

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique
Département de Génie Industriel



Mémoire de projet de fin d'études

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

Reconception de la Supply Chain Aval de Stellantis El Djazaïr.

TOUATI Mohamed Abderraouf

Sous la direction de **Dr. NIBOUCHE Fatima** (promotrice)
et **M. BENBOUSSAD Noureddine** (encadrant)

Présenté et soutenu publiquement le 01/07/2026

Composition du jury :

Présidente :	Mme AIT BOUAZZA Sofia	MAA	ENP
Examineur :	M. CHELGHOUM Adel	Contract Manager	CITAL SPA
Promotrice :	Dr. NIBOUCHE Fatima	MCA	ENP
Encadrant :	M. BENBOUSSAD Noureddine	Manager Logistique Opérationnelle et Qualité	Stellantis El Djazaïr

ENP 2026

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique
Département de Génie Industriel



Mémoire de projet de fin d'études

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

Reconception de la Supply Chain Aval de Stellantis El Djazaïr.

TOUATI Mohamed Abderraouf

Sous la direction de **Dr. NIBOUCHE Fatima** (promotrice)
et **M. BENBOUSSAD Noureddine** (encadrant)

Présenté et soutenu publiquement le 01/07/2026

Composition du jury :

Présidente :	Mme AIT BOUAZZA Sofia	MAA	ENP
Examineur :	M. CHELGHOUM Adel	Contract Manager	CITAL SPA
Promotrice :	Dr. NIBOUCHE Fatima	MCA	ENP
Encadrant :	M. BENBOUSSAD Noureddine	Manager Logistique Opérationnelle et Qualité	Stellantis El Djazaïr

ENP 2026

ملخص

يتناول هذا المشروع لنهاية الدراسة، المنجز ضمن شركة ستيلانتيس الجزائر، تحسين سلسلة الإمداد النهائية لتوزيع المركبات الجديدة في الجزائر. يكشف التشخيص عن نقص هيكلي في قدرة النقل وعن توزيع مركزي انطلاقاً من مصنع تفرأوي بوهرا، مما يولد مسافات تسليم طويلة ومعدلات تعبئة منخفضة لشاحنات نقل السيارات. وللمعالجة ذلك، صممت شبكة من مراكز التجميع الوسيطة، تحدد مواقعها المثلى بواسطة نموذج التحسين الوسيط (p-median) القائم على البرمجة الخطية بأعداد صحيحة، ويحل لعدة سيناريوهات. ثم يقيم كل سيناريو وفق عدة أبعاد: توزيع قنوات التسليم بين الاستلام الذاتي والتوصيل عبر نموذج اختيار مرن حسب الدخل، وتحديد سعة التخزين، والبصمة الكربونية، وتكلفة الاستغلال، واستخدام الأسطول. تقود الموازنة متعددة المعايير إلى اعتماد شبكة من أربعة مراكز: وهران والجزائر وباتنة وجيجل، تقلص متوسط المسافة لكل مركبة والبصمة الكربونية والتكلفة اللوجستية مقارنة بالوضع الحالي، مع ضمان تغطية إقليمية كاملة وقيمة استراتيجية للاستيراد والتصدير مستقبلاً.

الكلمات المفتاحية: سلسلة الإمداد، توزيع السيارات، النموذج الوسيط (p-median)، التحسين، مراكز التجميع، التوصيل، البصمة الكربونية، ستيلانتيس.

Abstract

This end-of-studies project, carried out at Stellantis El Djazaïr, addresses the optimization of the downstream supply chain for the distribution of new vehicles in Algeria. The diagnosis reveals a structural transport-capacity shortage and a centralized distribution from the Tafraoui plant (Oran), generating long delivery distances and low truck fill rates. To address this, a network of intermediate consolidation centres (*buffers*) is designed : their optimal location is determined by a *p-median* optimization model (integer linear programming) solved for several scenarios. Each scenario is then assessed along several dimensions : distribution-channel allocation (customer self-pickup versus home delivery) through an income-elastic choice model, sizing of buffer storage capacity, carbon footprint, operating cost and fleet utilization. The multi-criteria synthesis retains a four-buffer network (Oran, Algiers, Batna, Jijel), which reduces the average distance per vehicle, the carbon footprint and the logistics cost compared with the current situation, while ensuring full territorial coverage and strategic value for future import/export.

Keywords : supply chain, automotive distribution, p-median, optimization, buffers, last-mile delivery, carbon footprint, Stellantis.

Résumé

Ce projet de fin d'études, réalisé au sein de Stellantis El Djazaïr, porte sur l'optimisation de la chaîne logistique aval de distribution des véhicules neufs en Algérie. Le diagnostic met en évidence un déficit capacitaire structurel de transport et une distribution centralisée depuis l'usine de Tafraoui (Oran), génératrice de longues distances de livraison et de faibles taux de remplissage des porte-voitures. Pour y remédier, un réseau de centres de regroupement intermédiaires (*buffers*) est conçu : leur localisation optimale est déterminée par un modèle d'optimisation *p-médian* (programmation linéaire en nombres entiers), résolu pour plusieurs scénarios. Chaque scénario est ensuite évalué selon plusieurs dimensions : l'affectation des canaux de distribution (retrait client / dépannage) par un modèle de choix élastique au revenu, le dimensionnement de la capacité de stockage des buffers, l'empreinte carbone, le coût d'exploitation et la sollicitation de la flotte. La synthèse multicritère conduit à retenir un réseau à quatre buffers (Oran, Alger, Batna, Jijel), qui réduit la distance moyenne par véhicule, l'empreinte carbone et le coût logistique par rapport à la situation actuelle, tout en assurant une couverture territoriale complète et une valeur stratégique pour l'import/export futur.

Mots clés : chaîne logistique, distribution automobile, p-médian, optimisation, buffers, dépannage, empreinte carbone, Stellantis.

Dédicace

Avant toute chose, mes pensées se tournent vers Allah, Le Très Miséricordieux, que je remercie pour Sa guidance, Sa protection et les innombrables bienfaits dont Il m'a gratifié tout au long de ce chemin. Sans Sa volonté, aucun des pas qui m'ont conduit jusqu'à cette étape n'aurait été possible.

À ma chère maman, dont l'amour silencieux, les prières discrètes et les sacrifices quotidiens ont été le socle de ma vie. Ta patience face aux difficultés, ton sourire malgré la fatigue et ta confiance en moi, même lorsque moi-même je doutais, ont été mes plus grandes sources de force. Ce travail est aussi le fruit de ton courage et de ta persévérance.

À mon père, qui m'a transmis le sens du devoir, la valeur du travail bien fait et l'importance de la dignité. Tes conseils, souvent simples en apparence mais profonds dans leur portée, ont forgé mon caractère et m'ont appris à avancer avec constance, sans jamais renoncer. Ta confiance a été un repère précieux dans les moments de choix et de remise en question.

À mon frère Abdou et à ma sœur Douaa, compagnons de route de tous les jours. Votre affection, vos encouragements, vos plaisanteries et vos présences à mes côtés ont rendu ce long parcours plus chaleureux et plus supportable. Vous avez été, chacun à votre manière, des piliers de ce voyage que je ne peux imaginer sans vous.

À mes grands-parents paternels, Hadj Abderrahmane, que tous appelaient « Sidi Dahmane », et Maa Lkbira – qu'Allah leur fasse miséricorde. Leur mémoire reste pour moi un héritage vivant, fait de valeurs, de sagesse et de bienveillance. Ce travail est aussi un hommage à leur histoire, à leur éducation et à la profondeur de ce qu'ils ont transmis à notre famille.

À mon grand-père maternel, Hadj Mhamed, affectueusement appelé « Ba », auquel je dédie ce mémoire tout particulièrement – qu'Allah lui fasse miséricorde. Il a veillé sur mon éducation lorsque j'étais enfant, m'accompagnant sur les premiers chemins de la vie. Être son premier petit-fils est pour moi un honneur, et lui offrir ce travail est une façon de lui dire que ses efforts, ses conseils et sa présence continuent de porter leurs fruits.

À ma grand-mère maternelle, Hadja Zakia, notre « Maa », dont l'amour est à la fois discret et débordant. Elle a toujours été ma supportrice la plus fidèle, attentive à mes progrès, inquiète de mes difficultés, heureuse de mes réussites. Ses mots doux, ses encouragements et sa confiance inébranlable sont gravés dans ma mémoire et dans mon cœur.

À mes oncles maternels, Abdelkader, Brahim, Mohamed et Hamza, et à ma tante Fadoua, pour leur affection, leur bienveillance et leurs conseils, souvent donnés sans bruit mais toujours au bon moment.

À mes oncles paternels, Bouabida, Djilali et Benouda, et à ma tante Zahia, pour leur soutien, leurs paroles chaleureuses et leur place irremplaçable dans notre famille.

À l'ensemble de mes oncles et tantes, maternels et paternels, ainsi qu'à leurs enfants, qui constituent ce grand cercle familial au sein duquel j'ai trouvé affection, repères et soutien. Chacun de vous, par sa présence et son rôle dans la famille, a contribué à rendre ce chemin plus stable et plus riche, et je vous associe tous à cette dédicace.

À tous mes amis d'enfance : Hicham, Aboubekr, Djamel, Nadir et Bouabdallah. Avec vous, j'ai partagé les premières aventures, les jeux, les rêves naïfs et les promesses de l'avenir. Ce sont ces années fondatrices, faites d'innocence et de découvertes, qui ont donné aux étapes suivantes leur saveur particulière.

À mes amis du primaire Saâi Kamel, du CEM Elhamdania, du lycée Msaguem Abdelkader, qui ont accompagné mes premiers pas dans le monde scolaire. Ensemble, nous avons traversé les contrôles, les examens, les récréations et les doutes, construisant peu à peu des trajectoires qui se croisent encore aujourd'hui dans ma mémoire.

À mes camarades des groupes G12, puis G10 et G8 durant les classes préparatoires, pour les heures de cours partagées, les exercices, les révisions et les moments de fatigue et de solidarité qui ont accompagné ces années intenses. Votre présence et votre esprit de promotion ont largement contribué à rendre ce parcours plus supportable, plus stimulant et plus riche humainement.

