en compte toutes les régions (Est, Ouest, Centre) afin de déterminer le meilleur emplacement.

3.3 La détermination du point de conception optimal grâce à un modèle discret Multi-objectif

Dans ce qui suit nous allons élaborer un modèle mathématique multi objectif qui va permettre de déterminer le meilleur emplacement des entrepôts C0 et C2, qui minimise les coûts logistique et l'empreinte carbone et qui maximise la réutilisation locale de pièces (logistique inversée, Harvest). Ce modèle prend en considération la demande des clients par segment, les différentes pièces de rechange par équipements, ainsi que les différents camions de transport.

3.3.1 Elaboration du modèle mathématique discret Multi-objectif :

Le modèle mathématique se compose de quatres éléments : les paramètres du modèle, les variables de décisions, les fonctions objectives et les contraintes.

-Les paramètres du modèle

- I : Ensemble des emplacements d'entrepôts potentiels
- J : Ensemble des clients (hôpitalux, cliniques, centres de soins)
- K : Type de pièces
- S : Segment d'équipements
- T : Types de Camion disponibles
- C : Ensemble des clusters géographiques
- D_{ij} : Distance entre l'entrepôt i et le client j (en km)
- C_{ij} : Coût unitaire de transport entre i et j
- E_{ij} : Émission de CO₂ générée par le trajet $i \rightarrow j$
- Q_{js} : Quantité demandée par le client j pour le type de machine s (Imaging, US, PCS)
- R_k : Nombre de pièces de Types K récupérables
- P_k : Coût d'importation d'une pièce neuve de type k
- E_k : Émission de CO₂ liée à l'importation de la pièce k
- V_t : Capacité maximale du camion de type t
- $Clust_i$: Région ou cluster géographique (issu du K-means) auquel appartient l'entrepôt i
- C_{ij}^{rev} : Coût de transport inverse (client $j \rightarrow$ centre i)
- E_{ij}^{rev} : Émissions de CO₂ du trajet inverse (client $j \rightarrow$ centre i)
- $A_{ij} \in \{0, 1\}$: Liaison autorisée entre i et j
- f_i : Coût de location d'un entrepôt i

- $Flotte_t$: Nombre maximal de camions disponibles pour t

-Les variables de décision :

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si l'entrepôt } i \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{ijs} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande du segment } s \text{ du client } j \text{ est servie par l'entrepôt } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$Z_{ijt} \in \mathbb{N}$: nombre de trajets effectués de i vers j par un camion de type t

$U_{ijk} \in \mathbb{N}$: quantité de pièces k collectées chez le client j vers le centre i

$W_k \in \mathbb{N}$: nombre de pièces k neuves importées

$$a_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{si le camion } t \text{ effectue un trajet de } i \text{ vers } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$u_j^{\text{seq}} \in \mathbb{R}$: position de j dans la tournée

Fonctions objectif :

-Fonction objectif 1 : Minimiser les coûts logistiques

Les coûts logistiques sont composés des coûts de location d'un entrepôt i , coûts de livraison des équipements, coût de transports, coûts de récupération des pièces Harvest et des coûts d'importation des pièces de rechange neuves.

$$Z_1 = \sum_{i \in I} f_i x_i + \sum_{i,j,s} C_{ij} Q_{js} y_{ijs} + \sum_{i,j,t} C_{ij} z_{ijt} + \sum_{i,j,k} C_{ij}^{\text{rev}} u_{ijk} + \sum_k P_k w_k$$

-Fonction objectif 2 : Minimiser les émissions de CO₂

$$Z_2 = \sum_{i,j,t} E_{ij} z_{ijt} + \sum_{i,j,k} E_{ij}^{\text{rev}} u_{ijk} + \sum_k E_k w_k$$

-Fonction objectif 3 : Maximiser la réutilisation locale

$$Z_3 = \sum_{i,j,k} u_{ijk}$$

$$\min \quad Z = \alpha Z_1 + \beta Z_2 - \gamma Z_3$$

Les contraintes :

-Contrainte 1 : Affectation Unique

Cette contrainte atteste que chaque client doit être affecté à un et un seul entrepôt pour le segment s

$$\sum_{i \in I} y_{ijs} = 1 \quad \forall j \in J, \forall s \in \{\text{US, PCS, imaging}\}$$

-Contrainte 2 : Limite de réutilisation des pièces

On ne peut pas *réutiliser* plus de pièces k que le stock total récupérable R_k existant dans tout le système.

$$\sum_{i,j} u_{ijk} \leq R_k \quad \forall k \in K$$

-Contrainte 3 : Satisfaction de la demande

La somme des pièces récupérées et des pièces importées neuves doit suffire à satisfaire la demande totale pour chaque type de pièce.

$$\sum_{i,j} u_{ijk} + w_k \geq D_k \quad \forall k \in K$$

-Contrainte 4 : Condition de livraison à l'entrepôt i

Cette contrainte spécifie qu'un entrepôt i ne peut livrer le client j pour un segment s , seulement si il est ouvert.

$$y_{ijs} \leq x_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in \{\text{Imaging, US, PCS}\}$$

-Contrainte 5 : Un seul entrepôt ouvert par cluster

On ne peut ouvrir qu'un seul entrepôt par région (cluster) pour optimiser la répartition régionale.

$$\sum_{i \in I | \text{Clust}_i = c} x_i \leq 1 \quad \forall c \in C$$

-Contrainte 6 : Affectation des clients aux entrepôts

Un client ne peut être affecté à un entrepôt que s'il est dans sa zone de desserte autorisée.

$$y_{ijs} \leq A_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S$$

-Contrainte 7 : Limitation du nombre de véhicules

Cette contrainte spécifie que chaque entrepôt i ne peut envoyer plus de camions de type t que le nombre de véhicules disponibles dans la flotte.

$$\sum_j z_{ijt} \leq \text{flotte}_t \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

-Contrainte 8 : Visite de chaque client

Chaque client doit être visité exactement une fois dans le circuit de livraison.

$$\sum_{i \neq j, t} a_{ijt} = 1 \quad \forall j \in J$$

-Contrainte 9 : Équilibre entrée/sortie

Cette contrainte assure la conservation des flux entrée/sortie des livraisons.

$$\sum_{i \neq j} a_{ijt} = \sum_{k \neq j} a_{jkt} \quad \forall j \in J, \forall t \in T$$

-Contrainte 10 : Suppression des sous-tours

$$a_{ijt} = 1 \Rightarrow u_i^{\text{seq}} + 1 \leq u_j^{\text{seq}} \quad \forall i \neq j, t$$

-Contrainte 11 : Capacité maximale de transport des camions

Chaque tournée de camion t depuis un entrepôt i ne peut dépasser la capacité maximale du véhicule, en tenant compte de la demande totale livrée Q_{js} .

$$\sum_{j,s} Q_{js} \cdot a_{ijt} \leq V_t \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

Le modèle mathématique est donc formulée comme suit :

Fonction objectif :

$$\begin{aligned} \min Z = & \alpha \left(\sum_{i \in I} f_i x_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} Q_{js} y_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} C_{ij} z_{ijt} \right. \\ & \left. + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ij}^{\text{rev}} u_{ijk} + \sum_{k \in K} P_k w_k \right) \\ & + \beta \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_{ij} z_{ijt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} E_{ij}^{\text{rev}} u_{ijk} + \sum_{k \in K} E_k w_k \right) \\ & - \gamma \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} u_{ijk} \right) \end{aligned}$$

Sous contraintes :

- (1) $\sum_{i \in I} y_{ij, \text{imaging}} = 1 \quad \forall j \in J$
- (2) $\sum_{i \in I} y_{ijs} \geq 1 \quad \forall j \in J, \forall s \in \{\text{US}, \text{PCS}\}$
- (3) $\sum_{i,j} u_{ijk} \leq R_k \quad \forall k \in K$
- (4) $\sum_{i,j} u_{ijk} + w_k \geq D_k \quad \forall k \in K$
- (5) $y_{ijs} \leq x_i \quad \forall i, j, s$
- (6) $\sum_{\substack{i \in I \\ \text{Clust}_i = c}} x_i \leq 1 \quad \forall c \in C$
- (7) $x_i = 0 \quad \text{si } A_{ij} = 0$
- (8) $\sum_j z_{ijt} \leq \text{flotte}_t \quad \forall i, t$
- (9) $\sum_{i \neq j} a_{ijt} = 1 \quad \forall j \in J$
- (10) $\sum_{i \neq j} a_{ijt} = \sum_{k \neq j} a_{jkt} \quad \forall j \in J, \forall t \in T$
- (11) $a_{ijt} = 1 \Rightarrow u_i^{\text{seq}} + 1 \leq u_j^{\text{seq}} \quad \forall i \neq j, \forall t \in T$
- (12) $\sum_{j,s} Q_{js} \cdot a_{ijt} \leq V_t \quad \forall i \in I, \forall t \in T$

Application du modèle en utilisant DOcplex :

Pour résoudre notre modèle nous avons eu recours à DOcplex pour Décision optimization Cplex Modeling for python qui est une bibliothèque Python développée par IBM. Elle permet de modéliser et résoudre des problèmes d'optimisation mathématique à l'aide du solveur IBM CPLEX qui est l'un des solveurs les plus adéquats pour des problèmes de type NP-difficile.

DOcplex permet de décrire un modèle mathématique à partir de ses composantes fondamentales : les paramètres, les variables de décision, les contraintes et les fonctions objectifs. À la différence d'une approche algorithmique classique, cette interface n'exige pas de l'utilisateur de coder les méthodes de résolution ; elle se concentre uniquement sur la formulation du problème.

Une fois le modèle défini, DOcplex se charge de le traduire automatiquement dans un format standard lisible par le solveur CPLEX, puis de lancer la résolution en arrière-plan, le moteur Cplex est ainsi exploité pour produire une solution optimale (ou identifier une éventuelle absence de solution), puis restitue les résultats sous forme d'objets exploitables dans Python.

-Chargement des paramètres :

La première étape consiste à définir et à charger les données des différents paramètres.

```
# Chargement des paramètres (matrices)
df_C = pd.read_csv("C.csv", header=None, names=["i", "j", "val"])
C = {(row["i"], row["j"]): row["val"] for _, row in df_C.iterrows()}

df_Eij = pd.read_csv("Eij.csv", sep=";", index_col=0)
df_Eij = df_Eij.replace(",", ".", regex=True).astype(float)
Eij = {(i, j): df_Eij.loc[i, j] for i in df_Eij.index for j in df_Eij.columns}

df_Cij = pd.read_csv("Cij.csv", sep=";", index_col=0)
df_Cij = df_Cij.replace(",", ".", regex=True).astype(float)
Cij = {(i, j): df_Cij.loc[i, j] for i in df_Cij.index for j in df_Cij.columns}

df_Aij = pd.read_csv("Aij.csv", header=None, names=["i", "j", "val"])
Aij = {(row["i"], row["j"]): row["val"] for _, row in df_Aij.iterrows()}

df_Qjs = pd.read_csv("Qjs.csv", header=None, names=["j", "s", "val"])
Qjs = {(row["j"], row["s"]): row["val"] for _, row in df_Qjs.iterrows()}

# Chargement des paramètres (vecteurs)
Rk = pd.read_csv("RK.csv", sep=";", header=None, names=["k", "val"]).set_index("k")["val"].to_dict()
Pk = pd.read_csv("Pk.csv", sep=";", header=None, names=["k", "val"]).set_index("k")["val"].to_dict()
Ek = pd.read_csv("Ek.csv", sep=";", header=None, names=["k", "val"]).set_index("k")["val"].to_dict()
Dk = pd.read_csv("DK.csv", sep=";", header=None, names=["k", "val"]).set_index("k")["val"].to_dict()
Vt = pd.read_csv("vt.csv", sep=";", header=None, names=["t", "val"]).set_index("t")["val"].to_dict()

# Chargement de fi.csv
df_fi = pd.read_csv("fi.csv", sep=";", dtype={"i": str})
df_fi["fi"] = df_fi["fi"].replace(",", ".", regex=True).astype(float)
fi = df_fi.set_index("i")["fi"].to_dict()

# Chargement des clusters
clusti = pd.read_csv("clusti.csv", sep=";", header=None, names=["i", "cluster"]).set_index("i")["cluster"].to_dict()

# Sous-ensembles de clusters
ICentre = [i for i, c in clusti.items() if c == 'Centre']
IOuest = [i for i, c in clusti.items() if c == 'Ouest']
```

FIGURE 3.12 – Chargement des données sur Python

-Définition des variables de décisions :

```

z = mdl.integer_var_dict([(i, j, t) for i in I for j in J for t in T], name="z")
u = mdl.integer_var_dict([(i, j, k) for i in I for j in J for k in K], name="u")
w = mdl.integer_var_dict(K, name="w")
uj = mdl.integer_var_dict(J, name="uj")

# Variables binaires
y = mdl.binary_var_dict(I, name="y")
x = mdl.binary_var_dict([(i, j, s) for i in I for j in J for s in S], name="x")
r = mdl.binary_var_dict([(i, j, k, t) for i in I for j in J for k in J if j != k for t in T], name="r")

```

FIGURE 3.13 – Définition des variables de décisions sur Python

-Fonction objectif :

```

# Z3 : Réutilisation locale
Z3 = mdl.sum(u[i, j, k] for (i, j, k) in u if k in K_valid)

# Pondération
alpha = 0.5
beta = 0.3
gamma = 0.2

# Fonction objectif globale pondérée
mdl.minimize(alpha * Z1 + beta * Z2 - gamma * Z3)

```

FIGURE 3.14 – Définition de la fonction objectif Z3 sur Python

```

# Z1 : Coût logistique
Z1 = (
    mdl.sum(f1[i] * x[i] for i in I if i in f1 and i in x) + # Coûts fixes
    mdl.sum(C[i, j] * Qjs[j, s] * y[i, j, s]
            for i in I for j in J for s in S
            if (i, j) in C and (j, s) in Qjs and (i, j, s) in y) + # Affectation client
    mdl.sum(C[1, j] * z[1, j, t]
            for i in I for j in J for t in T
            if (i, j) in C and (i, j, t) in z) + # Livraison
    mdl.sum(Cij[i, j] * u[i, j, k]
            for (i, j, k) in u if (i, j) in Cij) + # Logistique inversée
    mdl.sum(safe_float(Pk[k]) * w[k]
            for k in K_valid if k in w) # Importation
)

# Z2 : Émissions CO2
Z2 = (
    mdl.sum(Eij[i, j] * z[1, j, t]
            for i in I for j in J for t in T
            if (i, j) in Eij and (i, j, t) in z) +
    mdl.sum(Eij[i, j] * u[i, j, k]
            for (i, j, k) in u if (i, j) in Eij) +
    mdl.sum(safe_float(Ek[k]) * w[k]
            for k in K_valid if k in w)
)

```

FIGURE 3.15 – Définition de la fonction objectif Z1 et Z2 sur Python

-Contraintes :

```
# Contraintes
# Chaque client est desservi exactement une fois pour Imaging (Make-to-Order)
for j in J:
    vars_aff = [y[i, j, "Imaging"] for i in I if (i, j, "Imaging") in y]
    if vars_aff:
        mdl.add_constraint(mdl.sum(vars_aff) == 1, ctname=f"assign_imaging_{j}")

# Chaque client est desservi au moins une fois pour US et PCS (Make-to-Stock)
for j in J:
    for s in S:
        if s != "Imaging":
            vars_aff = [y[i, j, s] for i in I if (i, j, s) in y]
            if vars_aff:
                mdl.add_constraint(mdl.sum(vars_aff) >= 1, ctname=f"assign_{s}_{j}")
```

FIGURE 3.16 – Définition de la fonction objectif Z3 sur Python

3.3.2 Résultats du modèle

Nous avons appliqué ce modèle aux trois emplacements d'entrepôts obtenus à partir de chacune des méthodes — Barycentre, p-centre et p-médian — et avons obtenu les résultats suivants pour chaque segments :

a-Ouverture des entrepôts :

Dans un premier temps, le modèle a permis d'évaluer la pertinence de l'ouverture des entrepôts après résolution. Cette étape constitue une condition préalable essentielle à l'activation du reste du système logistique.

```
Entrepôts ouverts :
- i1
- i2
- i3
```

FIGURE 3.17 – Résultats d'ouverture des entrepôt

Le résultat obtenu concernant la décision d'ouverture des entrepôts oriente directement la stratégie de distribution, dans la mesure où il détermine les points de départ des flux logistiques à l'échelle du territoire national.