À tous mes amis de Polytech, qui ont transformé ces années d'ingénierie en une véritable aventure humaine. Entre les amphithéâtres, les projets, les nuits de révision et les moments de fatigue partagée, vous avez donné à ce parcours une dimension de fraternité, de soutien mutuel et de complicité que je n'oublierai jamais.

À mes collègues de la promotion 2026, à toutes les personnes qui ont laissé une trace dans ma vie étudiante, en particulier mes amis d'Indus et les alumni du département Oussi, Salaah et Amine Agg, pour leurs échanges, leurs conseils et l'esprit de génération qui nous unit.

À mes camarades de la promotion MI, et plus particulièrement à mes amis Adnane, Yacine, Malek, Mouh, Anis, Nabil, Basset, Houssam Chnipa7, Ithar, Lyna, Nawal, Sophia, Chaïma, Sabrina, ainsi qu'à toute autre personne qui a marqué sa présence dans mon parcours. Vos encouragements, vos échanges, vos conseils et votre esprit de groupe ont donné à ces années une dimension collective et ont largement contribué à faire de ce chemin une expérience humaine riche et mémorable.

À mes amis du centre de calcul, ces heures passées autour des écrans, des scripts et des calculs, dans un mélange de concentration, d'humour et de solidarité. Ce lieu est devenu, avec vous, bien plus qu'une salle de travail : un espace de réflexion, d'échange et de croissance.

À mes amis de la résidence universitaire Bouraoui Amar, et plus particulièrement à Souheil, Ilyes, Ghani, Rayane et Amine. Les soirées, les discussions, les repas partagés, les révisions improvisées et les confidences dans les couloirs ont donné à ces années d'étude une dimension humaine que je chérirai longtemps.

À mes amis proches Rostom et Youcef, pour la sincérité de leur amitié, leur loyauté et leur soutien discret mais constant. Vous avez su être présents dans les moments importants, avec des paroles justes et des gestes simples, qui comptent plus que ce qu'ils laissent paraître.

À mon ami Rafik, pour sa présence fidèle, sa lucidité dans les moments de doute et la profondeur de nos discussions. Ton amitié a été une lumière dans les périodes de questionnement, et un appui solide lorsque la fatigue se faisait sentir.

À mon ami du quartier, Wassim, pour cette amitié enracinée dans le quotidien, les rues, les conversations simples et sincères, qui rappelle que les attaches les plus proches sont souvent celles qui durent le plus longtemps.

À Lydia, cette Boumerdésienne que j'ai eu la chance de rencontrer lors de la dernière sortie de l'IEC, et qui est devenue une personne très chère à mon cœur. Je garde une affection particulière pour cette rencontre inattendue, pour sa douceur et pour la profondeur des échanges qui ont suivi.

À mon enseignant et ami, le professeur Ayoub Abbaci, pour son accompagnement, son exigence bienveillante et la qualité de ses conseils. Vous avez été pour moi à la fois un guide académique et une source d'inspiration personnelle. Votre confiance dans mes capacités m'a souvent donné l'élan nécessaire pour dépasser mes propres limites.

Une dédicace particulière au club IEC, où j'ai eu l'honneur d'assumer la responsabilité de chef RE. À tous les membres de mon comité, et aux équipes organisatrices de ADC 3.0, ADC 4.0, ICC 4.0 et BG 4.0 : votre énergie, votre engagement et votre esprit collectif ont fait de ces projets de véritables expériences de vie. Ce travail porte aussi la trace de ces moments intenses de préparation, d'organisation et de réussite partagée.

À Nawel et Bahou, mes « sœurs » au sein de la direction des études, pour leur soutien, leur disponibilité et leur écoute. Dans le quotidien souvent exigeant de la vie académique, votre présence a été un repère rassurant et une source de sérénité.

À toutes les nuits passées à Polytech, au CDE, au centre de calcul et à la Mousalaa de l'école : ces lieux, témoins de la fatigue, des hésitations, mais aussi de l'effort, de la détermination et de la confiance renouvelée, resteront liés pour moi à ce mémoire et à ce qu'il représente.

Enfin, à toute personne que je connais, de près ou de loin, et qui a contribué, par un mot, un conseil, un sourire ou une présence, à m'aider à avancer sur ce chemin : je vous dédie ce travail avec une gratitude profonde et sincère.

Rifouu

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à son aboutissement.

Je remercie tout d'abord ma promotrice, **Dr. NIBOUCHE Fatima**, pour la confiance qu'elle m'a accordée, sa disponibilité constante et la qualité de ses conseils tout au long de ce projet. Son exigence bienveillante, ses orientations méthodologiques et ses remarques toujours pertinentes ont été déterminantes dans la structuration et la finalisation de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à mon encadrant à **Stellantis El Djazaïr**, **M. BENBOUSSAD Noureddine**, Manager Logistique Opérationnelle et Qualité, pour son accompagnement, son expertise de terrain et la confiance qu'il m'a témoignée durant tout le stage. Son regard opérationnel, ses explications détaillées sur les réalités de la chaîne logistique aval et le temps qu'il m'a consacré ont fortement enrichi la portée pratique de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury, **Mme AIT BOUAZZA Sofia**, présidente, et **M. CHELGHOUM Adel**, examinateur, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail. Leur présence, le temps qu'ils consacrent à l'étude de ce mémoire et la qualité de leurs appréciations constituent pour moi un privilège et une source estimable de retour académique.

Je remercie également l'ensemble du corps enseignant du **Département Génie Industriel** de l'École Nationale Polytechnique, et en particulier **M. Ayoub Abbaci**, **Mme Bouchafaa**, **Mme Beldjoudi**, **Mme Bareche**, **M. Zouaghi** et **M. Boukabous**, pour la formation de qualité qu'ils m'ont dispensée durant ces années d'études. Les connaissances, les méthodes et la rigueur transmises au fil des modules ont constitué le socle sur lequel ce projet a pu se construire.

Mes remerciements s'adressent aussi à toute l'équipe de la **Supply Chain de Stellantis El Djazaïr**, pour leur accueil, leur disponibilité et l'aide apportée au quotidien. Les échanges, les données partagées et la confiance accordée dans le cadre de ce stage ont permis d'ancrer ce travail dans une réalité industrielle concrète.

Je tiens également à remercier mon binôme d'hier avant d'être « monome » aujourd'hui, **Souheil Siad**, pour le travail partagé, les discussions, l'entraide et les moments de collaboration qui ont marqué ce parcours et préparé ce projet.

Enfin, ma reconnaissance la plus profonde va à ma famille et à mes proches, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur présence à chaque étape de ce parcours. Leur confiance, leur patience et leurs sacrifices ont été essentiels pour mener ce projet à son terme.

TOUATI Mohamed Abderraouf

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale	19
1 État des lieux et diagnostic	21
1.1 Introduction	22
1.2 Présentation du secteur d'activité	23
1.2.1 Secteur automobile	23
1.2.2 Marché de l'automobile	25
1.2.3 Marché de l'automobile en Algérie	27
1.3 Présentation de l'entreprise	29
1.3.1 Présentation du groupe Stellantis	29
1.3.2 Présentation de Stellantis El Djazaïr	32
1.3.3 Présentation de l'usine de Taфраoui	34
1.4 État des lieux du site	36
1.4.1 Direction Planning, Projet et Supply Chain	36
1.4.2 Diagnostic stratégique de la chaîne logistique aval	39
1.4.2.1 Analyse des cinq forces de Porter	39
1.4.2.2 Analyse PESTEL	41
1.4.2.3 Analyse SWOT	43

1.4.3	Mesure et analyse des dysfonctionnements logistiques	45
1.4.3.1	Stabilité temporelle de la répartition des livraisons par wilaya	45
1.4.3.2	Classification des wilayas par classe de demande	49
1.4.3.3	Analyse de Pareto de la demande hebdomadaire par wilaya .	51
1.4.3.4	Analyse statistique des coûts de transport	51
1.4.3.5	Variabilité hebdomadaire de la demande par wilaya	55
1.4.3.6	Analyse de l'utilisation de la flotte de porte-voitures	56
1.4.3.7	Taux de remplissage de la flotte et missions de dépannage . .	58
1.4.3.8	Taux de remplissage des camions porte-voitures	60
1.4.4	Synthèse des écarts constatés	60
1.5	Problématique	62
2	État de l'art	64
2.1	Introduction	65
2.2	Conception du réseau de distribution	66
2.2.1	Le <i>Distribution Network Design</i> comme cadre	66
2.2.2	Enjeux et apports	67
2.2.3	L'arbitrage fondamental : le nombre de centres	68
2.2.4	Méthodes et place dans la planification	69
2.2.5	Procédure d'implémentation d'un projet de DND	69
2.2.6	Notions essentielles du problème	71
2.3	Localisation d'installations et recherche opérationnelle	72
2.3.1	Le problème de localisation d'installations	72
2.3.2	La famille des modèles de localisation discrète	73
2.3.3	Le modèle p -médian	75
2.3.4	Programmation linéaire en nombres entiers et résolution	77
2.3.5	Revue de littérature des travaux de localisation	78
2.4	Calcul d'itinéraires et données géospatiales	79
2.4.1	Le problème du plus court chemin	79

2.4.2	Contraction hierarchies et OSRM	80
2.4.3	Interpolation spatiale des zones de service	81
2.5	Consolidation des chargements	82
2.5.1	Le problème de <i>bin packing</i>	82
2.5.2	Le problème de tournées de véhicules – positionnement	83
2.6	Logistique du dernier kilomètre et choix de service	84
2.6.1	La problématique du dernier kilomètre	84
2.6.2	Modèles de choix discret	84
2.6.3	Cadre microéconomique du choix de service	85
2.6.4	Calibrage du ratio livraison/retrait par benchmark	85
2.7	Gestion des stocks et dimensionnement de capacité	86
2.7.1	Fondements de la gestion des stocks	86
2.7.2	Le modèle du vendeur de journaux (<i>newsvendor</i>)	86
2.7.3	Niveau de service et stock de sécurité	87
2.7.4	Dimensionnement par quantile	87
2.8	Logistique verte et empreinte carbone	89
2.8.1	Logistique verte et comptabilité carbone	89
2.8.2	Facteur d'émission en tonne-kilomètre : la méthode VECTO	89
2.8.3	Leviers de décarbonation	90
2.9	Analyse des coûts logistiques	91
2.9.1	Structure du coût logistique total	91
2.9.2	Formulation du coût total	92
2.9.3	Arbitrage transport/entreposage et analyse de scénarios	92
2.10	Méthodes d'analyse stratégique	93
2.11	Outils logiciels	93
2.12	Positionnement et synthèse	93
2.13	Conclusion	94