Les entrepôts ouverts sont répartis en trois zones géographiques distinctes, correspondant aux trois clusters :

- L'entrepôt i correspond à l'entrepôt associé au cluster de **l'Est** (Cluster C0).
- L'entrepôt i correspond à l'entrepôt associé au cluster du **Centre** (Cluster C1).
- L'entrepôt i correspond à l'entrepôt associé au cluster de **l'Ouest** (Cluster C2).

b-Affectation des clients

L'affectation des clients est réalisée par segment de produit et par entrepôt, ce qui signifie que chaque client est associé à un seul et unique entrepôt pour chaque segment (Imaging, US, PCS). Cette règle garantit la cohérence logistique et facilite la planification des flux.

L'attribution s'appuie sur les résultats issus de trois méthodes de localisation (P-centre, P-médian et barycentre) qui ont été utilisées pour déterminer l'emplacement optimal des entrepôts au sein de chaque cluster géographique.

b.1-Affectation pour le segment Imaging :

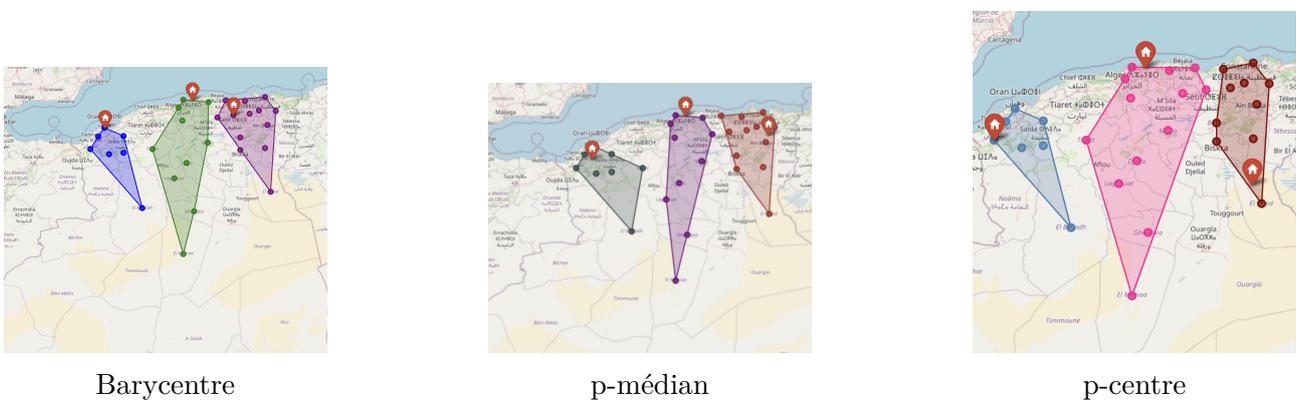


FIGURE 3.18 – Cartographie géographique des résultats d'affectation des clients imaging

b.2-Affectation pour le segment US :

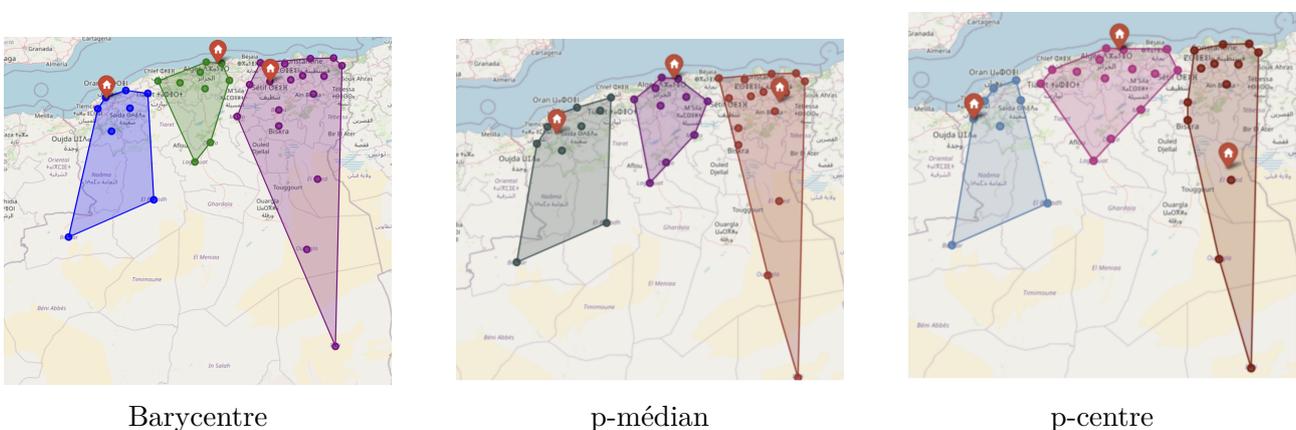


FIGURE 3.19 – Cartographie Géographique des résultats d'affectation des clients US

b.3-Affectation pour le segment PCS :

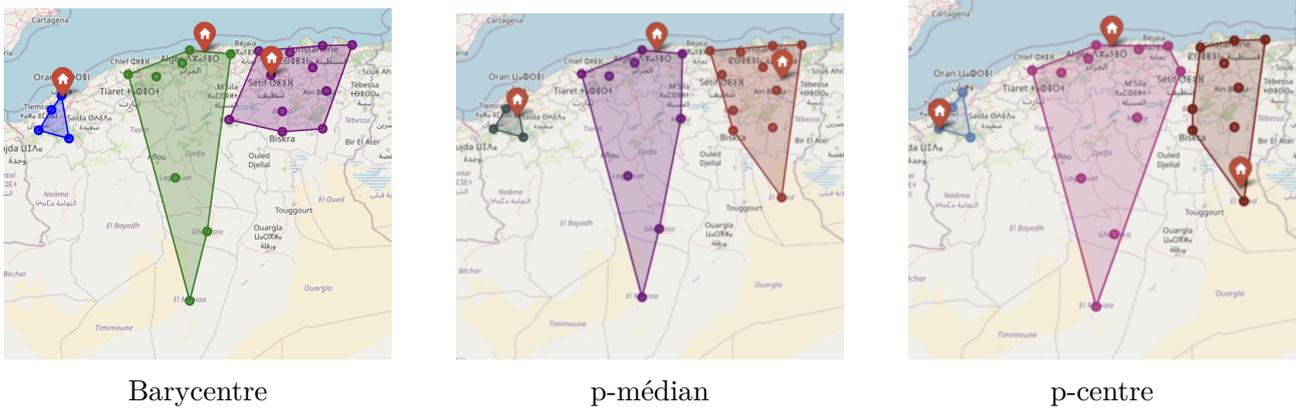


FIGURE 3.20 – Cartographie Géographique des résultats d’affectation des clients PCS

C-Nombre de trajets effectués des vers les clients par type de camion

Afin d’assurer la couverture logistique de l’ensemble des clients, le modèle d’optimisation a déterminé le nombre de trajets nécessaires entre chaque entrepôt et client, tout en tenant compte des capacités et disponibilités des différents types de camions.

Les résultats ci-dessous présentent les trajets simulés, répartis selon l’affectation client-entrepôt et le type de véhicule utilisé pour chaque segment(Imaging, US, PCS)

C.1-Nombre de trajets effectués pour le segment Imaging

Les résultats obtenus pour z_{ij}t sont les suivants :

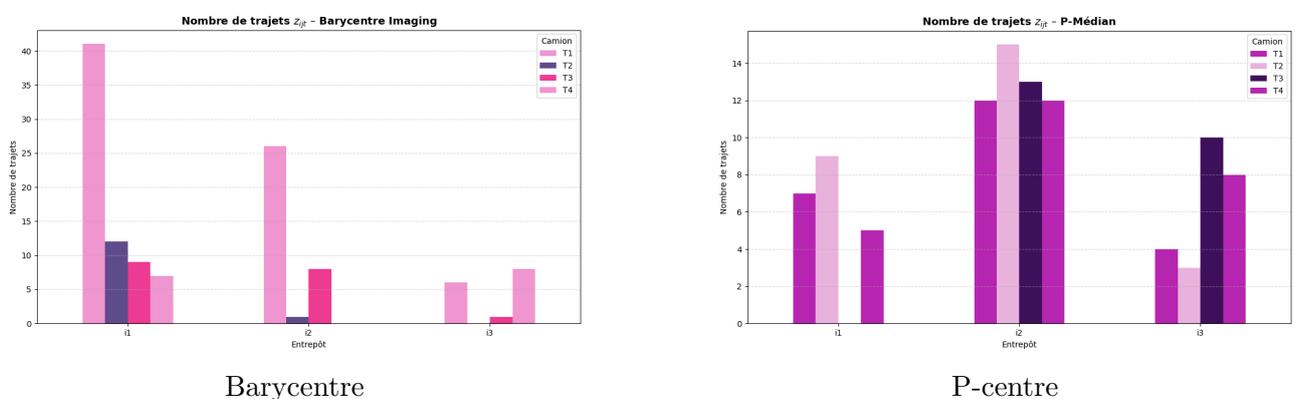


FIGURE 3.21 – Nombre de trajets par type de camion selon les méthodes Barycentre et P-centre pour le segment imaging

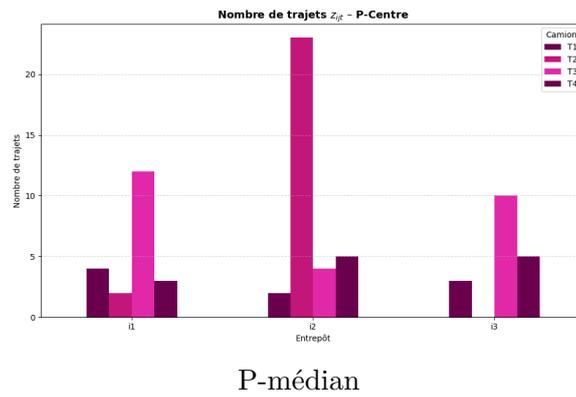


FIGURE 3.22 – Nombre de trajets par type de camion selon la méthode P-médian pour le segment imaging

D'après ses résultats nous pouvons conclure que la méthode du **Barycentre** permet une concentration optimale des flux, avec un volume de trajets élevé mais regroupé principalement sur un entrepôt. Cette configuration facilite la gestion des tournées et optimise l'utilisation des camions sur un périmètre réduit.

À l'inverse, les méthodes **P-Médian** et **P-Centre** répartissent les trajets entre plusieurs entrepôts, ce qui peut améliorer la couverture géographique, mais entraîne une dispersion des ressources et une charge logistique plus fragmenté.

C.2-Nombre de trajets effectués pour le segment US :

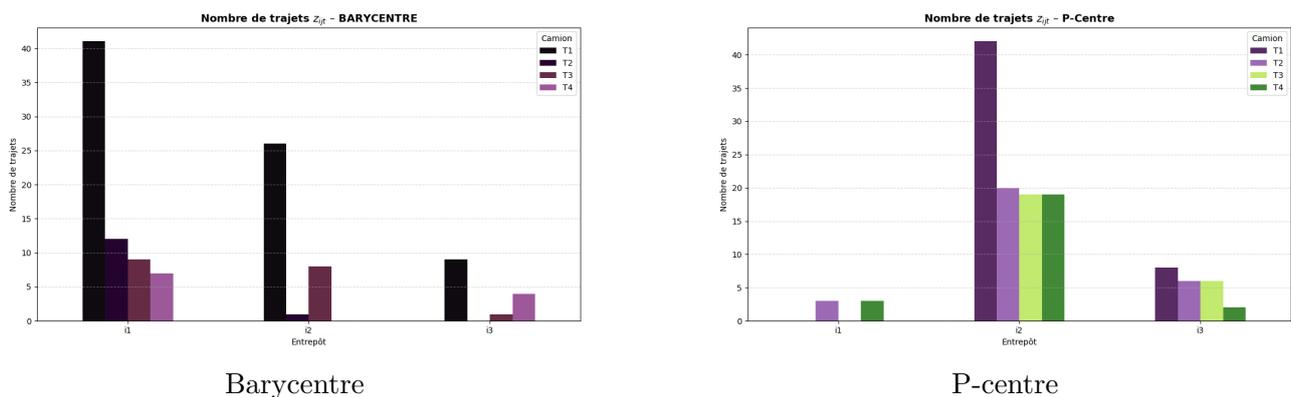


FIGURE 3.23 – Nombre de trajets par type de camion pour la methode du Barycentre et du P-centre pour le segment US

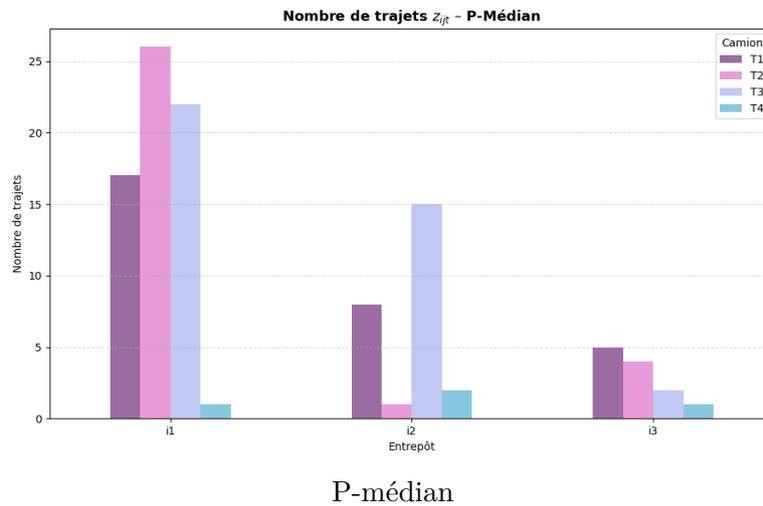


FIGURE 3.24 – Nombre de trajets par type de camion selon la méthode du P-médian pour le segment US

D’après les résultats obtenus, la méthode du **Barycentre** génère le plus grand nombre de trajets, concentrés majoritairement sur un seul entrepôt. Les méthodes **P-Médian** et **P-Centre** répartissent les trajets de manière plus diffuse, avec un volume global de trajets souvent inférieur, mais réparti entre plusieurs entrepôts.

C.3- Nombre de trajets effectués pour le segment PCS :

Les résultats montrent que la méthode du **Barycentre** engendre le **plus grand volume de trajets**, avec une répartition dense sur l’entrepôt i1. Ce volume élevé reflète une intensité logistique importante concentrée sur un site unique.