3 Solutions Proposées

3.1	Introduction	96
3.2	Localisation des buffers par un modèle p-médian	97
3.2.1	Principe et justification du modèle	97
3.2.2	Formulation mathématique	98
3.2.3	Données et paramètres retenus	99
3.2.4	Scénarios évalués	100
3.2.5	Choix du nombre de buffers	105
3.2.6	Analyse comparée des scénarios	106
3.2.6.1	Structure géographique et évolution des zones	106
3.2.6.2	Durées de séjour en buffer par scénario	106
3.3	Affectation des canaux de distribution : retrait client et dépannage	108
3.3.1	Principe : deux canaux de distribution aval	108
3.3.2	Cadre microéconomique : la contrainte de liquidité élastique au revenu	108
3.3.3	Modèle de décision : les deux fonctions de coût et le double limiteur	110
3.3.4	Calibrage du ratio livraison/retrait	114
3.3.5	Dimensionnement de la flotte de dépannage	115
3.4	Analyse des stocks et planification de capacité par scénario	118
3.4.1	Méthodologie de planification de capacité	118
3.4.2	Résultats par scénario	119
3.4.3	Dimensionnement détaillé par scénario	120
3.4.4	Projection à l'horizon 2028 (montée en cadence)	122
3.5	Évaluation de l'empreinte carbone des scénarios	124
3.5.1	Méthodologie : modèle d'émissions sensible à la charge	124
3.5.2	Résultats par scénario	125
3.5.3	Interprétation : la décentralisation réduit l'empreinte carbone	127
3.6	Analyse économique des coûts logistiques	127
3.6.1	Méthodologie et hypothèses de coûts	128
3.6.2	Résultats par scénario	128

3.6.3	Interprétation : la décentralisation réduit le coût	129
3.7	Analyse de la flotte de transport en mission	130
3.7.1	Méthodologie : jours d'occupation et consolidation dynamique	130
3.7.2	Résultats : trajectoire de la flotte en mission	131
3.8	Synthèse comparative et choix du scénario retenu	131
	Conclusion du chapitre	133
	Conclusion générale	134
	Annexes	136
A	Code d'implémentation du modèle p-médian	137
B	Code d'affectation des canaux de distribution (retrait / dépannage)	150
C	Code d'analyse des stocks et de planification de capacité	158
D	Code d'évaluation de l'empreinte carbone	164
E	Code d'analyse des coûts logistiques	170
F	Code d'analyse de la flotte de transport en mission	174
	Bibliographie	179

Liste des tableaux

1.1	Classement mondial des constructeurs automobiles par ventes (2025)	24
1.3	Comparaison des modes de fabrication CBU, SKD et CKD	25
1.5	Répartition du marché automobile mondial par motorisation (2025)	27
1.7	Principales mesures réglementaires impactant le marché automobile (2023–2025)	28
1.9	Évolution des ventes de véhicules neufs en Algérie (2022–2025)	29
1.11	Chronologie des acquisitions et transformations du groupe PSA	31
1.13	Chronologie des acquisitions et transformations du groupe FCA	31
1.15	Synthèse de l’analyse des cinq forces de Porter	40
1.17	Analyse PESTEL – Distribution de véhicules finis en Algérie	42
1.18	Analyse SWOT – Forces et faiblesses internes	43
1.20	Analyse SWOT – Opportunités et menaces externes	44
1.22	Matrice SWOT – Orientations stratégiques	45
1.24	Paramètres de régression – prix de livraison unitaire en camion complet	53
1.26	Paramètres de régression – prix de dépannage par distance	54
1.28	Synthèse des écarts structurels de la chaîne logistique aval	61
2.1	Classification des méthodes de résolution du DND	69
2.3	Comparaison des modèles de localisation discrète	73
2.5	Illustration numérique de l’arbitrage CTL : $p = 1$ vs $p = 4$ buffers	92
2.7	Outils logiciels et bibliothèques Python mobilisés	93
2.9	Correspondance entre les briques de la solution et leurs fondements académiques	94
3.1	Top 10 des wilayas par demande quotidienne moyenne	100

3.3	Scénarios p-médian : localisation et indicateurs de performance globaux	101
3.5	KPI détaillés par buffer et par scénario	101
3.6	Durée de séjour des véhicules en buffer, par scénario	107
3.7	Grille d'évaluation du positionnement sur le spectre livraison/retrait	115
3.9	Dimensionnement de la flotte de dépannage par scénario (cible 10 %)	116
3.10	Capacité de stockage requise et débordement par scénario	119
3.12	Dimensionnement de capacité par buffer et par scénario	121
3.13	Projection de la capacité à l'horizon 2028, par scénario	122
3.14	Paramètres massiques du modèle d'émissions (EU VECTO)	125
3.16	Empreinte carbone annuelle par scénario	126
3.18	Budget logistique (OPEX) par scénario	129
3.20	Synthèse comparative des scénarios	132

Table des figures

1	Cadrage logique du projet	20
1.1	Schéma directif du chapitre – État des lieux et diagnostic	22
1.2	Les marques automobiles du groupe Stellantis	30
1.3	Principales Régions Opérationnelles du Groupe Stellantis	32
1.4	Répartition géographique des agents par région en Algérie	33
1.5	Modèles produits sur le site de Tafraoui : Doblò Panorama, Doblò Van et Fiat 500	34
1.6	Grande Panda	34
1.7	Extension du site de production Fiat en Algérie	35
1.8	Organigramme du Direction Planning, Projet et Supply Chain – Stellantis El Djazaïr	36
1.9	Modèle de Porter – Intensité des cinq forces concurrentielles sur le marché du transport de véhicules en Algérie	41
1.10	Évolution trimestrielle de la part de livraisons par wilaya	46
1.11	Répartition géographique des livraisons au réseau d’agents par wilaya	47
1.12	Répartition des livraisons au réseau d’agents par région	48
1.13	Classification des wilayas par classe de demande (Daily / Weekly / More than week)	50
1.14	Analyse de Pareto de la demande hebdomadaire par wilaya	51
1.15	Prix de livraison d’un véhicule unique en camion complet – évolution et tendance linéaire	52
1.16	Prix de dépannage en fonction de la distance	54
1.17	Demande hebdomadaire moyenne et variabilité (σ) par wilaya	55
1.18	Répartition des missions de dépannage selon la capacité de chargement (1 ou 2 véhicules par trajet)	56

1.19	Évolution journalière du nombre de missions de dépannage (juin 2024 – avril 2025)	57
1.20	Répartition des missions de dépannage vs tournées normales — DZ Link 2024-2025	58
1.21	Fill rate moyen par wilaya — DZ Link 2024-2025 (capacité nominale : 7 véhicules/camion)	59
1.22	Répartition du taux de remplissage des camions porte-voitures	60
2.1	Schéma directif du chapitre – État de l’art	65
2.2	Hierarchie des décisions logistiques et positionnement du DND Source : d’après [1].	67
2.3	Arbitrage des coûts logistiques en fonction du nombre de centres de distribution : le coût total présente un optimum. Source : élaboration personnelle, d’après [2, 3].	68
2.4	Procédure d’implémentation d’un projet de <i>Distribution Network Design</i> et son application à Stellantis El Djazaïr. Source : élaboration personnelle, d’après [2, 4].	71
2.5	Principe du modèle p -médian : parmi les $ I $ sites candidats, p sont sélectionnés ($y_i = 1$) et chaque wilaya j est affectée au buffer ouvert le plus proche ($x_{ij} = 1$), minimisant $\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_j d_{ij} x_{ij}$. Source : élaboration personnelle, d’après [5, 6].	77
2.6	Principe de l’algorithme Branch & Bound (exemple simplifié) : l’arbre de recherche est élagué dès que la borne inférieure dépasse la meilleure solution connue. Source : élaboration personnelle, d’après [7].	78
2.7	Illustration de l’algorithme de Dijkstra sur un graphe de 5 nœuds. Les arêtes bleues forment le chemin optimal de A vers E : $A \rightarrow C \rightarrow E$ de longueur $2 + 5 = 7$ (l’arc $A \rightarrow B$ de poids 4 est non retenu car $\delta(B) = 3$ via $A \rightarrow C \rightarrow B$). Source : élaboration personnelle, d’après [8].	80
2.8	Principe des <i>contraction hierarchies</i> : la contraction du nœud v ajoute un raccourci direct (u, w) de poids $3 + 2 = 5$. Source : élaboration personnelle, d’après [9].	81
2.9	Consolidation par capacité (heuristique bin packing) : 18 véhicules remplis dans des porte-voitures de 7 emplacements nécessitent 3 missions, la troisième à 57 % de taux de remplissage. Source : élaboration personnelle.	83
2.10	Dimensionnement par quantile : la capacité Q^* est fixée au 90 ^e percentile de la distribution de la demande, garantissant un niveau de service $\alpha = 90\%$. Source : élaboration personnelle, d’après [10, 11].	88
2.11	Les trois scopes d’émissions du GHG Protocol et périmètre de la présente étude (Scope 1 : transport routier primaire et dernier kilomètre). Source : d’après [12].	89
2.12	Structure du coût total logistique (CTL) : trois composantes calculées à partir de quatre paramètres terrain. Source : élaboration personnelle, d’après [13, 3].	91