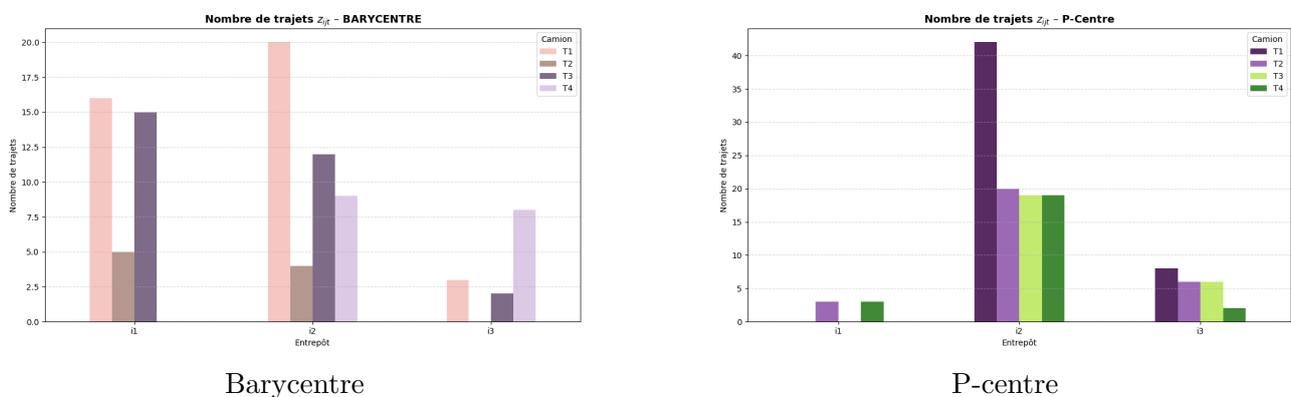


FIGURE 3.25 – Nombre de trajets par type de camion pour les méthodes Barycentre et P-centre pour le segment PCS

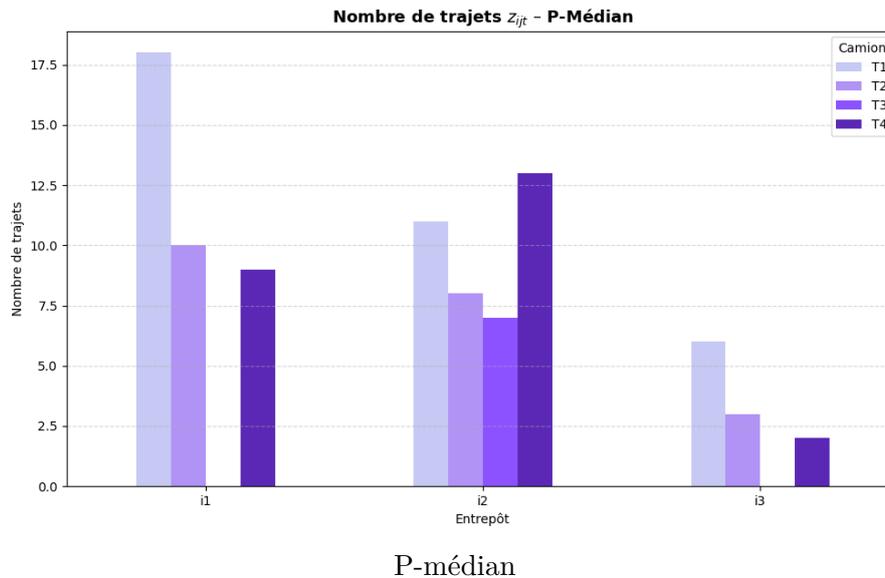


FIGURE 3.26 – Nombre de trajets par type de camion selon la méthode du P-médian pour le segment PCS

D-Coûts logistiques et émission carbone

Afin de comparer l'efficacité des différentes méthodes de localisation, nous avons évalué les trois méthodes, Barycentre, P-centre et P-médian, dont le tableau ci-dessous présente une synthèse des résultats obtenus selon deux critères essentiels : le coût logistique total et l'émission de carbone associée aux trajets.

Critères/Méthode	Barycentre	P-centre	P-médian
Coût logistique	10763238,92 DA	12419373,62 DA	11937112,56 DA
Émission carbone	23947,19 Kg	25125,06 Kg	24475,2 Kg

TABLE 3.1 – Comparaison des méthodes selon le coût logistique et l'émission carbone

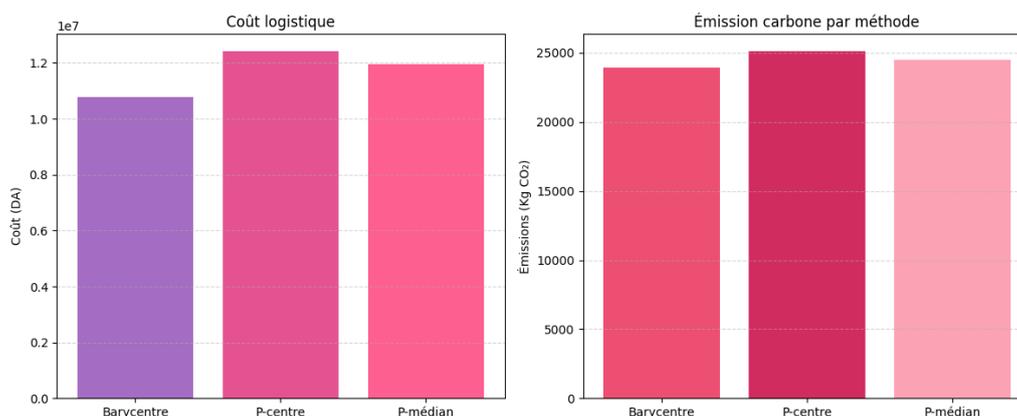


FIGURE 3.27 – Comparaison entre les coûts logistiques et émission carbone par méthode

Il ressort clairement que la méthode du barycentre affiche les performances les plus avantageuses. En effet, elle permet d'atteindre un coût logistique global de **10 763 238,92 DA**, soit le plus bas parmi les trois approches. Elle est également la moins émettrice en carbone, avec un total de **23 947,19 kg**, contre 25 125,06 kg pour le P-centre et 24 475,2 kg pour le P-médian.

Ces résultats soulignent la pertinence du barycentre en tant que méthode de choix dans le contexte de l'optimisation logistique de GE Healthcare, puisqu'elle permet à la fois une réduction significative des coûts et une minimisation de l'impact environnemental.

L'emplacement des entrepôts sont donc :

- **Pour la région Est** : Entrepôt de **Sétif**
- **Pour la région Centre** : Entrepôt Aramex de **Khemis El Khechna**
- **Pour la région Ouest** : Entrepôt d'**Oran**

Après avoir déterminé l'emplacement optimal des entrepôts et centre de distribution, nous allons élaborer un modèle mathématique pour optimiser les tournées de livraison des différents segments et ainsi calculer la distance totale et l'empreinte carbone.

3.4 Optimisation des tournées de véhicules (VRP) pour la réduction des coûts de transport et de l'empreinte Carbone

Cette section sera consacrée à l'élaboration d'un modèle de tournées de véhicules (VRP) dans une optique de réduction des coûts de transport.

Deux scénarios seront alors considérés : le premier correspond à la solution proposée avec trois entrepôts, et le second au cas actuel avec un seul entrepôt central. Une comparaison des résultats obtenus permettra ensuite d'identifier l'approche la plus efficace.

3.4.1 Construction des tournées par segment (Imaging, US, PCS)

Le modèle mathématique

– **Les paramètres du modèle :**

m : Nombre de véhicules disponibles par segment.

$V = \{0, 1, \dots, n\}$: Ensemble des nœuds (0 est le dépôt, les autres sont les clients).

$P = \{0, 1, \dots, m-1\}$: Ensemble des véhicules.

$A = \{(i, j) \in V \times V \mid i \neq j\}$: Ensemble des arcs.

F_{ij} : Fonction de coût (ou distance) pour parcourir l'arc (i, j) .

M : Une constante suffisamment grande pour la contrainte MTZ.

– **-Les variables de décisions :**

$$x_{ij}^p = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } p \text{ parcourt l'arc } (i, j) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall (i, j) \in A, \forall p \in P$$

$$y_i^p = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } p \text{ visite le nœud } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall i \in V, \forall p \in P$$

$$\text{used}_p = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } p \text{ est utilisé} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall p \in P$$

$u_i^p \in \mathbb{R}_+$ ordre de passage du véhicule p au nœud i

– **-Fonction objectif :** Minimiser la distance totale parcourue

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{(i, j) \in A} F_{ij} \cdot x_{ij}^p$$

– Les contraintes :

-Contrainte 1 : Visite unique de chaque véhicule

Chaque client doit être visité une seule fois et par un seul véhicule.

$$\sum_{p \in P} y_i^p = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}$$

-Contrainte 2 : Conservation des flux entrée/sortie

Si un véhicule visite une ville, alors il doit y entrer et en sortir exactement une fois.

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^p = y_i^p \quad (\text{flux sortant})$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ji}^p = y_i^p \quad (\text{flux entrant})$$

-Contrainte 3 : Utilisation minimum de deux véhicules

Au moins deux véhicules doivent être utilisés pour effectuer les tournées.

$$\sum_{p \in P} \text{used}_p \geq 2$$

$$\sum_{p \in P} \text{used}_p \geq 2$$

-Contrainte 4 : Départ et retour de chaque véhicule utilisé

Chaque véhicule utilisé doit partir du dépôt et y revenir exactement une fois.

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0j}^p = \text{used}_p \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} x_{i0}^p = \text{used}_p \quad \forall p \in P$$

-Contrainte 5 : Passage par le dépôt pour chaque client visité

Un véhicule ne peut visiter un client que s'il est effectivement utilisé (c'est-à-dire s'il passe par le dépôt).

$$y_i^p \leq \text{used}_p \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \forall p \in P$$

-Contrainte 6 : Élimination des sous-tours (MTZ)

Cette contrainte empêche la formation de boucles (sous-tours) entre clients sans passer par le dépôt.

Pour $i \neq j$, $i, j \in V \setminus \{0\}$, $p \in P$: $u_i^p - u_j^p + M \cdot x_{ij}^p \leq M - 1$

-Le modèle mathématique est donc structuré de la manière suivante :

Fonction objectif :

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in A} F_{ij} \cdot x_{ij}^p$$

Sous contraintes

$$\sum_{p \in P} y_i^p = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^p = y_i^p \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \forall p \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ji}^p = y_i^p \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \forall p \in P \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} \text{used}_p \geq 2 \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0j}^p = \text{used}_p \quad \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} x_{i0}^p = \text{used}_p \quad \forall p \in P \quad (6)$$

$$y_i^p \leq \text{used}_p \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \forall p \in P \quad (7)$$

$$u_i^p - u_j^p + M \cdot x_{ij}^p \leq M - 1 \quad \forall i \neq j, i, j \in V \setminus \{0\}, p \in P \quad (8)$$

Nous allons appliquer ce modèle pour chaque segments : Imaging, US, PCS pour le cas centralisé et décentralisé. Pour résoudre ce problème nous avons eu recours à la bibliothèque DO Cplex.

3.4.2 Analyse comparative : centralisation vs décentralisation

-**Scénario 1 : Application du VRP pour les entrepôts décentralisés.**

Pour chaque segment de client (Imaging, US, PCS), nous avons paramétré le modèle fonction de la zone géographique de chaque entrepôt (EST, OUEST , CENTRE).

Nous avons obtenu comme résultat la distance totale parcourue ainsi que l'empreinte carbone, ainsi que la tournée de véhicules par camion.(Voir Annexe 03).

-Résultat du segment imaging :

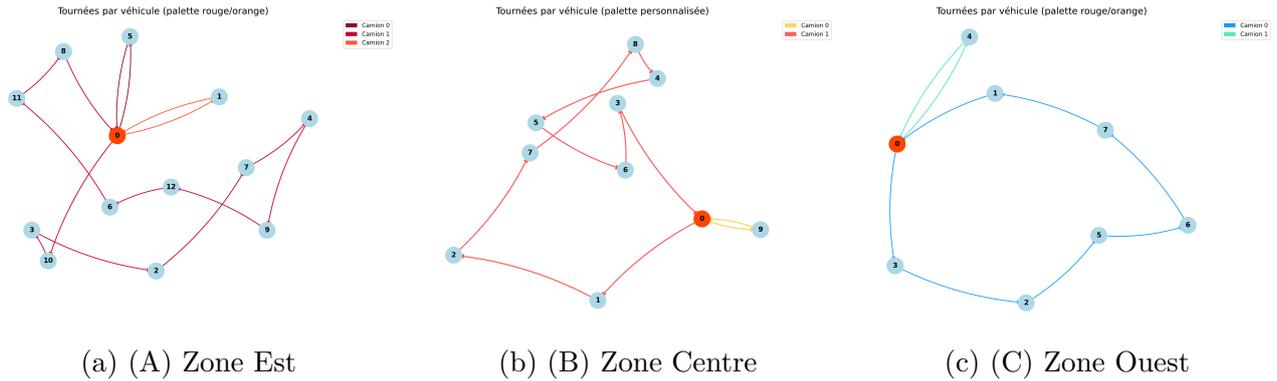


FIGURE 3.28 – Tournées de véhicule pour le segment Imaging

-Résultat du segment Ultrasons(US) :

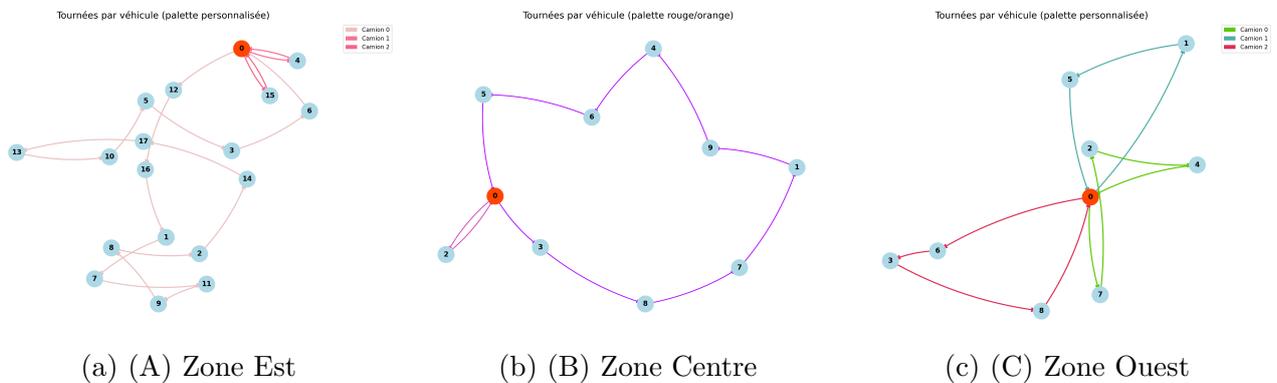


FIGURE 3.29 – Tournées de véhicule pour le segment US

-Résultats du segment PCS :

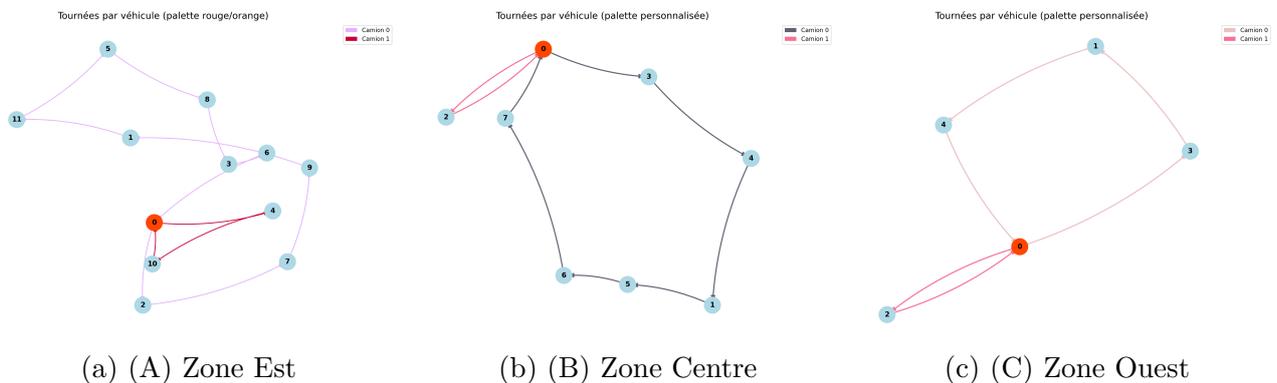


FIGURE 3.30 – Tournées de véhicule pour le segment US

-Le résultats de la distance parcourue ainsi que l'émission carbone sont présentées dans le tableau suivant :

– **Distance totale parcourue (En km) :**

	EST	CENTRE	OUEST
Imaging	997,99	1610,90	754,62
US	1795,63	1139,13	1227,10
PCS	1053,41	1046,81	344,13

TABLE 3.2 – Distances totales parcourues par zone et par segment

– **Émission Carbone (En kg) :**

	EST	Centre	Ouest
Imaging	2647,81	4317,21	2022,38
US	4812,29	305,87	2388,63
PCS	2823,14	2805,45	924,41

TABLE 3.3 – Émissions carbone par zone et par segment

– **Calcul des coûts de transport :**

	Imaging	US	PCS
Est	108871,64	114267,36	76611,64
Centre	175734,55	72490,09	76131,64
Ouest	82322,18	78088,18	25027,64

TABLE 3.4 – Coûts de transport (en DA) selon la zone géographique et le segment

-Scénario 2 : Application du VRP au cas actuel(Entrepôt Centralisé).