3.1	Schéma directif du chapitre – Solutions proposées	96
3.2	Localisation des buffers et affectation des wilayas selon le nombre de buffers p – scénarios $p = 2$ à $p = 5$	103
3.2	Localisation des buffers et affectation des wilayas selon le nombre de buffers p – scénario $p = 6$ (<i>suite</i>)	104
3.3	Comparaison des scénarios : distance par véhicule, demande par buffer et temps de remplissage en fonction de p	105
3.4	Modèle de décision retrait vs dépannage : coûts comparés en fonction de la distance et plafond de liquidité V_{drop} . Le dépannage n'est soutenable que pour $d \leq 62$ km ; au-delà, son prix dépasse le consentement à payer et le retrait s'impose. 111	
3.5	Zones opérationnelles de retrait (orange, ≤ 4 h) et de dépannage ($\leq 9\,756$ DZD) par scénario – scénarios $p = 2$ à $p = 5$	112
3.5	Zones opérationnelles de retrait (orange, ≤ 4 h) et de dépannage ($\leq 9\,756$ DZD) par scénario, projetées sur le réseau routier réel OSRM (<i>suite</i>)	113
3.6	Évolution du stock journalier, tendance et bande de capacité locative par buffer, pour chaque scénario	120
3.7	Empilement additif des besoins de capacité à l'horizon 2028 : base 2026, crois- sance standard et surcouche LPG, par scénario et par buffer	123
3.8	Empreinte carbone totale par scénario : transport primaire (bleu) et dépannage last-mile (orange)	126
3.9	Décomposition du budget logistique annuel (entreposage et transport) par scénario	129
3.10	Trajectoire journalière de la flotte de porte-voitures en mission (camions en transit) par scénario, selon une logique de consolidation dynamique (7 véhicules, ou 8 avec un modèle Fiat 500)	131

Liste des acronymes

- **3PL** : Third-Party Logistics (prestataire logistique tiers)
- **ADAS** : Advanced Driver-Assistance Systems
- **BEV** : Battery Electric Vehicle (véhicule 100 % électrique)
- **CASE** : Connected, Autonomous, Shared, Electric
- **CBC** : COIN-OR Branch-and-Cut (solveur d'optimisation)
- **CBU** : Completely Built-Up
- **CKD** : Complete Knocked Down
- **CRM** : Customer Relationship Management
- **CVRP** : Capacitated Vehicle Routing Problem
- **DA / DZD** : Dinar Algérien
- **ENP** : École Nationale Polytechnique
- **ESG** : Environmental, Social and Governance
- **EV** : Electric Vehicle (véhicule électrique)
- **FCA** : Fiat Chrysler Automobiles
- **HEV** : Hybrid Electric Vehicle (véhicule hybride)
- **IAP** : India & Asia Pacific (région Stellantis)
- **KPI** : Key Performance Indicator (indicateur clé de performance)
- **LOQ** : Logistics Operations Quality
- **MCA** : Maître de Conférences classe A
- **MEA** : Middle East & Africa (Moyen-Orient et Afrique)
- **NSC** : National Sales Company
- **OEM** : Original Equipment Manufacturer (constructeur automobile)
- **OSRM** : Open Source Routing Machine
- **PDI** : Pre-Delivery Inspection (inspection avant livraison)
- **PDR** : Production Demand Request
- **PESTEL** : Politique, Économique, Social, Technologique, Environnemental, Légal
- **PFE** : Projet de Fin d'Études
- **PHEV** : Plug-in Hybrid Electric Vehicle (hybride rechargeable)
- **PIB** : Produit Intérieur Brut
- **PSA** : Peugeot Société Anonyme
- **SAP** : Systems, Applications and Products (progiciel de gestion intégré – ERP)
- **SAV** : Service Après-Vente

-
- **SKD** : Semi Knocked Down
 - **SUV** : Sport Utility Vehicle
 - **SWOT** : Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
 - **TMS** : Transport Management System (système de gestion du transport)
 - **VIN** : Vehicle Identification Number (identifiant unique du véhicule)
 - **VP** : Véhicule Particulier
 - **VRP** : Vehicle Routing Problem (problème de tournées de véhicules)
 - **VUL** : Véhicule Utilitaire Léger
 - **YTD** : Year-To-Date (cumul depuis le début de l'année)
 - **ZEV** : Zero-Emission Vehicle (véhicule zéro émission)
-

Introduction générale

L'industrie automobile constitue l'un des piliers du développement économique mondial. Au-delà de la seule fabrication des véhicules, sa performance repose sur l'efficacité de sa **chaîne logistique**, et tout particulièrement de sa partie *aval* : l'acheminement des véhicules finis depuis l'usine jusqu'au client, souvent décrit comme le maillon le plus coûteux et le plus sensible de la distribution. La maîtrise des distances, des coûts de transport, des délais et, désormais, de l'empreinte carbone y est devenue un facteur de compétitivité déterminant.

L'Algérie connaît, depuis 2023, une **relance de son industrie automobile** avec l'implantation de constructeurs mondiaux. Le groupe **Stellantis** y a ouvert l'usine de **Tafraoui** (Oran), dont la production monte en cadence vers un objectif de **135 000 véhicules par an** à l'horizon 2028. Cette croissance rapide met sous tension la distribution *aval* : la livraison des véhicules aux agents du réseau national repose aujourd'hui sur un schéma **centralisé** depuis Oran, assuré par le prestataire logistique DZ Link, dont la flotte de porte-voitures s'avère structurellement insuffisante face aux pics de demande et aux longues distances vers l'Est et le Sud du pays.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent projet de fin d'études, réalisé au sein du département *Supply Chain* de **Stellantis El Djazaïr**, plus précisément au pôle **Logistique Opérationnelle et Qualité (LOQ)**. L'objectif est de **repenser l'architecture de la distribution aval** en introduisant un réseau de **centres de regroupement intermédiaires** (*buffers*), où les véhicules sont consolidés avant acheminement vers les agents, afin de réduire les distances et les coûts, de fiabiliser le service et d'absorber la montée en cadence, tout en maîtrisant l'impact environnemental.

La problématique centrale de ce travail s'articule autour de la question suivante :

Comment reconfigurer la chaîne logistique aval de distribution des véhicules de Stellantis El Djazaïr afin de réduire les distances et les coûts, de fiabiliser le service et d'absorber la montée en cadence vers 135 000 véhicules/an, tout en maîtrisant l'empreinte carbone ?

Cette question centrale se décline en trois sous-questions de recherche :

- **Où et en quel nombre ouvrir des buffers ?** Il s'agit de déterminer simultanément le *nombre* et la *localisation* optimale des centres de regroupement intermédiaires sur le territoire national.
- **Comment dimensionner les ressources et organiser le dernier kilomètre ?** Cette question recouvre l'allocation de la flotte aux corridors usine-buffer, la capacité de stockage à réserver dans chaque buffer et le choix des canaux de livraison finale (retrait client ou dépannage).

- **Quelle configuration retenir et à quel coût ?** Il reste enfin à comparer les scénarios au regard d'une métrique unifiée intégrant les coûts logistiques, l'empreinte carbone et le niveau de service, afin d'identifier la configuration cible et de valider sa robustesse.

Pour y répondre, ce mémoire est structuré en **trois chapitres** :

Chapitre 1 – État des lieux et diagnostic : il présente le secteur automobile mondial et le marché algérien, le groupe Stellantis et son usine de Tafraoui, puis le département Supply Chain et le pôle LOQ. Il conduit un diagnostic stratégique (Porter, PESTEL, SWOT) et une analyse quantitative des dysfonctionnements logistiques, débouchant sur l'énoncé de la problématique.

Chapitre 2 – État de l'art : il établit le cadre théorique et méthodologique mobilisé par la solution : localisation d'installations (modèle p-médian), calcul d'itinéraires, consolidation des chargements, logistique du dernier kilomètre et modèles de choix, gestion des stocks, logistique verte et analyse des coûts.

Chapitre 3 – Solutions proposées : il développe la solution, brique par brique : localisation des buffers par le modèle p-médian, affectation des canaux de distribution (retrait/dépannage), planification des stocks, évaluation de l'empreinte carbone et des coûts, analyse de la flotte, puis synthèse comparative conduisant au choix du réseau cible.

La figure 1 synthétise ce cadrage logique. Le mémoire se clôt par une conclusion générale qui synthétise les résultats et trace les perspectives de la présente étude.

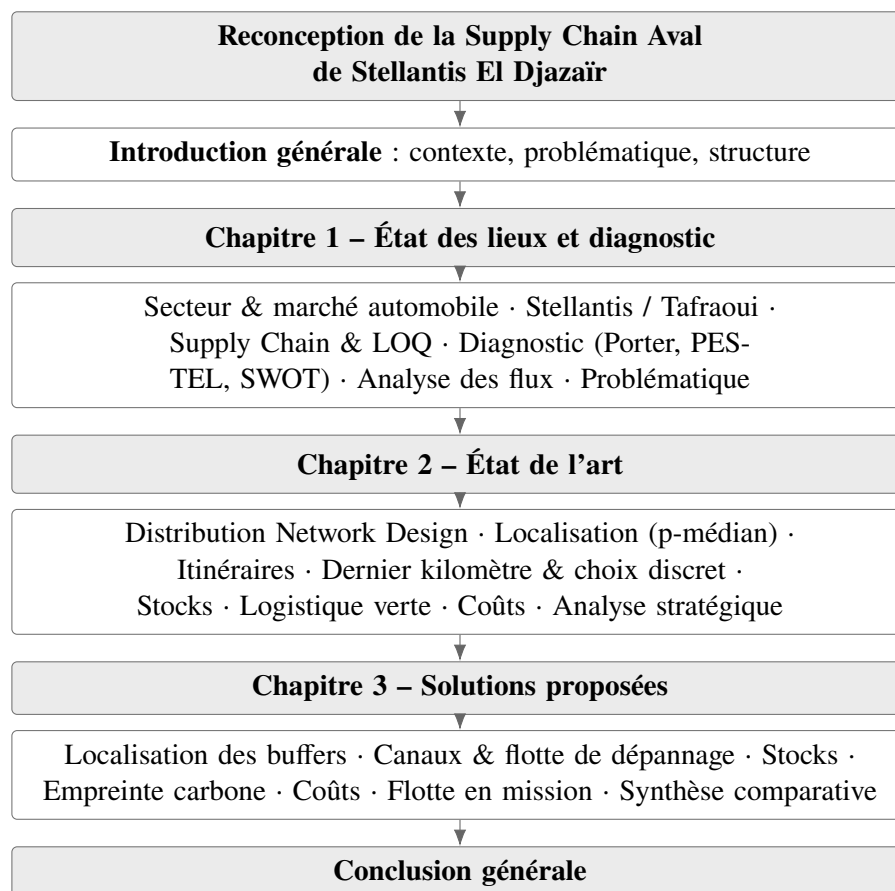


FIGURE 1 – Cadrage logique du projet

Chapitre 1

État des lieux et diagnostic

1.1 Introduction

Toute démarche d'amélioration rigoureuse s'appuie, en premier lieu, sur une compréhension approfondie du contexte dans lequel elle s'inscrit. Avant de formuler des pistes de solution ou de proposer des outils d'optimisation, il est indispensable de dresser un état des lieux structuré, permettant d'identifier avec précision les acteurs impliqués, les processus en jeu et les dysfonctionnements à traiter.

Ce chapitre s'articule autour de trois axes complémentaires. Premièrement, nous situerons le secteur automobile dans son contexte mondial et local, en mettant en lumière les dynamiques structurelles qui caractérisent cette industrie et les particularités du marché algérien en pleine recomposition. Deuxièmement, nous présenterons l'organisation du groupe Stellantis, sa filiale algérienne et le site industriel de Taфраoui, afin de contextualiser le cadre opérationnel de notre mission. Troisièmement, nous décrirons le Département Supply Chain de Stellantis El Djazair, en détaillant ses quatre pôles fonctionnels et en précisant le périmètre d'intervention du pôle **Logistics Operations Quality (LOQ)**, au sein duquel s'inscrit le présent projet de fin d'études.

La figure 1.1 présente la démarche globale adoptée dans ce chapitre.

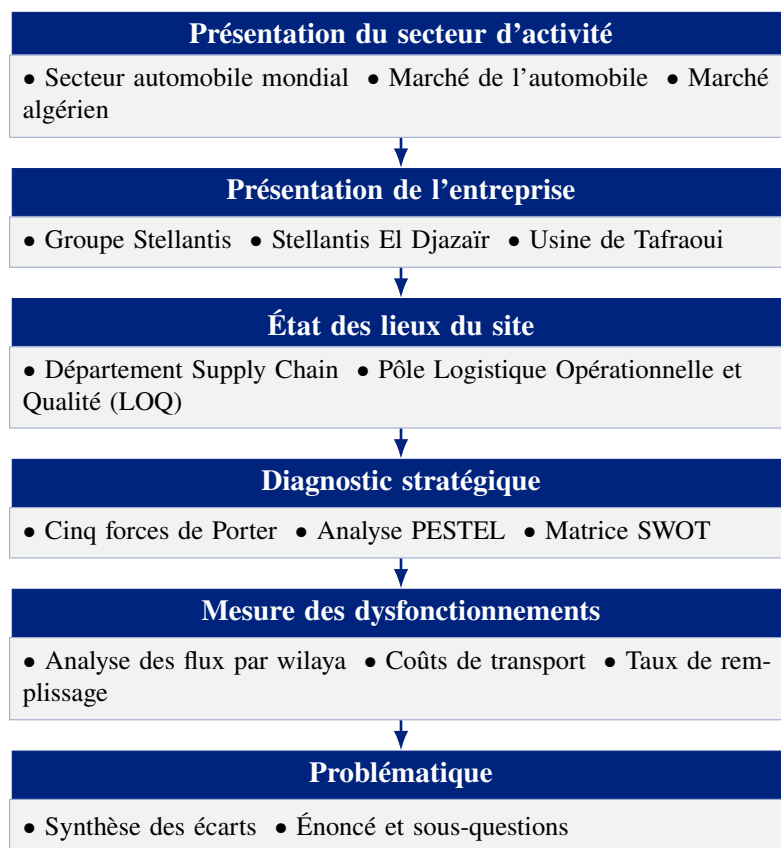


FIGURE 1.1 – Schéma directif du chapitre – État des lieux et diagnostic

1.2 Présentation du secteur d'activité

1.2.1 Secteur automobile

L'industrie automobile s'impose comme l'un des leviers incontournables du développement économique à l'échelle mondiale. Elle recouvre l'ensemble des activités liées à la conception, la fabrication, la distribution et la maintenance des véhicules motorisés. Grâce à sa capacité d'innovation technologique et à son effet multiplicateur sur les secteurs connexes, ce secteur génère un chiffre d'affaires annuel estimé à près de 2,75 billions de dollars [14], représentant environ 3 % du PIB mondial. Les ventes mondiales de véhicules ont atteint **89,6 millions d'unités** en 2025 selon S&P Global Mobility [15], portées principalement par la Chine – premier producteur mondial depuis 2009 avec plus de 30 millions d'unités – suivie par l'Amérique du Nord et l'Europe.

En termes d'emploi, le secteur représente plus de 8 millions de postes directs dans la fabrication et génère environ 40 à 50 millions d'emplois indirects dans les secteurs amont et aval de la chaîne de valeur [16]. Chaque emploi dans l'assemblage automobile entraîne en moyenne la création de 5 à 7 emplois dans des secteurs connexes, témoignant de la puissance multiplicatrice de cette industrie. Sur le plan commercial, l'automobile représente près de 8 % des échanges internationaux de marchandises, ce qui en fait l'un des secteurs les plus structurants du commerce mondial [17]. Par ailleurs, l'industrie investit plus de 100 milliards de dollars annuellement en recherche et développement, principalement orientés vers la transition électrique et les technologies CASE (*Connected, Autonomous, Shared, Electric*) [18].

A. Principaux acteurs de la chaîne de valeur

La structure du secteur automobile repose sur quatre grandes catégories d'acteurs intervenant à chaque maillon de la chaîne de valeur.

- **Constructeurs (OEM)** : En 2025, le classement mondial des ventes est dominé par Toyota (11,21 millions d'unités), suivi du groupe Volkswagen (8,68 millions), Hyundai-Kia (7,27 millions), General Motors (6,18 millions), Stellantis (5,48 millions) et BYD (4,60 millions), ce dernier dépassant Ford pour la première fois et intégrant le top 6 mondial [19]. La montée en puissance des constructeurs chinois est notable : Geely Group a enregistré une croissance de +23,4 % pour atteindre 4,12 millions d'unités en 2025 [19].
- **Équipementiers (Tier 1)** : ils fournissent directement aux OEM les sous-systèmes et modules critiques. Les leaders mondiaux sont Robert Bosch (55,8 Md€ de CA), Denso, Continental, Magna International, ZF Friedrichshafen, Valeo et Hyundai Mobis [20]. Ces acteurs jouent un rôle croissant dans les technologies CASE, notamment les systèmes ADAS, les batteries et les logiciels embarqués.
- **Réseaux de distribution et services après-vente** : concessionnaires officiels, distributeurs indépendants, plateformes de vente en ligne et prestataires logistiques (3PL) constituent le maillon final de la chaîne.
- **Nouveaux entrants technologiques** : constructeurs 100 % électriques (Tesla, Rivian, NIO, BYD), géants du numérique (Google/Waymo, Huawei, Nvidia) et start-ups spécia-

lisées dans les batteries, les logiciels de conduite autonome et les nouveaux matériaux redéfinissent progressivement les frontières sectorielles [20].

TABLE 1.1 – Classement mondial des constructeurs automobiles par ventes (2025)

Rang	Groupe	Ventes 2025	Évolution
1	Toyota Motor Company	11,21 M	+4,8 %
2	Volkswagen Group	8,68 M	−0,5 %
3	Hyundai-Kia	7,27 M	+0,8 %
4	General Motors	6,18 M	+3,0 %
5	Stellantis	5,48 M	+1,3 %
6	BYD	4,60 M	+7,7 %
7	Ford	4,40 M	−2,0 %
8	Geely Group	4,12 M	+23,4 %
9	Honda	3,46 M	−9,2 %
10	Nissan	3,21 M	−5,6 %

Source : CarExpert, d'après les déclarations financières des constructeurs [19].

B. Les différents types de fabrication

Afin de répondre aux enjeux économiques, logistiques et réglementaires des différents marchés, les constructeurs automobiles adoptent plusieurs modes de fabrication selon le degré d'assemblage local souhaité [21].

- **CBU (*Completely Built-Up*)** : le véhicule est intégralement assemblé dans le pays d'origine et exporté prêt à la commercialisation. Ce mode garantit un contrôle total de la qualité et des processus industriels, mais engendre des coûts douaniers et de transport élevés. Il est principalement adopté par les constructeurs premium tels que BMW, Mercedes-Benz, Audi et Tesla, sur les marchés matures d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie-Pacifique.
- **SKD (*Semi Knocked Down*)** : les véhicules sont partiellement assemblés avant exportation. Le montage final – limité à quelques opérations (installation du moteur, des éléments intérieurs, etc.) – s'effectue dans le pays de destination. Ce mode requiert une infrastructure industrielle légère et constitue généralement une étape transitoire avant le passage au CKD.
- **CKD (*Complete Knocked Down*)** : les véhicules sont expédiés sous forme de kits complets entièrement démontés ; la totalité de l'assemblage – soudure, peinture, montage final – est réalisée localement. Cette méthode favorise l'intégration industrielle locale, stimule l'em-

ploi national et permet de contourner des droits de douane élevés, en contrepartie d'une organisation logistique plus complexe et d'investissements d'infrastructure significatifs.

TABLE 1.3 – Comparaison des modes de fabrication CBU, SKD et CKD

Critère	CBU	SKD	CKD
Assemblage local	Aucun	Partiel	Intégral
Coût logistique	Élevé	Moyen	Faible
Intégration locale	Nulle	Faible	Élevée
Infrastructure requise	Aucune	Légère	Importante
Contrôle qualité	Total	Partiel	Partagé
Droits de douane	Élevés	Réduits	Minimaux

Source : adapté de Saycan (2025) [21].