Pour chaque segment, nous avons appliqué le modèle en fonction des clients, les résultats relatifs à distance totale parcourue, à l’empreinte carbone, ainsi qu’aux coûts de transport sont présentés ci-dessous :

	Imaging	US	PCS
Distance (km)	3715,21	627592,5	391530
Coûts de transport (DZD)	949109	4222,1	2779,92
Émission Carbone (kg)	9956,76	11315,15	7450,19

TABLE 3.5 – Synthèse des distances, coûts et émissions par segment

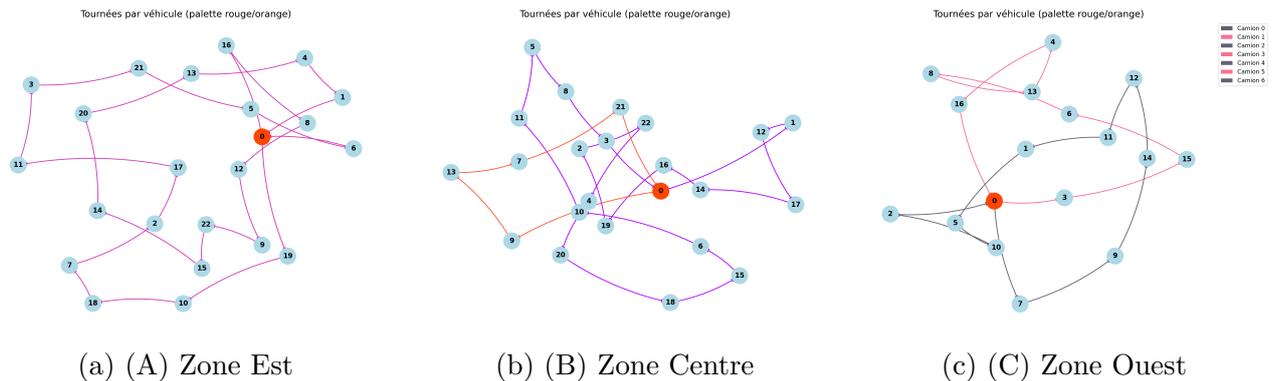


FIGURE 3.31 – Tournées de véhicule pour leS segments Imaging, US, PCS

	centralisation	décentralisation	Gain
coûts de transport	10 940 854.24 DZD	9 714 538.92 DZD	11.21 %
coûts d'entrepotage	532 478 DZD	1 048 700 DZD	-96.95 %
émission carbone	28 722.1 Kg	23 947.19 Kg	16.62 %
coût logistiques	11 473 332.24 DZD	10 763 238.92 DZD	6.18 %

TABLE 3.6 – Comparaison centralisation vs décentralisation sur plusieurs critères

Pour justifier les coûts de location annuelle des entrepôts, nous avons mené une démarche de benchmarking reposant sur des références concrètes du marché ainsi que sur les pratiques internes de GE Healthcare Algérie. L'entrepôt actuellement loué à Khemis El Khechna coûte 532478 DZD par an pour une surface correspondant à environ deux couloirs de stockage, soit l'équivalent de environ 140 m². Ce coût a servi de base comparative. Pour les nouveaux sites envisagés, nous avons pris en compte le prix au mètre carré pratiqué dans chaque région : environ 37000 DZD/m² à Khemis El Khechna, 41000 DZD/m² à Sétif, et 54000 DZD/m² à Oran. En multipliant ces tarifs par la même surface de référence, nous avons estimé un coût annuel de 451700 DZD pour l'entrepôt de Sétif et 597000 DZD pour celui d'Oran.

Cette méthode nous a permis de garantir une cohérence économique dans l'évaluation des alternatives, tout en restant alignés avec les volumes habituellement loués par GE Healthcare.

L'application du VRP nous a permis d'estimer les coûts logistiques ainsi que les émissions de carbone, et de comparer les deux scénarios. Dans ce qui suit, nous allons mobiliser une méthode d'aide à la décision afin d'orienter le choix vers la meilleure alternative.

3.5 Aide multicritère à la décision pour le choix de la meilleure stratégie : Application de la méthode AHP

Dans ce qui précède, nous avons proposé une solution qui vise à optimiser les coûts logistiques et particulièrement les coûts de transports.

L'application de la méthode **AHP** nous permettra de déterminer le meilleur choix d'approche à adopter pour la résolution de notre problématique.

Le choix des critères Pour savoir si l'on doit adapter la décentralisation d'entrepôts ou bien continuer avec la centralisation d'entrepôt, les critères à prendre en compte sont :

- Le coût de transport (C1)
- L'émission carbone (C2)
- Le coût d'importation (C3)
- La demande en imaging (C4)
- La demande en US (C5)
- La demande en PCS (C6)

Les alternatives

- **A1** : Un seul entrepôt ouvert
- **A2** : Deux entrepôts ouverts
- **A3** : Trois entrepôts ouverts

- Modélisation du problème de Centralisation/ Décentralisation :

Le schéma représentatif de la prise de décisions, entre les critères et les alternatives est présenté dans la figure suivante :

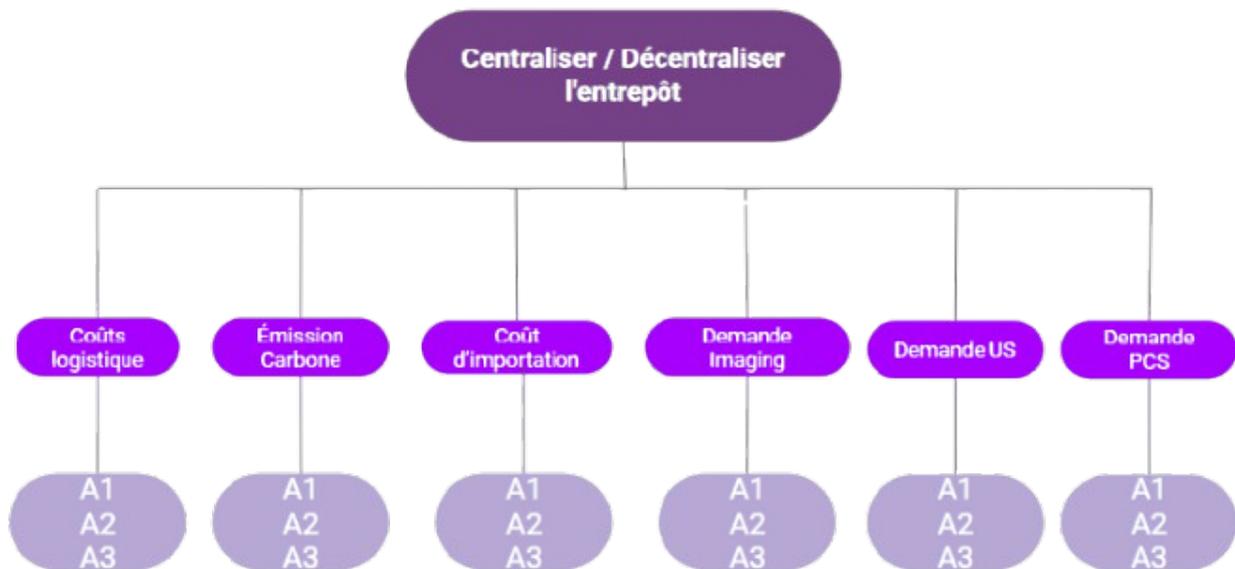


FIGURE 3.32 – Schéma représentatif de la prise de décisions

-Matrice de comparaison des critères :

L'élaboration de la matrice de comparaison des critères s'est fondée, pour les critères C1, C2 et C3, sur les résultats issus des modélisations mathématiques développées précédemment. Quant aux critères C4, C5 et C6, ils ont été établis à partir de l'analyse de la concentration des clients par segment présentée dans le premier chapitre.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Poids des Critères
C1	1	2	3	1/2	1/2	1/3	0,17
C2	1/2	1	3	1/3	1	1/3	0,13
C3	1/3	1/3	1	1/4	1/4	1/4	0,08
C4	2	3	4	1	1/3	1/3	0,21
C5	2	3	4	3	1	3	0,74
C6	2	3	4	3	1/3	1	0,37

TABLE 3.7 – Matrice de comparaison AHP avec les poids associés aux critères

-Le ratio de cohérence :

Le calcul du ratio de cohérence permettra d'évaluer la cohérence globale des appréciations

Lambda max	Indice de cohérence IC	IA	Ratio de cohérence RC
6,57	0,11	1,24	0,09

TABLE 3.8 – Mesures de cohérence pour la matrice AHP

$RC < 0,1 \Rightarrow$ Alors le degré de cohérence est jugé **acceptable**

-Matrice de comparaison des paires :

La matrice suivante présente l'évaluation des alternatives A1, A2 et A3 selon six critères déterminés. Cette étape constitue la base de cette méthode.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	0,11	0,12	0,33	0,6	0,11	0,12
A2	0,35	0,32	0,33	0,2	0,31	0,56
A3	0,54	0,56	0,33	0,2	0,58	0,32

TABLE 3.9 – Tableau des alternatives pondérées par critère

-Résultats :

A1 : Un seul ENTREPÔT	0,32
A2 : Deux entrepôts	0,70
A3 : Trois Entrepôts	0,95

TABLE 3.10 – Synthèse des scores finaux des alternatives selon la méthode AHP

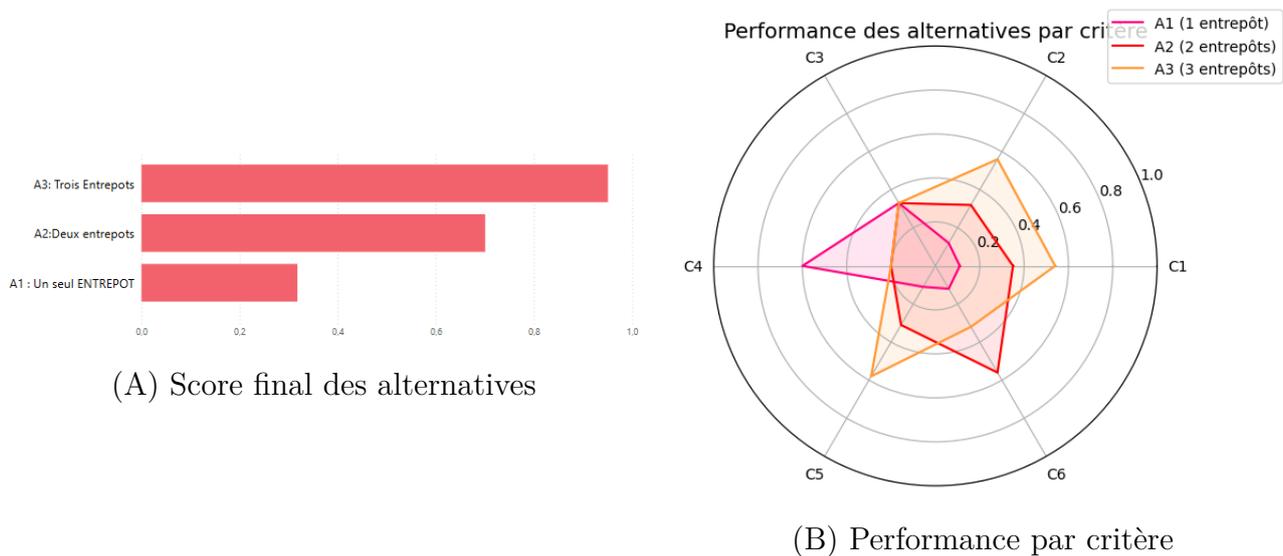


FIGURE 3.33 – Visualisation des performances des alternatives selon la méthode AHP

Comme l'illustre le graphique radar, les critères C1 et C2 constituent des facteurs déterminants en faveur de l'alternative A3. Les critères C5 et C6 peuvent également être retenus, ce qui s'avère cohérent avec les résultats du modèle mathématique ainsi qu'avec la répartition de la demande, plus importante pour les segments US et PCS que pour le segment Imaging.

3.6 Perspectives futures

Bien que les résultats obtenus soient satisfaisants, plusieurs perspectives futures peuvent être envisagées afin d'enrichir, de compléter et de renforcer la robustesse de cette solution dans un contexte en constante évolution. Voici quelques propositions de ces perspectives

Perspective 1 : Proposition d'un système de récupération des pièces

Le processus de harvest, consistant à récupérer des pièces détachées encore fonctionnelles à partir de machines déjà installées, se révèle particulièrement instable en raison de la variabilité fréquente des pièces récupérables d'une machine à une autre.

Afin d'apporter une approche plus structurée, une analyse croisée a été réalisée entre l'historique des importations de pièces et celui des récupérations. Pour ce faire, un benchmarking a été effectué à partir des listes de pièces associées à différents appareils, comparées à celles effectivement récupérées, afin d'observer leur évolution dans le temps.

Étant donné la nature évolutive et incertaine de ce processus, une démarche adaptable a été retenue. Ainsi, un diagramme BPMN a été élaboré pour formaliser la nouvelle stratégie de harvest et faciliter la mise à jour continue.

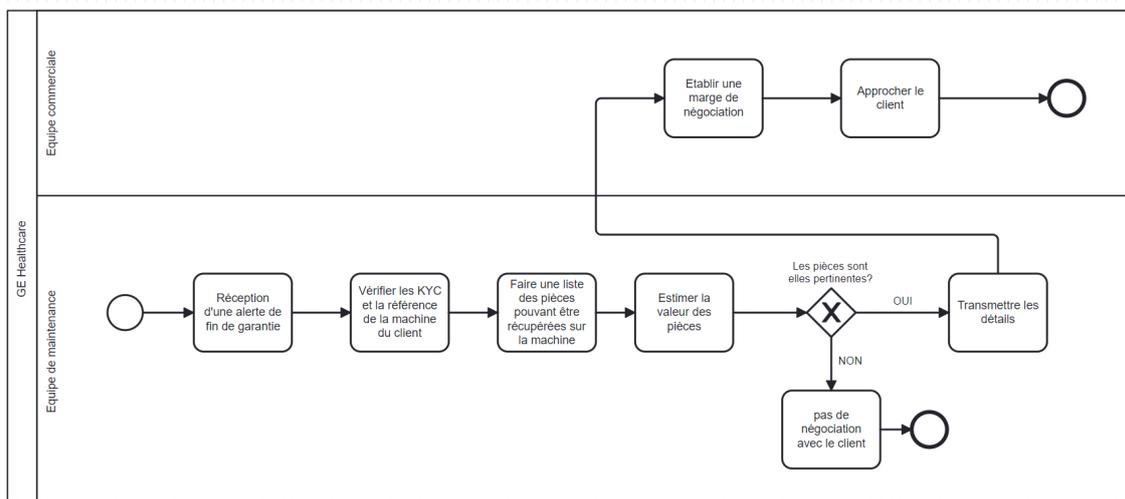


FIGURE 3.34 – Proposition d'une BPMN pour le processus de Harvest

Une fois les détails financiers relatifs à la machine du client analysés, l'équipe commerciale prend contact avec ce dernier à l'approche de la fin de la période de garantie. Elle lui propose alors une offre de reprise de son équipement actuel, en contrepartie de l'achat d'une machine de nouvelle génération ou d'un modèle plus récent et plus performant.

Afin de favoriser l'acceptation de cette offre, une réduction est appliquée sur le prix de la nouvelle machine. Celle-ci est calculée en fonction de la valeur estimée des pièces détachées récupérables sur l'ancienne machine, constituant ainsi une marge de négociation intégrée à la stratégie commerciale de l'entreprise.

De cette manière, l'entreprise parvient non seulement à réduire les coûts associés à l'importation de pièces de rechange, mais également à limiter son empreinte carbone en valorisant les composants récupérables. Parallèlement, cette approche favorise le renouvellement du parc machines chez les clients, contribuant ainsi à l'augmentation du volume des ventes

Proposition d'un système de vérification de la valeur des pièces :

Un outil informatique a été mis à disposition de l'équipe maintenance, sous la forme d'un code permettant, en saisissant le nom d'une pièce, d'accéder instantanément à l'historique complet du coût total d'importation de celle-ci. Cet outil vise à améliorer la réactivité et la prise de décision en matière de gestion des pièces détachées.