À l'échelle mondiale, les constructeurs généralistes – particulièrement implantés sur les marchés émergents – adoptent une stratégie en deux temps : un démarrage en **SKD**, adapté aux premières implantations industrielles et aux capacités locales limitées, suivi d'une **transition vers le CKD** dès que les infrastructures logistiques et l'intégration locale le permettent [21]. C'est précisément la trajectoire suivie par Stellantis en Algérie, qui a débuté en mode SKD lors de l'inauguration de l'usine de Tafraoui en décembre 2023, avant d'engager la transition vers le CKD dès 2025, avec un objectif de taux d'intégration locale supérieur à 30 % [22].

1.2.2 Marché de l'automobile

Le marché automobile mondial constitue un écosystème commercial d'une ampleur considérable. En 2025, les ventes mondiales de véhicules légers ont atteint **89,6 millions d'unités** [15], contre 92,5 millions en 2024, reflétant un léger ralentissement lié aux incertitudes macroéconomiques et aux tensions commerciales entre grandes puissances. Ce marché se caractérise par une forte segmentation géographique et une évolution cyclique influencée par les conditions économiques mondiales.

La demande mondiale de véhicules reste inégalement répartie entre trois pôles principaux qui concentrent l'essentiel des volumes. L'Asie-Pacifique domine avec près de **49 %** des ventes mondiales trackées [23], dont la Chine seule représente **30,1 millions d'unités** en 2025 – soit environ 33 % du marché global [24]. L'Amérique du Nord se positionne en deuxième place avec environ **25 %** des ventes mondiales, les États-Unis représentant à eux seuls 15,95 millions d'unités en 2024 [23]. L'Europe complète ce trio avec environ **23 %** du marché des véhicules particuliers [25]. Les dynamiques de croissance varient selon les régions : les marchés émergents d'Asie du Sud (Inde : +4,6 % en 2025) et d'Amérique du Sud affichent une croissance soutenue,

tandis que les marchés matures d'Europe et d'Amérique du Nord connaissent une stabilité relative [26].

A. Segmentation par catégories de véhicules

Le marché est structuré autour de trois grandes familles de véhicules :

1. **Les véhicules particuliers (VP)** représentent la part dominante du marché mondial. Parmi les sous-segments, les **SUV et crossovers** s'imposent comme le segment le plus dynamique : en 2025, le marché mondial des SUV est évalué à **890 milliards de dollars**, avec une croissance annuelle projetée à 6,66 % jusqu'en 2030 [27]. L'Asie-Pacifique représente à elle seule plus de 50 % de ce marché [28]. Les véhicules premium et de luxe, quant à eux, représentent environ 10 % du marché en volume, mais contribuent à hauteur de 30 % en valeur.
2. **Les véhicules utilitaires légers (VUL)** constituent une fraction importante du marché, avec une importance particulière en Amérique du Nord où les pick-up et SUV lourds dominent les ventes.
3. **Les véhicules lourds** (camions, bus) représentent une part minoritaire en volume, mais demeurent stratégiques en valeur, notamment dans les marchés industriels en développement.

B. Segmentation par motorisation

La répartition des ventes par type de motorisation connaît une transformation accélérée. En 2024, les véhicules électrifiés (BEV + PHEV + HEV) ont représenté **19,9 %** du marché mondial des véhicules légers selon EV Volumes, avec 17,8 millions d'unités électriques vendues [29]. En 2025, les ventes mondiales d'EV ont atteint **20,7 millions d'unités** (+20 % par rapport à 2024), dont deux tiers concentrés en Chine (12,9 millions) [30].

1. **Véhicules thermiques (essence et diesel)** : ils demeurent majoritaires, mais leur part de marché recule progressivement sous la pression des réglementations environnementales (norme Euro 7 en Europe, ZEV mandate aux États-Unis).
2. **Véhicules électrifiés** :
 - Les **BEV** (*Battery Electric Vehicles*) atteignent une part de marché mondiale de **15,4 %** au premier semestre 2025 [31], avec 19 pays dépassant le seuil des 20 % de pénétration.
 - En Chine, **près d'un véhicule sur trois** vendu en H1 2025 est 100 % électrique (part de marché BEV : 30,8 %) [31].
 - En Europe, la part des BEV s'établit à **16,9 %** en 2025 (YTD novembre) [30].
 - Les **HEV et PHEV** progressent également, portés par le rebond des hybrides Toyota (+53 %) et Honda (+80 %) en 2023–2024 [19].
 - Les technologies alternatives (hydrogène, etc.) restent marginales (<1 % du marché mondial).

TABLE 1.5 – Répartition du marché automobile mondial par motorisation (2025)

Type de motorisation	Part de marché	Tendance
Thermique (essence + diesel)	~75 %	Déclin régulier
BEV (100 % électrique)	~15,4 %	Forte croissance
HEV + PHEV (hybrides)	~9 %	Croissance soutenue
Autres (hydrogène, etc.)	<1 %	Marginal

Sources : EV Volumes [29]; EVwire H1 2025 [31].

C. Segmentation par puissance et performance

Au-delà de la catégorie du véhicule et du type de motorisation, la puissance du groupe motopropulseur constitue un critère de segmentation pertinent dans une logique d'adéquation entre l'offre constructeur, les attentes clients et les stratégies de positionnement produit. Cette segmentation repose sur la puissance exprimée en chevaux (ch), indicateur universellement reconnu dans l'industrie. Une typologie couramment admise distingue quatre grandes classes :

- **Faible puissance (< 100 ch)** : véhicules destinés à un usage urbain ou périurbain, axés sur la sobriété énergétique et l'accessibilité tarifaire. La majorité des modèles appartient aux segments A et B (citadines, micro-citadines).
- **Puissance intermédiaire (100 – 200 ch)** : couvre le cœur du marché européen et nord-américain – berlines compactes, SUV compacts et véhicules familiaux des segments C et D.
- **Haute performance (200 – 400 ch)** : positionné sur des usages dynamiques ou professionnels (gammes sportives, berlines haut de gamme, utilitaires puissants).
- **Ultra-haute performance (> 400 ch)** : véhicules de prestige (supercars, GT, premium électrifiés), à faible volume mais à forte valeur créatrice. Ce segment est en expansion avec la montée des hypercars électriques.

Cette segmentation permet aux constructeurs d'ajuster leur offre à des segments de clientèle spécifiques, tout en structurant leur stratégie industrielle selon les exigences en matière de châssis, de chaîne de traction, de consommation énergétique et de réglementation environnementale.

1.2.3 Marché de l'automobile en Algérie

Le marché automobile algérien occupe une place stratégique sur le continent africain, porté par une demande structurellement élevée et des ambitions industrielles affirmées. Après une période de forte dépendance aux importations, le gouvernement algérien a engagé, dès le début des années 2010, une stratégie de localisation de la production. Ce tournant s'est concrétisé par la

mise en place de premières unités d'assemblage local, avant d'être brutalement interrompu entre 2017 et 2021 par des restrictions réglementaires strictes, le gel des importations et la suspension des activités industrielles [32].

À partir de 2022, un nouveau cadre réglementaire a relancé les importations et la production locale. En 2023, le marché a enregistré une reprise spectaculaire de **+345,3 %**, atteignant **113 122 unités**, portée par la réouverture des licences d'importation et l'arrivée massive de marques asiatiques, notamment chinoises (Chery, DFSK, Geely) [33]. En 2024, la dynamique s'est poursuivie avec **179 332 unités** vendues (+58,5 %), dont plus d'un milliard de dollars d'importations, contre 564,9 millions en 2023 [34].

Cependant, l'année **2025 s'est révélée difficile** : le marché a chuté de **52,6 %** par rapport à 2024 [33], en raison de l'absence totale de quotas d'importation accordés aux concessionnaires agréés tout au long de l'année. Concrètement, aucun véhicule neuf n'a été importé via le circuit officiel des concessionnaires en 2025. Seule la production locale – Stellantis Fiat à Tafraoui – a maintenu une offre, insuffisante face à la demande croissante. Fiat a néanmoins conservé son statut de leader absolu du marché avec **71,5 %** de parts de marché en 2025 [33]. Cette pénurie a alimenté une flambée des prix et le développement de pratiques spéculatives sur le marché de l'occasion [35].

Cadre réglementaire et contraintes structurelles

L'Algérie a modifié à plusieurs reprises sa politique d'importation pour ajuster l'offre à la demande et prévenir la spéculation. Le tableau 1.7 synthétise les principales mesures en vigueur depuis 2023.

TABLE 1.7 – Principales mesures réglementaires impactant le marché automobile (2023–2025)

Mesure	Date	Conditions clés	Objectif	Effet observé
Importation VO <3 ans	Oct. 2023	Véhicule <3 ans d'âge	Répondre à la demande	+150 % importations (9 mois 2024)
Inaccessibilité 3 ans	Janv. 2025	Revente interdite <3 ans ou pénalités	Lutter contre la spéculation	Réduction de l'incitation à la revente
CCR <60 000 EUR	2024	Véhicule neuf, <1 an, statut professionnel	Encourager la diaspora	Accès facilité à certains profils
Interdiction diesel	En vigueur	Tous types (import. et production)	Transition énergétique	Tension sur le parc diesel actuel
Ports secs obligatoires	Juin 2025	Zones logistiques intérieures agréées	Désengorger les ports maritimes	Fluidification de la chaîne douanière

Source : [36].

Sur le front industriel, plusieurs projets structurants sont en cours de déploiement :

- **Stellantis – Usine de Tafraoui (Oran)** : inaugurée en décembre 2023, l’usine produit les modèles Fiat 500, Doblò et Doblò Van. Elle est en transition vers le mode CKD depuis 2025, avec un objectif de **90 000 véhicules/an** et un taux d’intégration locale supérieur à **30 %** d’ici 2026 [22].
- **Hyundai – Usine de Sidi Khettab (Relizane)** : le constructeur sud-coréen relance l’ex-usine Sovac avec un investissement de **400 millions de dollars**. La capacité initiale est fixée à **50 000 véhicules/an**, avec une production débutant en **2026**. La gamme comprend la Grand i10, l’Accent, le SUV Creta et deux modèles utilitaires, avec une perspective d’introduction de véhicules électriques [37][38].
- **Constructeurs chinois** : Chery, Jetour (ex-usine Gloviz à Batna, objectif 270 000 véhicules), BAIC et DFSK accélèrent leurs implantations locales, positionnant l’Algérie comme un hub industriel régional [32].

TABLE 1.9 – Évolution des ventes de véhicules neufs en Algérie (2022–2025)

Année	Unités vendues	Évolution	Contexte clé
2022	~25 000	–	Réouverture progressive des licences
2023	113 122	+345,3 %	Réouverture totale des importations
2024	179 332	+58,5 %	Consolidation, Fiat leader (68,3 %)
2025	~85 000	–52,6 %	Zéro quota concessionnaires ; crise d’offre

Sources : Focus2Move [33] ; Ministère du Commerce algérien [34].

Malgré les signaux positifs liés à l’industrialisation, le marché algérien reste en transition, confronté à un déséquilibre structurel entre l’offre et la demande, une régulation instable et des capacités industrielles encore en construction. La relance durable du secteur dépendra de la stabilité des politiques publiques, de la confiance des investisseurs et de l’émergence d’un tissu industriel local compétitif.

1.3 Présentation de l’entreprise

1.3.1 Présentation du groupe Stellantis

A. Genèse de la fusion

Stellantis est un groupe automobile multinational né en **janvier 2021** de la fusion entre le groupe **PSA** (Peugeot Société Anonyme) et **FCA** (Fiat Chrysler Automobiles), constituant l’un des événements les plus structurants de l’industrie automobile de la décennie. Les premières discussions ont débuté en 2019, avec une annonce officielle en décembre de la même année. Après

approbation par les actionnaires des deux groupes et obtention des autorisations réglementaires nécessaires – notamment auprès de la Commission européenne et des autorités américaines – la fusion a été finalisée en janvier 2021 [39].

Le nom *Stellantis* provient du verbe latin *stello*, signifiant « illuminer avec des étoiles ». Cette dénomination est utilisée exclusivement comme marque corporative, tandis que les noms et identités visuelles des marques constitutives demeurent inchangés. Le groupe rassemble un portefeuille de **16 marques** [40] : Abarth, Alfa Romeo, Chrysler, Citroën, Dodge, DS Automobiles, Fiat, Jeep®, Lancia, Maserati, Opel, Peugeot, Ram, Vauxhall, Free2move et Leasys, illustré dans la figure ci-dessous.



FIGURE 1.2 – Les marques automobiles du groupe Stellantis

Dans sa vision stratégique, le groupe s’appuie sur quatre valeurs fondamentales : la centralité du client, la réussite collective, l’agilité et l’innovation, ainsi que la préservation d’un avenir durable.

B. Historique des entités constitutives

B.1 – Groupe PSA

PSA possède une histoire remontant à **1810** avec la création de Peugeot. Le groupe s’est développé au fil des décennies par des acquisitions stratégiques majeures [41] :

TABLE 1.11 – Chronologie des acquisitions et transformations du groupe PSA

Année	Événement
1966	Création du groupe PSA
1974	Acquisition de Citroën
1978	Rachat des activités européennes de Chrysler
2016	Création de la marque DS Automobiles comme entité distincte
2017	Acquisition d'Opel et Vauxhall auprès de General Motors
2021	Fusion avec FCA pour former le groupe Stellantis

B.2 – Fiat Chrysler Automobiles (FCA)

FCA résulte elle-même d'une fusion réalisée en **2014** entre Fiat S.p.A. et Chrysler Group LLC [42] :

TABLE 1.13 – Chronologie des acquisitions et transformations du groupe FCA

Année	Événement
1899	Fondation de Fiat à Turin
2009	Fiat prend une participation dans Chrysler suite à la crise financière
2011	Acquisition de la participation majoritaire dans Chrysler
2014	Acquisition complète de Chrysler et création de FCA
2015	Scission de Ferrari, introduction en Bourse
2021	Fusion avec le groupe PSA pour former Stellantis

C. Structure organisationnelle et performances récentes

Stellantis est structuré autour de **quatre régions opérationnelles** :

- **Enlarged Europe & MEA** (Europe élargie, Moyen-Orient et Afrique),
- **IAP & China** (Asie-Pacifique et Chine),
- **South America** (Amérique du Sud),
- **North America** (Amérique du Nord).

La carte ci-dessous illustre cette répartition géographique et stratégique adoptée par le groupe.



FIGURE 1.3 – Principales Régions Opérationnelles du Groupe Stellantis

En **juin 2025**, le groupe a procédé à une restructuration organisationnelle majeure avec la nomination d’**Antonio Filosa** au poste de Directeur Général, en remplacement de Carlos Tavares. Cette réorganisation met l’accent sur une prise de décision produit plus proche des régions et un recentrage sur les préférences clients [43].

Sur le plan financier, Stellantis a publié ses résultats annuels 2025 : le groupe affiche un **chiffre d’affaires de 153,5 milliards d’euros** (–2 % vs 2024), pénalisé par les effets de change et le recul des prix en première moitié d’année. La perte nette s’établit à **22,3 milliards d’euros**, principalement imputable à 25,4 milliards d’euros de charges exceptionnelles liées à la réorientation stratégique du groupe. Le second semestre 2025 a marqué un redressement net, avec **2,8 millions d’unités expédiées** (+11 % sur un an) et un chiffre d’affaires H2 en hausse de 10 % [44]. À fin décembre 2025, le groupe employait **258 668 personnes** [45].

1.3.2 Présentation de Stellantis El Djazaïr

Stellantis El Djazaïr est la filiale algérienne du groupe Stellantis, chargée de la commercialisation, de la production et des services après-vente des marques du groupe sur le territoire national. Depuis son lancement en **mars 2023**, elle s’est imposée comme le premier acteur du marché automobile algérien, en un temps record.

Lancement et montée en puissance commerciale

Le 19 mars 2023, Stellantis El Djazaïr a lancé la marque **Fiat** en Algérie, avec une offre initiale de **six modèles** (trois touristiques et trois utilitaires) à des prix compris entre 2,6 et 4,6 millions de dinars [46]. L’accueil du marché a été exceptionnel : **15 000 commandes** ont été enregistrées dès les deux premières semaines [46]. En novembre 2023, la filiale a élargi son offre avec le lancement de la marque **Opel**, portant le catalogue à **9 modèles répartis sur 2 marques** [47]. Pour soutenir cette expansion, un réseau de **63 agents de vente** et **52 agents SAV** a été déployé

à travers le pays, couvrant plus de **65 %** du territoire national [47], avec une équipe de près de **900 collaborateurs**.

La carte ci-dessous illustre la répartition géographique des agents commerciaux de StellantisFiat à travers le pays :

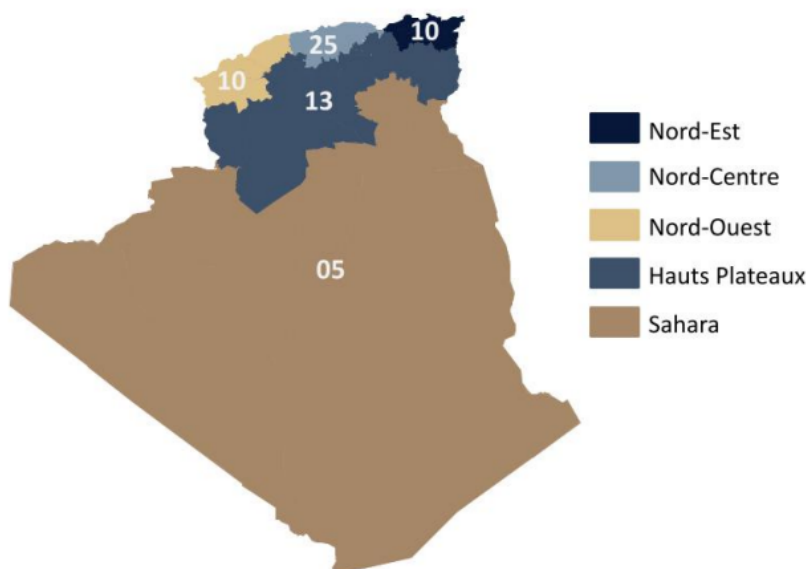


FIGURE 1.4 – Répartition géographique des agents par région en Algérie

Activité industrielle

Sur le plan industriel, Stellantis El Djazaïr exploite une usine d'assemblage à **Tafraoui (Oran)**, inaugurée en décembre 2023, dont les caractéristiques et les performances sont détaillées dans la section 1.3.3 ci-après.

Positionnement et perspectives stratégiques

En 2025, **Fiat** a conservé son statut de leader incontesté du marché automobile algérien avec **71,5 %** de parts de marché [33], dans un contexte de pénurie générale liée à l'absence de quotas d'importation. En 2023, Fiat détenait **78 %** de parts de marché et se classait en tête des ventes mondiales de la marque au sein du groupe Stellantis [48].

Cette implantation s'inscrit dans la stratégie régionale **Dare Forward 2030** du groupe, qui vise à vendre **un million de véhicules** dans la région Moyen-Orient et Afrique (MEA) d'ici 2030, avec une autonomie de production régionale de **70 %** et des perspectives d'exportation depuis l'Algérie vers les marchés africains et méditerranéens [49][50]. Comme l'a déclaré **Samir Cherfan**, Directeur des Opérations MEA de Stellantis : « *Cela témoigne de notre volonté d'investir à long terme dans l'industrie automobile algérienne et de positionner l'Algérie comme un pilier stratégique pour Stellantis au Moyen-Orient et en Afrique.* » [51].

Stellantis a signé des accords avec plusieurs sous-traitants locaux dans les domaines des sièges (**MARTUR**), des systèmes d'échappement (**PUREM**), des pièces plastiques (**SIGIT-ACS**), de l'électronique (**IDE-NET**) et de la logistique (**DZ Link**) [52]. Cette stratégie de *deep localization*

dépasse les simples opérations d'assemblage pour poser les fondations d'un écosystème industriel complet et technologiquement structuré, avec pour objectif de dépasser **45 %** d'intégration locale d'ici 2026 [52].