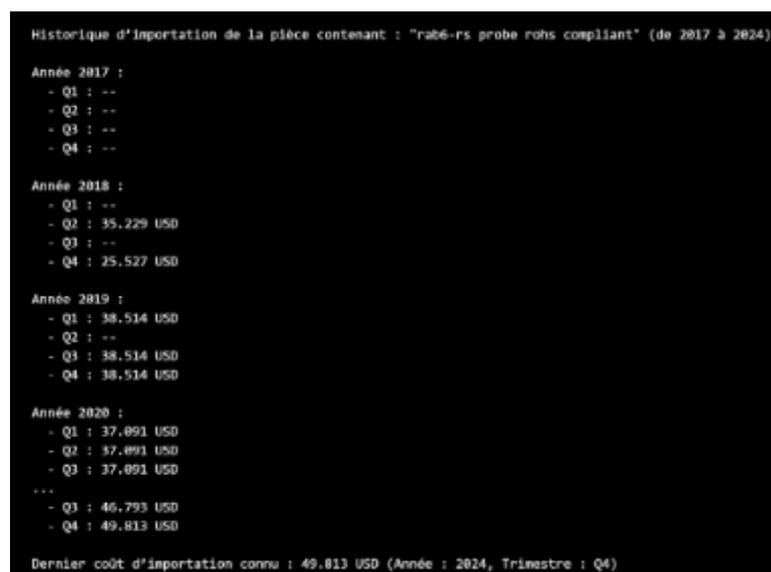


FIGURE 3.35 – Aperçu d'affichage pour la gestion des pièces

Ainsi, l'équipe de GE Healthcare est en mesure de suivre précisément l'évolution des prix des pièces détachées et d'évaluer, en fonction de cette tendance, la pertinence d'approcher un client pour une proposition de reprise et de renouvellement de machine.

Perspective 2 : Proposition d'un plan d'action de mise en œuvre progressive de la solution proposée au Wing to wing process

Afin de concrétiser la solution proposée et en assurer sa réussite sur le terrain, nous proposons ce plan d'action structuré décrivant les grandes phases à mettre

en œuvre de manière progressive.

-Phase 1 : Phase de conception Réorganisation des processus

Cette première phase est dédiée à l'élaboration des processus logistiques, à la préparation des données nécessaires, au choix des méthodes d'analyse et à la modélisation globale de la solution.

Etapes	Action	Objectif
1	Définir les zones de couverture de chaque entrepôt	Éviter les chevauchements, équilibrer les flux
2	Adapter le système ERP de GE Healthcare à la logistique multi-entrepôt	Intégrer la traçabilité par entrepôt
3	Revoir les règles de planification d'approvisionnements par site	Optimiser les niveaux de stock locaux
4	Planifier la distribution en fonction du VRP par segment.	Réduire les distances et les coûts.

FIGURE 3.36 – Plan d'action :Phase de conception Réorganisation des processus

-Phase 2 : Phase de mise en œuvre opérationnelle

Cette phase consiste au lancement des opérations sur le terrain, ouverture des entrepôts, affectation des ressources et mise en route des tournées

Etapes	Action	Objectif
1	Former les équipes logistiques aux nouveaux rôles (gestion multi-sites)	Assurer une gestion fluide et autonome
2	Mettre en place une coordination entre les trois sites	Synchronisation des stocks et des commandes
3	Déployer des indicateurs de performance par entrepôt	Suivi des KPI : Taux de rupture de stock par entrepôt, CO ₂ , Cycle time, Taux de rotation des stocks, Équilibrage de charge entre entrepôts

FIGURE 3.37 – Plan d'action :Phase de mise en œuvre opérationnelle

-Phase 3 : Phase de transition et suivi

Cette phase permet d'assurer le suivi régulier des flux logistiques, d'analyser les performances réalisées, de détecter les écarts et de procéder aux ajustements nécessaires.

Etapes	Action	Objectif
1	Réaliser un test pilote (ex : 1 cluster client = 1 entrepôt)	Valider le modèle
2	Mettre en place un reporting hebdomadaire centralisé	Détecter rapidement les écarts de performance
3	Réaliser un bilan à 3 mois	Ajuster les zones ou les volumes affectés si besoin

FIGURE 3.38 – Plan d'action :Phase de transition et suivi

-Phase 4 : Phase continue : amélioration et innovation

Cette dernière phase repose sur l'intégration progressive de nouvelles pratiques, l'actualisation des outils utilisés et l'adaptation continue en fonction des retours d'expérience et des évolutions du contexte.

Etapes	Action	Objectif
1	Mettre en place la logistique inverse par entrepôt(Harvest)	Réduction des coûts de retour et amélioration du service client
2	Appliquer les principes du Lean Management dans les entrepôts (5S, Kaizen, Kanban)	Réduction des gaspillages, amélioration continue
3	Standardiser les opérations clés dans les trois entrepôts et Organiser	Observer les opérations sur le terrain et impliquer les équipes et Assurer la qualité, limiter les écarts de performance
4	Intégrer un modèle prédictif de demande localisée	Réduire les ruptures et les surstocks

FIGURE 3.39 – Plan d'action :Phase continue

Perspective 3 : Proposition d'une décentralisation des ports d'importation pour une logistique régionale optimisée.

Actuellement, l'ensemble des équipements médicaux importés par GE Healthcare transitent exclusivement par le port d'Alger, quelle que soit leur destination finale sur le territoire national.

Cette centralisation engendre d'une part, un allongement significatif des temps de transport terrestre pour les zones éloignées du centre, telles que l'Est et l'Ouest du pays. Et d'autre part, elle augmente les coûts de transports internes en raison de la distance à parcourir depuis Alger jusqu'aux entrepôts régionaux.

Enfin, cette stratégie accentue la dépendance à une seule infrastructure portuaire, exposant la chaîne d'approvisionnement à des risques en cas d'encombrement, de perturbation logistique ou de saturation au niveau du port d'Alger.

Dans ce contexte, nous proposons une stratégie de décentralisation des points d'importation, visant à aligner les flux entrants avec les nouvelles zones de distributions définies par notre solution. Concrètement, cette approche consiste à adapter le choix du port d'entrée des marchandises en fonction de leur destination finale :

- **Pour l'entrepôt de Sétif**, couvrant la région Est, les produits seront désormais importés via **le port de Jijel**, bien plus proche géographiquement. Ce choix stratégique permet de réduire significativement les temps de transit ainsi que les coûts de transport terrestre vers l'Est.
- **Pour l'entrepôt d'Oran**, en charge de la région Ouest, les marchandises seront acheminées directement via **le port d'Oran**. Cela évite un détour par Alger, ce qui renforce la réactivité logistique et fluidifie la chaîne d'approvisionnement dans cette zone.

Par ailleurs, cette stratégie ouvre la voie à une **meilleure intégration territoriale** grâce à une coopération accrue avec les autorités portuaires locales. Elle favorise également la collaboration logistique avec les acteurs présents sur les ports secondaires, contribuant ainsi à un développement régional plus équilibré.

3.7 Conclusion du chapitre :

Ce chapitre a permis de construire une solution logistique améliorée, en mettant en évidence les pistes d'amélioration du modèle actuel de distribution, et plus généralement du processus Wing to Wing.

Grâce à une segmentation géographique des clients, à l'utilisation de modèles de localisation-allocation, et à la mise en place d'un modèle mathématique multi-objectif, une nouvelle organisation logistique a été proposée.

L'optimisation des tournées de distribution, ainsi que l'évaluation des différents scénarios à l'aide d'une méthode multicritère, ont permis de comparer les options possibles. Les résultats obtenus offrent des pistes concrètes pour renforcer durablement la chaîne logistique de GE Healthcare Algérie, tout en ouvrant la voie à d'autres améliorations futures.

Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche d'optimisation de la chaîne logistique de GE Healthcare Algérie, acteur majeur dans la distribution d'équipements médicaux en Algérie. Le schéma logistique centralisé en vigueur révèle désormais ses contraintes structurelles – en termes de coût et d'empreinte carbone – notre travail a visé à repenser le Wing to Wing process, en y intégrant une logique circulaire et en proposant un modèle décentralisé, plus agile et durable.

La méthodologie adoptée repose sur la mobilisation conjointe d'outils de modélisation avancée et de méthodes d'aide à la décision. Une première phase a consisté à réaliser une segmentation géographique de la clientèle à l'aide de l'algorithme K-means, dans le but d'identifier des zones de couverture logiquement structurées. À partir de cette segmentation, des modèles de localisation-allocation ont été appliqués afin de déterminer les emplacements optimaux des entrepôts. Un modèle multi-objectif a par ailleurs été utilisé pour différencier les zones en fonction des segments de produits, facilitant ainsi une meilleure compréhension de la répartition de la demande.

La seconde phase du projet s'est focalisée sur l'optimisation des flux physiques via la résolution d'un Green Vehicle Routing Problem (VRP), prenant en compte les contraintes de capacité, de typologie produit, ainsi que l'impact environnemental des trajets. Enfin, une analyse multicritère par la méthode AHP a permis de comparer plusieurs scénarios logistiques, sur la base d'indicateurs économiques, écologiques et opérationnels.

La mise en œuvre du modèle proposé a permis d'atteindre plusieurs améliorations notables : une réduction des délais de livraison grâce à une meilleure proximité avec les zones à forte demande, un allègement de la charge sur l'entrepôt principal via une répartition sur trois plateformes, ainsi qu'une baisse des coûts logistiques. Par ailleurs, le service après-vente est optimisé grâce à une gestion facilitée des pièces de rechange, tandis que l'empreinte carbone est réduite par l'optimisation des trajets de livraison.

Enfin, au-delà des gains opérationnels, ce projet constitue une réponse stratégique aux enjeux auxquels fait face GE Healthcare Algérie. Il permet d'aligner les flux logistiques de l'entreprise sur des impératifs croissants de performance, de réactivité et de durabilité. Il ouvre également la voie à une transition progressive vers un modèle de *Closed Loop Supply Chain*, plus résilient et mieux adapté aux exigences actuelles de la logistique des dispositifs médicaux.

En conclusion, même si la solution proposée constitue une avancée significative vers une chaîne logistique plus performante et durable, elle représente une première étape dans un processus d'amélioration continue. Dans cette dynamique, plusieurs perspectives d'évolution peuvent être envisagées. Il serait notamment pertinent d'approfondir l'intégration de la logistique inverse à l'échelle opérationnelle, en explorant des pistes de valorisation des pièces récupérées. Par ailleurs, l'adoption d'outils de *Business Intelligence* pourrait améliorer le pilotage en temps réel des flux et renforcer la capacité décisionnelle de l'entreprise. Enfin, l'automatisation progressive de certaines étapes du processus *Wing to Wing* – notamment le suivi post-installation – permettrait d'optimiser la traçabilité et d'accroître la réactivité du service après-vente.

Bibliographie

1. **ADEME.** (2010). *Guide méthodologique - Bilan Carbone®*.
<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/96-guide-methodologique-bilan-carbone.html>
2. **Alinaghian, M., & Alinaghian, H.** (2020). A hybrid multi-objective optimization model for healthcare supply chain network design under uncertainty. *Applied Sciences*, 10(23), 8505.
<https://doi.org/10.3390/app10238505>
3. **Amidi, S., & Amidi, S.** (s.d.). *CS 229 - Machine Learning Cheatsheet : Unsupervised Learning*. Stanford University.
<https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-229/cheatsheet-unsupervised-learning>
4. **Asghari, R., Zandieh, M., & Roshanaei, V.** (2020). A multi-objective robust optimization model for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124208.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124208>
5. **Base Carbone® / ADEME.** (n.d.). *Facteurs d'émissions de référence pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre*.
<https://www.basecarbone.fr>
6. **Beamon, B. M.** (1998). Supply chain design and analysis : Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55, 281–294.
7. **Ben Jeddou, M., Kalboussi, W., & Dhouib, A.** (2015). Application de la méthode AHP pour le choix multicritères des fournisseurs. *Revue Marocaine de Recherche en Management et Marketing*, 16, 62–77.
8. **Blental.** (s.d.). *Algorithme k-means : comment ça marche ?*
<https://blental.io/algorithme-k-means-comment-ca-marche>
9. **Bookshelf.** (2005). *Quality through collaboration : The future of rural health care*. National Academies Press.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK22832/>
10. **Buttigieg, S. C., Bezzina, F., Xuereb, A., & Dey, P. K.** (2020). Healthcare supply chain management : Application in the Maltese Healthcare System. *Health Services Management Research*, 33(2), 55–65.
<https://doi.org/10.1177/0951484819871003>
11. **Canada, S.** (2013). *LEED 5A – Développement durable*.
12. **Fortune Business Insights.** (2025). *Taille du marché des dispositifs médicaux... jusqu'en 2032*.
<https://www.fbi100085.com>
13. **GE Healthcare.** (2023). *GE Healthcare Sustainability Report 2023*.
<https://www.gehealthcare.fr/-/jssmedia/gehc/us/files/about-us/sustainability/reports/ge-healthcare-sustainability-report-2023.pdf>
14. **GlobeNewswire.** (2024). *Medical Devices Technologies and Global Market Outlook 2024–2029*.
<https://www.globenewswire.com/>
15. **Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D.** (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain : A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>

16. **Graungaard Pedersen, G., & Graungaard, A. H.** (2012). Achieving quality in healthcare logistics. *BMC Health Services Research*, *12*, 263.
<https://doi.org/10.1186/1472-6963-12-263>
17. **Hammachi, K.** (2021). *Cours d'aide multicritère à la décision*. Support de cours.
18. **IPCC.** (2021). *AR6 Climate Change 2021 : The Physical Science Basis*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
19. **Liu, X., Peng, X., & Gu, M.** (2022). Logistics distribution route optimization based on genetic algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Article ID 8486438.
<https://doi.org/10.1155/2022/8486438>
20. **Lin, C., Huang, Y., & Liu, S.** (2014). A cooperative transmission-shipment problem for green supply chain management. *European Journal of Operational Research*, *233*(2), 370–380.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.013>
21. **Mathew, J., John, J., & Kumar, S.** (2014). Supply Chain Management in Healthcare. *Proceedings of the POMS Conference, IIM Lucknow*.
22. **MEDICA Magazine.** (2024). *Quelle situation actuelle pour le commerce du matériel médical en Algérie ?*
<https://medica-magazine.com/>
23. **Meijboom, B.** (2011). Logistics and supply chain management in health services.
24. **Mordor Intelligence.** (2024). *Rapport sur le marché mondial des technologies de dispositifs médicaux*.
<https://www.mordorintelligence.com/>
25. **Moslem, S., Ghorabzadeh, O., Blaschke, T., & Dubelza, S.** (2019). Analysing stakeholder consensus... *Sustainability*, *11*(12), 3271.
<https://doi.org/10.3390/su11123271>
26. **Nafea, M., Shihata, L. A., & Mashaly, M.** (2025). Integrating social sustainability... *Technologies*, *13*, 100414.
<https://doi.org/10.3390/technologies13040149>
27. **Nwankwo, H.** (2008). Heuristics for location-routing problems.
28. **Pal, R., Torstensson, H., & Mattila, H.** (2022). Antecedents of supplier performance in a sustainable supply chain. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*, 91105–91126.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-22147-z>
29. **Pedersen, G. P., & Graungaard, A. H.** (2012). Healthcare logistics—multiple stakeholder perspective. *BMC Health Services Research*, *12*, 263.
30. **Prodhon, C.** (2006). *Le problème de localisation-routage* [Doctoral dissertation, Université de Technologie de Troyes].
31. **Rasool, H., Reddy, B. S., & Reddy, V.** (2020). Optimization of healthcare supply chain management : A case study approach. *International Journal of Supply Chain Management*, *9*(2), 125–134.
32. **Samadi, A., Mehrnarf, N., Fathollahi Fard, A. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M.** (2018). Heuristic-based metaheuristics... *Journal of Industrial and Production Engineering*, *35*(5), 314–330.
<https://doi.org/10.1080/21681015.2017.1422039>
33. **Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., & Shapiro, A.** (2005). A stochastic programming approach... *European Journal of Operational Research*, *167*(1), 96–115.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.046>
34. **Sawarkar, P.** (2024). Comprehensive value chain analysis of 1mg. *International Journal of Commerce and Management Studies*, *9*(4), 1–35.
<https://www.ijcams.com>
35. **Shaik, M. N., & Abdul-Kader, W.** (2014). Prioritization of factors... *Journal of Modelling in Management*, *9*(3), 305–320.
<https://doi.org/10.1108/JM2-05-2012-0015>
36. **Sharma, M., & Kamble, S. S.** (2020). Waste management using IoT. *Waste Management*, *104*, 349–361.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.038>

37. **Smart Freight Centre.** (n.d.). *Global Logistics Emissions Council (GLEC) Framework*.
<https://www.smartfreightcentre.org/...>
38. **Stanford University.** (2024). *Unsupervised Learning Cheatsheet*.
<https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-229/cheatsheet-unsupervised-learning>
39. **Télécom Bretagne – LabSTICC.** (2011). *RR-2011-03 LUSI complet* [Rapport de recherche]. SlideShare.
40. **Travaux et devoirs du cours Big data et data mining.** (2025).
<https://classroom.google.com/c/NzIzOTE4NTk3NTU4>
41. **UK Government.** (2024). *Government conversion factors for company reporting*.
<https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting>
42. **Unknown authors.** (2023). *Méthodologie d'optimisation logistique intégrée pour le secteur de la santé*. Document non référencé.
43. **Zammit, A., Muscat, A., & Portelli, J.** (2020). Healthcare Supply Chain Management... *Lecture Notes in Logistics*, Springer, pp. 393–404.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-40162-1_33
44. **Zidi, S., Hamani, N., & Kermad, L.** (2019). Proposition d'une approche de reconfiguration des processus métiers. *ISTE OpenScience*.
<https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2019.0374>

Annexes

Annexe 01 : Clearance Process

1 - Réception des marchandises (équipements) :

Une fois arrivé sur le port d'Alger, le manifeste est présenté à la douane.

Un manifeste est un document de transport (dans notre cas maritime), qui récapitule l'ensemble des marchandises chargées dans un port à destination d'un autre port.

Le manifeste est introduit dans le système informatique de la douane.

Les marchandises sont comptées physiquement et sont stockées temporairement dans l'entrepôt sous douane.

Lorsque la **correspondance** entre le manifeste physique et le manifeste informatique est confirmée et approuvée, un avis d'arrivée est imprimé.

2 - Le dédouanement :

- Déclaration sur système :

Enregistrement de la déclaration (numéro, date)

Signature, impression et validation de la déclaration douanière.

Documents nécessaires :

- La facture commerciale domiciliée.
- Titre de transport "BL ou LTA" copie ou original.
- Certificat d'origine.
- Certificat de conformité.
- Copie du registre de commerce de droit algérien.
- Copie de la carte fiscale délivrée par les services fiscaux territorialement compétents.
- Tout autre document exigible comme formalité administrative particulière, ou pour le bénéfice d'un avantage fiscal lié à un régime préférentiel.
- La déclaration validée D10 Douane.

La figure suivante représente un schéma simplifié de la procédure :

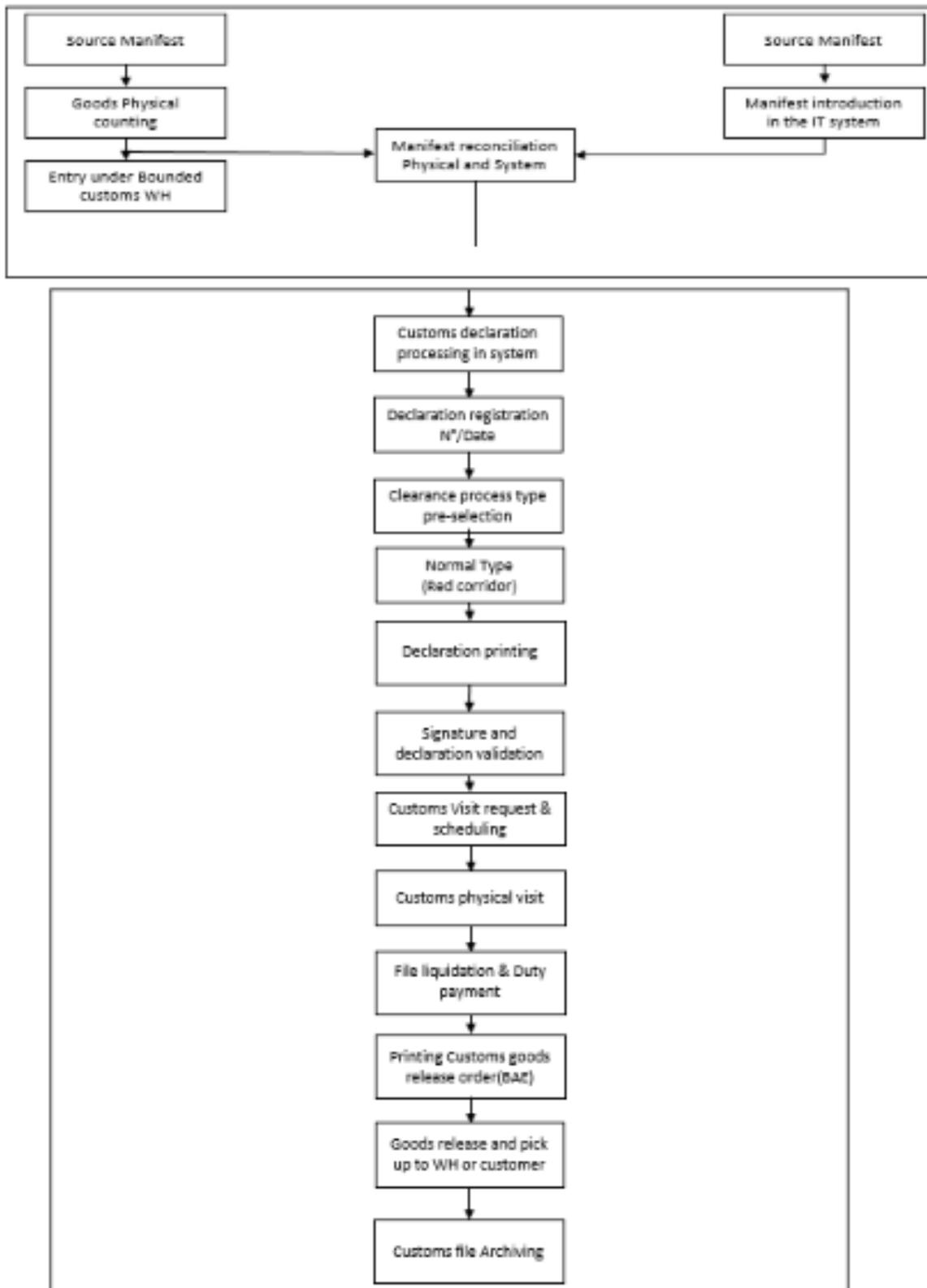


FIGURE 3.40 – Schéma simplifié du processus de dédouanement

- Le Circuit Rouge :

Circuit Rouge : Normal type (5 à 10 jours ouvrés)

Inspection physique systématique.

Demande et planification d'une visite physique par la douane.

Réalisation d'une visite physique par la douane.

- Liquidation du dossier douanier :

Un calcul des droits de douanes, TVA à l'importation et autres éventuelles taxes sont effectués en se basant sur la valeur de la marchandise, le HS code et les réglementations douanières sur ce type de marchandise.

- Paiement des droits de douanes :

Doit être confirmé pour libérer la marchandise.

- Délivrance de la BAE par la douane :

La BAE (*Bon à Enlever*) est une autorisation officielle de sortie des marchandises hors de la zone douanière, indispensable pour le retrait physique des biens.

- Libération de la marchandise & archivage du dossier douanier :

Les marchandises sont retirées physiquement de la zone sous douane, elles sont ensuite envoyées et stockées dans l'entrepôt Aramex ou bien envoyées directement au client final si son site est prêt.

Le dossier est ensuite archivé afin de garantir une traçabilité du dossier et de faciliter des audits futurs.

Annexe 02 : Résultats du modèle mathématique Multi-Objectif

A-Résultats d'affectation des clients

Segment Imaging

```

y["i1","j2","Imaging"] = 1
y["i1","j3","Imaging"] = 1
y["i1","j4","Imaging"] = 1
y["i1","j5","Imaging"] = 1
y["i1","j6","Imaging"] = 1
y["i1","j7","Imaging"] = 1
y["i1","j9","Imaging"] = 1
y["i1","j11","Imaging"] = 1
y["i1","j12","Imaging"] = 1
y["i1","j13","Imaging"] = 1
y["i1","j14","Imaging"] = 1
y["i1","j16","Imaging"] = 1
y["i1","j17","Imaging"] = 1
y["i1","j18","Imaging"] = 1
y["i2","j22","Imaging"] = 1
y["i2","j23","Imaging"] = 1
y["i2","j27","Imaging"] = 1
y["i2","j28","Imaging"] = 1
y["i2","j29","Imaging"] = 1
y["i2","j30","Imaging"] = 1
y["i2","j31","Imaging"] = 1
y["i2","j32","Imaging"] = 1
y["i2","j35","Imaging"] = 1
y["i3","j36","Imaging"] = 1
y["i3","j38","Imaging"] = 1
y["i3","j39","Imaging"] = 1
y["i3","j41","Imaging"] = 1
y["i3","j44","Imaging"] = 1
y["i3","j45","Imaging"] = 1

```

(a) Barycentre

```

y["i1","j2","Imaging"] = 1
y["i1","j3","Imaging"] = 1
y["i1","j4","Imaging"] = 1
y["i1","j6","Imaging"] = 1
y["i1","j7","Imaging"] = 1
y["i1","j9","Imaging"] = 1
y["i1","j11","Imaging"] = 1
y["i1","j12","Imaging"] = 1
y["i1","j13","Imaging"] = 1
y["i1","j17","Imaging"] = 1
y["i1","j18","Imaging"] = 1
y["i2","j5","Imaging"] = 1
y["i2","j14","Imaging"] = 1
y["i2","j16","Imaging"] = 1
y["i2","j22","Imaging"] = 1
y["i2","j23","Imaging"] = 1
y["i2","j27","Imaging"] = 1
y["i2","j28","Imaging"] = 1
y["i2","j29","Imaging"] = 1
y["i2","j30","Imaging"] = 1
y["i2","j31","Imaging"] = 1
y["i3","j32","Imaging"] = 1
y["i3","j35","Imaging"] = 1
y["i3","j36","Imaging"] = 1
y["i3","j38","Imaging"] = 1
y["i3","j39","Imaging"] = 1
y["i3","j41","Imaging"] = 1
y["i3","j44","Imaging"] = 1
y["i3","j45","Imaging"] = 1

```

(b) p-médian

```

y["i1","j2","Imaging"] = 1
y["i1","j3","Imaging"] = 1
y["i1","j4","Imaging"] = 1
y["i1","j6","Imaging"] = 1
y["i1","j7","Imaging"] = 1
y["i1","j9","Imaging"] = 1
y["i1","j11","Imaging"] = 1
y["i1","j12","Imaging"] = 1
y["i1","j13","Imaging"] = 1
y["i2","j5","Imaging"] = 1
y["i2","j14","Imaging"] = 1
y["i2","j16","Imaging"] = 1
y["i2","j17","Imaging"] = 1
y["i2","j18","Imaging"] = 1
y["i2","j22","Imaging"] = 1
y["i2","j23","Imaging"] = 1
y["i2","j27","Imaging"] = 1
y["i2","j28","Imaging"] = 1
y["i2","j29","Imaging"] = 1
y["i2","j30","Imaging"] = 1
y["i2","j31","Imaging"] = 1
y["i2","j32","Imaging"] = 1
y["i2","j35","Imaging"] = 1
y["i3","j36","Imaging"] = 1
y["i3","j38","Imaging"] = 1
...
y["i3","j41","Imaging"] = 1
y["i3","j43","Imaging"] = 1
y["i3","j44","Imaging"] = 1
y["i3","j45","Imaging"] = 1

```

Output is truncated. View as a scrollable element or open in a new window.

(c) p-centre

FIGURE 3.41 – Affichage Python des résultats de la variable Y_{ijs} pour le segment imaging selon les trois méthodes

Cluster	Client
i1	j2
i1	j3
i1	j4
i1	j5
i1	j6
i1	j7
i1	j9
i1	j11
i1	j12
i1	j13
i1	j14
i1	j16
i1	j17
i1	j18
i2	j22
i2	j23
i2	j27
i2	j28
i2	j29
i2	j30
i2	j31
i2	j32
i2	j35
i3	j36
i3	j38
i3	j39
i3	j41
i3	j43
i3	j44
i3	j45

(a) Barycentre

Cluster	Client
i1	j2
i1	j3
i1	j4
i2	j5
i1	j6
i1	j7
i1	j9
i1	j11
i1	j12
i1	j13
i2	j14
i1	j16
i1	j17
i1	j18
i2	j22
i2	j23
i2	j27
i2	j28
i2	j29
i2	j30
i2	j31
i2	j32
i3	j35
i3	j36
i3	j38
i3	j39
i3	j41
i3	j43
i3	j44
i3	j45

(b) p-médian

Cluster	Client
i1	j2
i2	j3
i1	j4
i2	j5
i1	j6
i1	j7
i1	j9
i1	j11
i1	j12
i1	j13
i2	j14
i1	j16
i2	j17
i1	j18
i2	j22
i2	j23
i2	j27
i2	j28
i2	j29
i2	j30
i2	j31
i2	j32
i2	j35
i3	j36
i3	j38
i3	j39
i3	j41
i3	j43
i3	j44
i3	j45

(c) p-centre

FIGURE 3.42 – Affichage Excel des résultats de la variable Y_{ijs} pour le segment imaging selon les trois méthodes

Segment US

```

y["i1","j1","Imaging"] = 1
y["i1","j2","US"] = 1
y["i1","j3","PCS"] = 1
y["i1","j4","Imaging"] = 1
y["i1","j5","US"] = 1
y["i1","j6","PCS"] = 1
y["i1","j7","Imaging"] = 1
y["i1","j8","US"] = 1
y["i1","j9","PCS"] = 1
y["i1","j10","Imaging"] = 1
y["i1","j11","US"] = 1
y["i1","j13","PCS"] = 1
y["i1","j14","Imaging"] = 1
y["i1","j15","US"] = 1
y["i1","j16","PCS"] = 1
y["i1","j17","Imaging"] = 1
y["i1","j18","US"] = 1
y["i1","j20","PCS"] = 1
y["i2","j21","Imaging"] = 1
y["i2","j22","US"] = 1
y["i2","j23","PCS"] = 1
y["i2","j24","Imaging"] = 1
y["i2","j25","US"] = 1
y["i2","j26","PCS"] = 1
y["i2","j27","Imaging"] = 1
...
y["i3","j41","Imaging"] = 1
y["i3","j42","US"] = 1
y["i3","j43","PCS"] = 1
y["i3","j44","Imaging"] = 1
Output is truncated. View as a scrollable element or open in
    
```

(a) Barycentre

```

y["i1","j1","US"] = 1
y["i1","j2","US"] = 1
y["i1","j3","US"] = 1
y["i1","j4","US"] = 1
y["i1","j6","US"] = 1
y["i1","j7","US"] = 1
y["i1","j8","US"] = 1
y["i1","j9","US"] = 1
y["i1","j10","US"] = 1
y["i1","j11","US"] = 1
y["i1","j13","US"] = 1
y["i1","j14","US"] = 1
y["i1","j15","US"] = 1
y["i1","j16","US"] = 1
y["i1","j17","US"] = 1
y["i1","j18","US"] = 1
y["i2","j5","US"] = 1
y["i2","j21","US"] = 1
y["i2","j22","US"] = 1
y["i2","j23","US"] = 1
y["i2","j24","US"] = 1
y["i2","j25","US"] = 1
y["i2","j26","US"] = 1
y["i2","j27","US"] = 1
y["i3","j30","US"] = 1
...
y["i3","j39","US"] = 1
y["i3","j40","US"] = 1
y["i3","j42","US"] = 1
y["i3","j44","US"] = 1
Output is truncated. View as a scrollable element or open in
    
```

(b) p-médian

```

y["i1","j1","US"] = 1
y["i1","j2","US"] = 1
y["i1","j4","US"] = 1
y["i1","j6","US"] = 1
y["i1","j7","US"] = 1
y["i1","j8","US"] = 1
y["i1","j9","US"] = 1
y["i1","j10","US"] = 1
y["i1","j13","US"] = 1
y["i1","j15","US"] = 1
y["i2","j3","US"] = 1
y["i2","j5","US"] = 1
y["i2","j11","US"] = 1
y["i2","j14","US"] = 1
y["i2","j16","US"] = 1
y["i2","j17","US"] = 1
y["i2","j21","US"] = 1
y["i2","j22","US"] = 1
y["i2","j23","US"] = 1
y["i2","j24","US"] = 1
y["i2","j25","US"] = 1
y["i2","j26","US"] = 1
y["i2","j27","US"] = 1
y["i3","j30","US"] = 1
y["i3","j31","US"] = 1
...
y["i3","j40","US"] = 1
y["i3","j41","US"] = 1
y["i3","j42","US"] = 1
y["i3","j44","US"] = 1
Output is truncated. View as a scrollable element or open in
    
```

(c) p-centre

FIGURE 3.43 – Affichage Python des résultats de la variable Yijs pour le segment US selon les trois méthodes

Cluster	Client
i1	j1
i1	j2
i1	j3
i1	j4
i1	j5
i1	j6
i1	j7
i1	j8
i1	j9
i1	j10
i1	j11
i1	j13
i1	j14
i1	j15
i1	j16
i1	j17
i1	j18
i2	j21
i2	j22
i2	j23
i2	j24
i2	j25
i2	j26
i2	j27
i2	j30
i2	j31
i3	j36
i3	j37
i3	j38
i3	j39
i3	j40
i3	j41
i3	j42
i3	j44

Cluster	Client
i1	j1
i1	j2
i1	j3
i1	j4
i2	j5
i1	j6
i1	j7
i1	j8
i1	j9
i1	j10
i1	j11
i1	j13
i2	j14
i1	j15
i1	j16
i1	j17
i1	j18
i2	j21
i2	j22
i2	j23
i2	j24
i2	j25
i3	j26
i2	j27
i2	j30
i2	j31
i3	j36
i3	j37
i3	j38
i3	j39
i3	j40
i3	j41
i3	j42
i3	j44
i3	j7

Cluster	Client
i1	j1
i1	j2
i2	j3
i1	j4
i2	j5
i1	j6
i1	j7
i1	j8
i1	j9
i1	j10
i1	j11
i1	j13
i2	j14
i1	j15
i1	j16
i2	j17
i1	j18
i2	j21
i2	j22
i2	j23
i2	j24
i2	j25
i2	j26
i2	j27
i2	j30
i2	j31
i3	j36
i3	j37
i3	j38
i3	j39
i3	j40
i3	j41
i2	j42
i3	j44
i3	j7

(a) Barycentre

(b) p-médian

(c) p-centre

FIGURE 3.44 – Affichage Excel des résultats de la variable Yijs pour le segment US selon les trois méthodes

Segment PCS

```

y["i1","j1","PCS"] = 1
y["i1","j2","PCS"] = 1
y["i1","j3","PCS"] = 1
y["i1","j4","PCS"] = 1
y["i1","j6","PCS"] = 1
y["i1","j11","PCS"] = 1
y["i1","j12","PCS"] = 1
y["i1","j14","PCS"] = 1
y["i1","j16","PCS"] = 1
y["i1","j18","PCS"] = 1
y["i2","j21","PCS"] = 1
y["i2","j22","PCS"] = 1
y["i2","j23","PCS"] = 1
y["i2","j26","PCS"] = 1
y["i2","j28","PCS"] = 1
y["i2","j29","PCS"] = 1
y["i2","j30","PCS"] = 1
y["i2","j35","PCS"] = 1
y["i3","j36","PCS"] = 1
y["i3","j41","PCS"] = 1
y["i3","j44","PCS"] = 1
y["i3","j45","PCS"] = 1

```

```

y["i1","j1","PCS"] = 1
y["i1","j2","PCS"] = 1
y["i1","j3","PCS"] = 1
y["i1","j4","PCS"] = 1
y["i1","j6","PCS"] = 1
y["i1","j11","PCS"] = 1
y["i1","j12","PCS"] = 1
y["i1","j16","PCS"] = 1
y["i1","j7","PCS"] = 1
y["i2","j14","PCS"] = 1
y["i2","j17","PCS"] = 1
y["i2","j18","PCS"] = 1
y["i2","j21","PCS"] = 1
y["i2","j22","PCS"] = 1
y["i2","j23","PCS"] = 1
y["i2","j26","PCS"] = 1
y["i2","j28","PCS"] = 1
y["i2","j29","PCS"] = 1
y["i2","j30","PCS"] = 1
y["i2","j35","PCS"] = 1
y["i3","j36","PCS"] = 1
y["i3","j41","PCS"] = 1
y["i3","j44","PCS"] = 1
y["i3","j45","PCS"] = 1

```

```

y["i1","j1","PCS"] = 1
y["i1","j2","PCS"] = 1
y["i1","j6","PCS"] = 1
y["i1","j11","PCS"] = 1
y["i1","j12","PCS"] = 1
y["i2","j3","PCS"] = 1
y["i2","j4","PCS"] = 1
y["i2","j14","PCS"] = 1
y["i2","j16","PCS"] = 1
y["i2","j17","PCS"] = 1
y["i2","j18","PCS"] = 1
y["i2","j21","PCS"] = 1
y["i2","j22","PCS"] = 1
y["i2","j23","PCS"] = 1
y["i2","j26","PCS"] = 1
y["i2","j28","PCS"] = 1
y["i2","j29","PCS"] = 1
y["i2","j30","PCS"] = 1
y["i3","j35","PCS"] = 1
y["i3","j36","PCS"] = 1
y["i3","j41","PCS"] = 1
y["i3","j44","PCS"] = 1
y["i3","j45","PCS"] = 1

```

(a) Barycentre

(b) p-médian

(c) p-centre

FIGURE 3.45 – Affichage Python des résultats de la variable Y_{ijs} pour le segment PCS selon les trois méthodes

Cluster	Client
i1	j1
i1	j2
i1	j3
i1	j4
i1	j6
i1	j11
i1	j12
i1	j14
i1	j16
i1	j17
i1	j18
i2	j21
i2	j22
i2	j23
i2	j26
i2	j28
i2	j29
i2	j30
i2	j35
i3	j36
i3	j41
i3	j44
i3	j45

Cluster	Client
i1	j1
i1	j2
i1	j3
i1	j4
i1	j6
i1	j11
i1	j12
i1	j14
i1	j16
i1	j17
i1	j18
i2	j21
i2	j22
i2	j23
i2	j26
i2	j28
i2	j29
i2	j30
i2	j35
i3	j36
i3	j41
i3	j44
i3	j45
i1	j7

Cluster	Client
i1	j1
i1	j2
i2	j3
i1	j4
i1	j6
i1	j11
i1	j12
i2	j14
i1	j16
i2	j17
i1	j18
i2	j21
i2	j22
i2	j23
i2	j26
i2	j28
i2	j29
i2	j30
i2	j35
i3	j36
i3	j41
i3	j44
i3	j45
i1	j7

(a) Barycentre

(b) p-médian

(c) p-centre

FIGURE 3.46 – Affichage Excel des résultats de la variable Y_{ijs} pour le segment PCS selon les trois méthodes

B-Affectation des camion

Segment Imaging

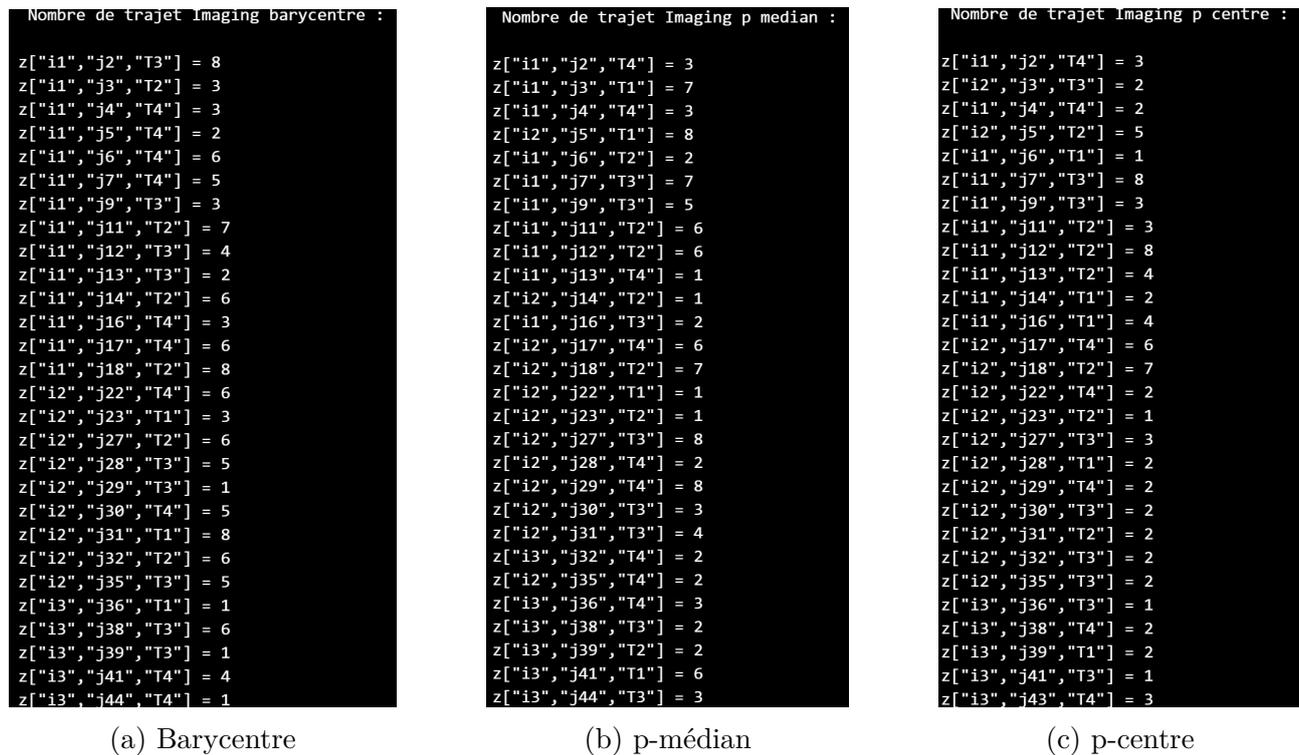


FIGURE 3.47 – Affichage Python des résultats de la variable Zijt pour le segment imaging selon les trois méthodes

Entrep	Clien	Camio	Nombre de traje
i1	j2	T3	8
i1	j3	T2	3
i1	j4	T4	3
i1	j5	T4	2
i1	j6	T4	6
i1	j7	T4	5
i1	j9	T3	3
i1	j11	T2	7
i1	j12	T3	4
i1	j13	T3	2
i1	j14	T2	6
i1	j16	T4	3
i1	j17	T4	6
i1	j18	T2	8
i2	j22	T4	6
i2	j23	T1	3
i2	j27	T2	6
i2	j28	T3	5
i2	j29	T3	1
i2	j30	T4	5
i2	j31	T1	8
i2	j32	T2	6
i2	j35	T3	5
i3	j36	T1	1
i3	j38	T3	6
i3	j39	T3	1
i3	j41	T4	4
i3	j44	T4	1
i3	j45	T3	7

Entrep	Clien	Camio	Nombre de traje
i1	j2	T4	3
i1	j3	T1	7
i1	j4	T4	3
i2	j5	T1	8
i1	j6	T2	2
i1	j7	T3	7
i1	j9	T3	5
i1	j11	T2	6
i1	j12	T2	6
i1	j13	T4	1
i2	j14	T2	1
i1	j16	T3	2
i2	j17	T4	6
i2	j18	T2	7
i2	j22	T1	1
i2	j23	T2	1
i2	j27	T3	8
i2	j28	T4	2
i2	j29	T4	8
i2	j30	T3	3
i2	j31	T3	4
i3	j32	T4	2
i2	j35	T4	2
i3	j36	T4	3
i3	j38	T3	2
i3	j39	T2	2
i3	j41	T1	6
i3	j44	T3	3
i3	j45	T2	7

Entrep	Clien	Camio	Nombre de traje
i1	j2	T4	3
i2	j3	T3	2
i1	j4	T4	2
i2	j5	T2	5
i1	j6	T1	1
i1	j7	T3	8
i1	j9	T3	3
i1	j11	T2	3
i1	j12	T2	8
i1	j13	T2	4
i1	j14	T1	2
i1	j16	T1	4
i2	j17	T4	6
i2	j18	T2	7
i2	j22	T4	2
i2	j23	T2	1
i2	j27	T3	3
i2	j28	T1	2
i2	j29	T4	2
i2	j30	T3	2
i2	j31	T2	2
i2	j32	T3	2
i2	j35	T3	2
i3	j36	T3	1
i3	j38	T4	2
i3	j39	T1	2
i3	j41	T3	1
i3	j43	T4	3
i3	j44	T1	1
i3	j45	T3	3

(a) Barycentre

(b) p-médian

(c) p-centre

FIGURE 3.48 – Affichage Excel des résultats de la variable Zijt pour le segment Imaging selon les trois méthodes

Segment US

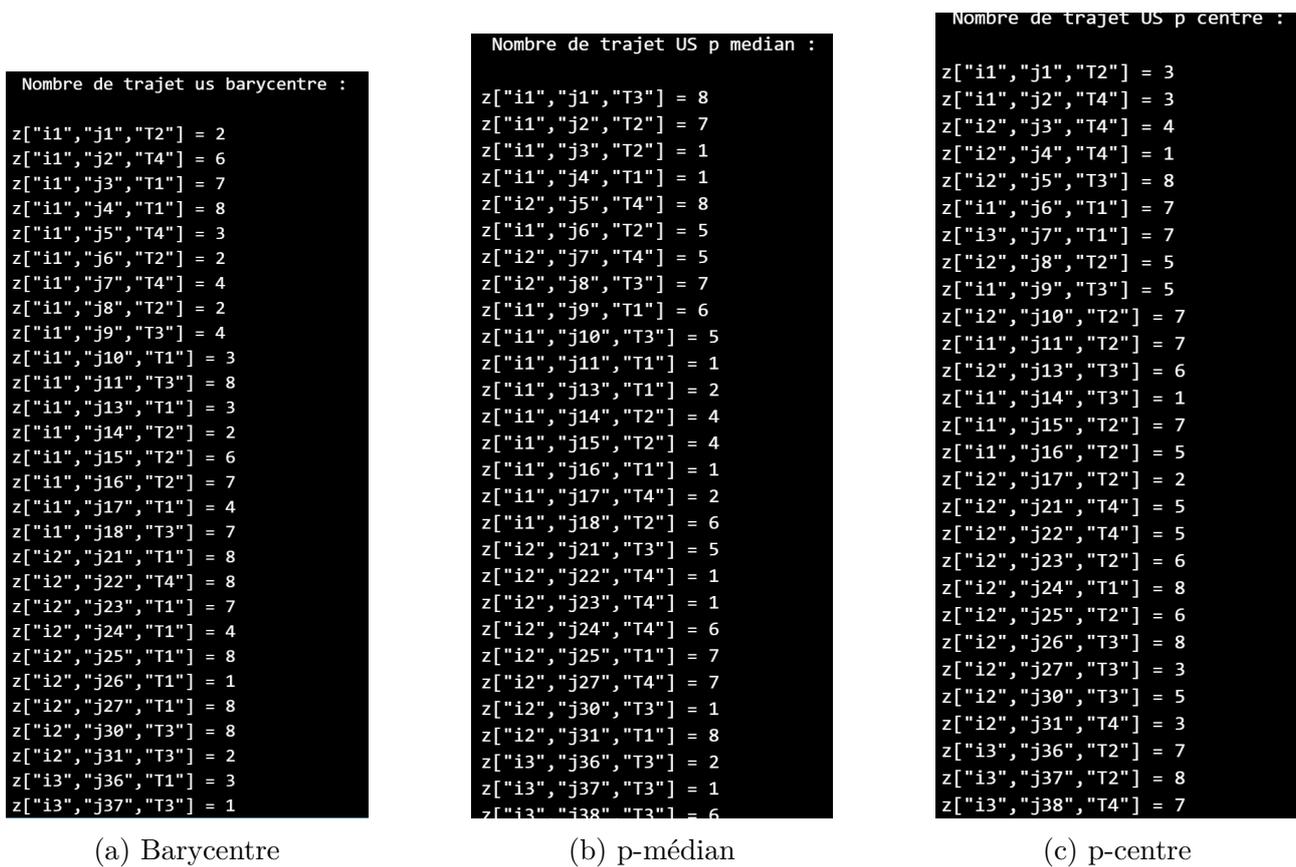


FIGURE 3.49 – Affichage Python des résultats de la variable Zijt pour le segment US selon les trois méthodes

Entrep.	Clien	Camio	Nombre de traje
i1	j1	T2	2
i1	j2	T4	6
i1	j3	T1	7
i1	j4	T1	8
i1	j5	T4	3
i1	j6	T2	2
i1	j7	T4	4
i1	j8	T2	2
i1	j9	T3	4
i1	j10	T1	3
i1	j11	T3	8
i1	j13	T1	3
i1	j14	T2	2
i1	j15	T2	6
i1	j16	T2	7
i1	j17	T1	4
i1	j18	T3	7
i2	j21	T1	8
i2	j22	T4	8
i2	j23	T1	7
i2	j24	T1	4
i2	j25	T1	8
i2	j26	T1	1
i2	j27	T1	8
i2	j30	T3	8
i2	j31	T3	2
i3	j36	T1	3
i3	j37	T3	1
i3	j38	T2	8
i3	j39	T1	7
i3	j40	T4	8
i3	j41	T4	4
i3	j42	T1	5
i3	j44	T1	3

(a) Barycentre

(b) p-médian

(c) p-centre

FIGURE 3.50 – Affichage excel des résultats de la variable Zijt pour le segment US selon les trois méthodes

Segment PCS

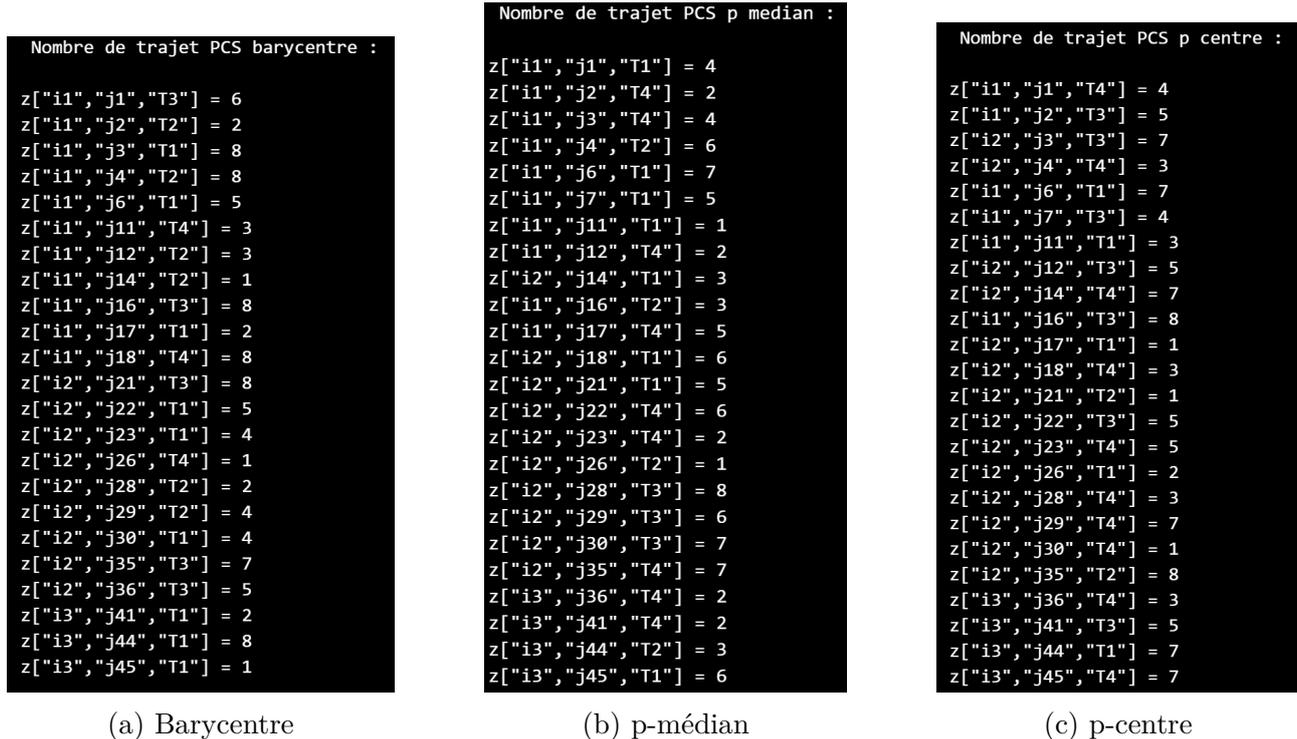


FIGURE 3.51 – Affichage Python des résultats de la variable Zijt pour le segment PCS selon les trois méthodes

Entrepôt	Client	Camio	Nombre de trajet
i1	j1	T3	6
i1	j2	T2	2
i1	j3	T1	8
i1	j4	T2	8
i1	j6	T1	5
i1	j11	T4	3
i1	j12	T2	3
i1	j14	T2	1
i1	j16	T3	8
i1	j17	T1	2
i1	j18	T4	8
i2	j21	T3	8
i2	j22	T1	5
i2	j23	T1	4
i2	j26	T4	1
i2	j28	T2	2
i2	j29	T2	4
i2	j30	T1	4
i2	j35	T3	7
i2	j36	T3	5
i3	j41	T1	2
i3	j44	T1	8
i3	j45	T1	1

Entrepôt	Client	Camio	Nombre de trajet
i1	j1	T1	4
i1	j2	T4	2
i1	j3	T4	4
i1	j4	T2	6
i1	j6	T1	7
i1	j7	T1	5
i1	j11	T1	1
i1	j12	T4	2
i2	j14	T1	3
i1	j16	T2	3
i1	j17	T4	5
i2	j18	T1	6
i2	j21	T1	5
i2	j22	T4	6
i2	j23	T4	2
i2	j26	T2	1
i2	j28	T3	8
i2	j29	T3	6
i2	j30	T3	7
i2	j35	T4	7
i3	j36	T4	2
i3	j41	T4	2
i3	j44	T2	3
i3	j45	T1	6

Entrepôt	Client	Camio	Nombre de trajet
i1	j1	T4	4
i1	j2	T3	5
i2	j3	T3	7
i2	j4	T4	3
i1	j6	T1	7
i1	j7	T3	4
i1	j11	T1	3
i2	j12	T3	5
i2	j14	T4	7
i1	j16	T3	8
i2	j17	T1	1
i2	j18	T4	3
i2	j21	T2	1
i2	j22	T3	5
i2	j23	T4	5
i2	j26	T1	2
i2	j28	T4	3
i2	j29	T4	7
i2	j30	T4	1
i2	j35	T2	8
i3	j36	T4	3
i3	j41	T3	5
i3	j44	T1	7
i3	j45	T4	7

(a) Barycentre
(b) p-médian
(c) p-centre

FIGURE 3.52 – Affichage Excel des résultats de la variable Zijt pour le segment PCS selon les trois méthodes

C-Liaison entre client et entrepôt par type de camion

L'objectif est de présenter les liaisons possibles entre les entrepôts et les clients, en tenant compte des types de camions disponibles.

Pour ce faire, une modélisation binaire a été réalisée afin d'identifier, pour

chaque couple « entrepôt-camion », l'ensemble des clients accessibles. Cette représentation permet de visualiser clairement les configurations logistiques envisageables en fonction des capacités opérationnelles et des contraintes d'accessibilité. Les tableaux suivants illustrent ces correspondances et servent de base aux décisions d'affectation dans le modèle d'optimisation.

En fonction du segment et de l'affectation du client à son entrepôt une liaison est permise ou non :

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
Entrepot/Camio	j2	j3	j4	j5	j6	j7	j9	j11	j12	j13	j14	j16	j17	j18	j22	j23	j27	j28	j29	j30	j31	j32	j35	j36	j38	j39	j41	j43	j44	j45
11/73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/74	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
12/74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
13/73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Imaging

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	
Entrepot/Camio	j5	j6	j4	j5	j6	j7	j8	j9	j10	j11	j13	j14	j15	j16	j17	j18	j19	j20	j21	j22	j23	j24	j25	j26	j27	j28	j29	j30	j31	j32	j33	j34	j35	j36	
11/71	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
11/72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12/71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) US

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Entrepot_Camio	j1	j2	j3	j4	j6	j11	j12	j14	j16	j17	j18	j21	j22	j23	j26	j28	j29	j30	j35	j36	j41	j44	j45
11/71	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(c) PCS

FIGURE 3.53 – Affichage Excel des résultats de la variable Aij pour les segments Imaging, US et PCS

Annexe 03 : Code Python pour le VRP par segment pour les trois entrepôts

-Déclaration des paramètres

```

# == Paramètres de base ==
n = 8 # 8 clients
m = 3
V = list(range(n + 1))
P = list(range(m)) # Véhicules
A = [(i, j) for i in V for j in V if i != j] # Arcs (sans boucle)

# == Fonction de coût F[i,j] ==
F = {
    (0, 1): 55.90, (0, 2): 466.73, (0, 3): 238.76, (0, 4): 70.84,
    (0, 5): 90.00, (0, 6): 34.45, (0, 7): 139.57, (0, 8): 81.05,
    (1, 2): 673.34, (1, 3): 762.72, (1, 4): 328.82, (1, 5): 67.32,
    (1, 6): 751.77, (1, 7): 667.09, (1, 8): 208.14, (2, 3): 694.09,
    (2, 4): 105.92, (2, 5): 599.08, (2, 6): 395.9, (2, 7): 129.56,
    (2, 8): 470.76, (3, 4): 453.41, (3, 5): 583.15, (3, 6): 66.93,
    (3, 7): 605.4, (3, 8): 385.56, (4, 5): 252.75, (4, 6): 518.86,
    (4, 7): 154.49, (4, 8): 265.04, (5, 6): 245.62, (5, 7): 336.41,
    (5, 8): 355.29, (6, 7): 461.67, (6, 8): 694.08, (7, 8): 534.34
}

# Compléter F avec les paires inverses
for (i, j), val in list(F.items()):
    if (j, i) not in F:
        F[(j, i)] = val

```

FIGURE 3.54 – Code VRP : Déclaration des paramètres

-Variables de décisions

```

Variables de décisions

# Création du modèle
mdl = Model("VRP_DecisionVariables")

# Variables x[i,j,p] : le véhicule p parcourt l'arc (i, j)
x = mdl.binary_var_dict([(i, j, p) for (i, j) in A for p in P], name="x")

# Variables y[i,p] : le véhicule p visite le nœud i
y = mdl.binary_var_dict([(i, p) for i in V for p in P], name="y")
# Variable binaire: 1 si le véhicule p est utilisé, 0 sinon
used = mdl.binary_var_dict(P, name="used")
u = mdl.continuous_var_dict([(i, p) for i in V if i != 0 for p in P], name="u")

# Affichage de contrôle
print("Variables x[i,j,p] et y[i,p] déclarées avec succès.")
print("Exemple : x[0,1,0] =", x[0,1,0])

```

FIGURE 3.55 – Code VRP : Déclaration des Variables de décisions

-Fonction objectif

La fonction Objectif

```

mdl.minimize(
    mdl.sum(F[i, j] * x[i, j, p] for (i, j) in A for p in P)
)

```

FIGURE 3.56 – Code VRP : Déclaration de la fonction objectif

-Contraintes

```

Les contraintes

# === CONTRAINTES ===

# 1. Chaque ville (hors dépôt) est visitée une seule fois par un seul véhicule
#  $\sum_{p \in P} y[i,p] = 1, \forall i \in V \setminus \{0\}$ 
for i in V:
    if i != 0:
        mdl.add_constraint(
            mdl.sum(y[i, p] for p in P) == 1,
            f"Visit_once_node_{i}"
        )

# 2. Conservation du flux pour chaque ville (hors dépôt)
#  $\sum_{j \neq i} x[i,j,p] = y[i,p]$  (flux sortant)
#  $\sum_{j \neq i} x[j,i,p] = y[i,p]$  (flux entrant)
for i in V:
    if i != 0:
        for p in P:
            # Flux sortant
            mdl.add_constraint(
                mdl.sum(x[i, j, p] for j in V if j != i) == y[i, p],
                f"Flow_out_node_{i}_veh_{p}"
            )
            # Flux entrant
            mdl.add_constraint(
                mdl.sum(x[j, i, p] for j in V if j != i) == y[i, p],
                f"Flow_in_node_{i}_veh_{p}"
            )

# 3. Utiliser au moins 2 véhicules
#  $\sum_{p \in P} used[p] \geq 2$ 
mdl.add_constraint(
    mdl.sum(used[p] for p in P) >= 2,
    "at_least_2_vehicles_used"
)

# 4. Chaque véhicule utilisé doit partir et revenir au dépôt
for p in P:
    # EXACTEMENT un départ depuis 0
    mdl.add_constraint(
        mdl.sum(x[0, j, p] for j in V if j != 0) == used[p],
        f"depart_from_depot_{p}"
    )
    # EXACTEMENT un retour à 0
    mdl.add_constraint(
        mdl.sum(x[i, 0, p] for i in V if i != 0) == used[p],
        f"return_to_depot_{p}"
    )

# 5. (NOUVEAU) Si une ville est visitée, alors le véhicule passe par 0
for p in P:
    for i in V:
        if i != 0:
            mdl.add_constraint(
                y[i, p] <= used[p],
                f"connects_to_depot_{i}_{p}"
            )

#Contraintes Sous tour
M = len(V) # un grand nombre (ou len(V) ou len(J))
for p in P:
    for i in V:
        for j in V:
            if i != j and i != 0 and j != 0:
                mdl.add_constraint(
                    u[i, p] - u[j, p] + M * x[i, j, p] <= M - 1,
                    f"mtz_{i}_{j}_{p}"
                )

```

FIGURE 3.57 – Code VRP : Déclaration des contraintes

-Résolution du modèle

```
# === RÉOLUTION ===
solution = mdl.solve(log_output=True)

# === AFFICHAGE DES RÉSULTATS ===
if solution:
    print("✅ Solution trouvée !\n")
    for p in P:
        print(f"--- Trajet du véhicule {p} ---")
        for (i, j) in A:
            if x[i, j, p].solution_value > 0.5:
                print(f"  {i} → {j} (distance = {F[i,j]})")
else:
    print("❌ Aucune solution trouvée.")

# === Facteur d'émission carbone (kg CO2/km) ===
alpha = 2.68 # Ton facteur

# === Calcul des émissions totales de CO2 ===
total_emission = sum(F[i, j] * alpha * x[i, j, p].solution_value
                    for (i, j) in A for p in P)

# === Affichage de la valeur de Z (distance totale) et CO2 total ===
print(f"\n✅ Distance totale parcourue (valeur de Z) : {mdl.objective_value:.2f} km")
print(f"🟡 Émissions totales de CO2 : {total_emission:.2f} kg")

✓ 0.0s

✅ Distance totale parcourue (valeur de Z) : 1227.10 km
🟡 Émissions totales de CO2 : 3288.63 kg
```

FIGURE 3.58 – Code VRP : Résolution du modèle et affichage du résultat