1.3.3 Présentation de l'usine de Tafraoui

L'usine FIAT de Stellantis en Algérie est implantée dans la région d'Oran, à Tafraoui. Ce projet est né d'une volonté stratégique du groupe Stellantis de renforcer sa présence sur le marché africain, et plus particulièrement en Algérie. Inaugurée le **11 décembre 2023**, l'usine s'étend sur une surface totale de **200 000 m²**, dont **77 000 m²** de bâtiments couverts, avec une capacité de production annuelle cible de **90 000 véhicules** [47].

Trois modèles sont actuellement produits sur le site : la **Fiat 500**, le **Fiat Doblò** et le **Fiat Doblò Van**. La montée en cadence industrielle a été rapide : après **18 000 véhicules** assemblés en 2024, le cap des **80 000 unités cumulées** a été franchi en **mars 2026**, avec une moyenne de production de **40 000 véhicules par an** [53].



(a) Doblò PANO



(b) Doblò VAN



(c) 500

FIGURE 1.5 – Modèles produits sur le site de Tafraoui : Doblò Panorama, Doblò Van et Fiat 500

Le site est en cours d'extension significative : les ateliers de **soudure et de peinture** ont été mis en service en **septembre 2025**, permettant le passage à une production en mode **CKD (Complete Knocked Down)** à part entière [54]. Le prochain modèle prévu en production locale est la **Fiat Grande Panda**. Un programme d'extension annoncé en avril 2026 vise à porter la capacité à **135 000 véhicules/an** à l'horizon **2028** [54].



FIGURE 1.6 – Grande Panda

Dans le cadre de sa stratégie mondiale **Dare Forward 2030**, Stellantis ambitionne de faire de l'Algérie un centre stratégique de l'industrie automobile en Afrique. Les objectifs de montée

en cadence sont les suivants : **60 000 véhicules** en 2025, **90 000 unités** en 2026, avec un taux d'intégration locale supérieur à **30 %** [55], et **135 000 unités** à l'horizon 2028 [54]. L'usine représente également un levier de création d'emplois avec **5 000 postes** directs et indirects générés à ce jour [53].



FIGURE 1.7 – Extension du site de production Fiat en Algérie

1.4 État des lieux du site

Après avoir présenté le contexte sectoriel ainsi que l'organisation de Stellantis, nous recentrons l'analyse à l'échelle du site afin de mieux appréhender les dynamiques internes qui régissent ses opérations. Cette section a pour objectif de dresser un état des lieux structuré du fonctionnement opérationnel actuel, avec un focus particulier sur la Direction Planning, Projet et Supply Chain. Cette dernière joue un rôle stratégique dans la coordination des flux physiques, informationnels et administratifs liés aux véhicules, depuis leur commande jusqu'à leur mise à disposition finale. À travers une présentation des principaux services et un diagnostic ciblé sur le service Logistique Opérationnelle et Qualité, cette analyse permettra d'identifier les enjeux clés et d'orienter les axes d'amélioration.

1.4.1 Direction Planning, Projet et Supply Chain

Au sein de l'organisation, la Direction Planning, Projet et Supply Chain occupe une position stratégique. Elle est responsable de la gestion de l'ensemble des flux physiques, informationnels et administratifs liés aux véhicules, depuis leur commande jusqu'à leur mise à disposition finale pour le client. Cette direction regroupe un ensemble de services transverses qui assurent la coordination entre les prévisions de demande, les procédures d'homologation, le suivi qualité, le transport, le stockage, la traçabilité des véhicules ainsi que la transformation digitale des processus logistiques. Son objectif principal est de garantir la fluidité, la transparence et la réactivité dans la gestion des véhicules tout au long de leur cycle de traitement, tout en maîtrisant les coûts et en assurant un haut niveau de service aux clients internes et externes.

L'organisation de la direction est illustrée dans la figure 1.8.

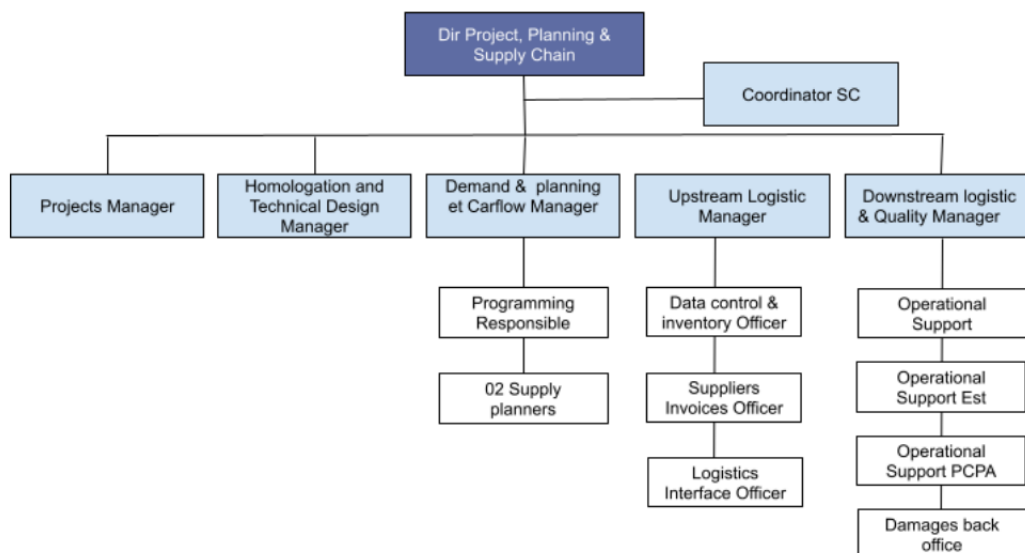


FIGURE 1.8 – Organigramme du Direction Planning, Projet et Supply Chain – Stellantis El Djazair

Dans ce qui suit, nous détaillerons les différents services composant cette direction, avant de focaliser notre attention sur le service Logistique Opérationnelle et Qualité, qui fera l'objet d'un diagnostic approfondi.

1. Service Projets

Ce service facilite la transformation digitale et l'amélioration continue au sein de la direction. Il identifie les besoins des équipes, pilote les projets de digitalisation (CRM, intégration SAP NSC), sélectionne les outils et prestataires, et accompagne les utilisateurs jusqu'à la mise en œuvre. Son rôle est d'optimiser les processus existants, de réduire la charge opérationnelle et d'améliorer la visibilité des données. Il agit en tant que relais stratégique entre les métiers opérationnels et les solutions technologiques.

2. Service Homologation et Conception Technique

Ce service assure la conformité réglementaire des véhicules commercialisés sur le marché algérien. Il traite avec les instances administratives compétentes – les Mines (Alger et Oran) et le Ministère de l'Énergie – pour garantir l'homologation des modèles importés. En cas de campagnes de rappel, il identifie les véhicules concernés et veille à l'application des correctifs techniques avant leur mise à disposition. Il agit également en tant que support technique pour les fonctions Qualité, Marketing, Après-Vente et Forces de Vente.

3. Service Logistique Amont

Ce service gère les flux logistiques depuis les usines de production jusqu'à la réception physique des véhicules sur le territoire algérien. Il coordonne les approvisionnements, le transport international, le dédouanement et veille à la fiabilité des stocks entre le système SAP et le terrain. Il assure également le traitement des factures prestataires, le suivi des livraisons, la gestion documentaire et l'analyse de la performance logistique via des indicateurs KPI. En lien étroit avec les services Commerce, Finance, Logistique Opérationnelle et les prestataires externes, il garantit la disponibilité des véhicules et la fluidité des opérations.

4. Service Demand Planning & Carflow

Le Service Demand Planning et Carflow est chargé d'assurer l'efficacité de la planification de la demande et la gestion des commandes. Il collabore étroitement avec les équipes Marketing (Prix/Produit), les Order Schedulers en centrale, la logistique amont et le commerce. Ses missions s'articulent autour de trois volets :

- **Planification de la demande (MP)** : mise à jour des actuals (atterrissage du mois précédent en production, Wholesales, Retail Sales et stocks), actualisation du carflow, calcul de la PDR (*Production Demand Request*) figée à M+2 et prévisionnelle sur l'exercice fiscal, et remontée vers le système de programmation en centrale.
- **Gestion des commandes** : pilotage du processus de commande depuis l'insertion jusqu'à la validation par les usines, avec suivi rigoureux du respect des spécifications produit et du positionnement temporel des ordres.
- **Suivi des stocks** : alimentation et mise à jour quotidienne des données de stock avec traçabilité complète des véhicules (statut de production, liens VON–VIN, dates clés) et communication vers la Direction des Ventes.

Ce service constitue un acteur stratégique au sein de la chaîne logistique, en raison de son positionnement en amont, de son impact direct sur la disponibilité des produits, et de ses interactions transverses avec l'ensemble des fonctions de l'entreprise.

5. Service Logistique Opérationnelle et Qualité

Ce service supervise les opérations depuis le port jusqu'à la livraison client, en veillant au respect des standards Stellantis en matière de qualité, de délais et de coûts. Il pilote les prestataires logistiques, accompagne les démarches d'homologation, supervise la préparation des véhicules – PDI (*Pre-Delivery Inspection*) – et gère les avaries. Il contrôle la qualité des parcs et suit les KPI qualité. En interaction permanente avec les ports, les prestataires et les services internes, il contribue directement à la satisfaction client et au bon déroulement des livraisons.

Organisation logistique globale du site

Chacun de ces services est adossé à des fonctions spécialisées : planification PCPA, reporting, analyse de la performance logistique, traçabilité, gestion documentaire et suivi réglementaire. Cette division du travail assure une couverture complète du cycle logistique, de l'amont (approvisionnement) à l'aval (livraison véhicule), en intégrant les contraintes terrain, la vision stratégique du groupe et les impératifs réglementaires nationaux.

Sur le plan opérationnel, le département Supply Chain joue un rôle central dans la réussite de la production locale. Il coordonne l'ensemble des flux d'approvisionnement, incluant l'importation maritime et terrestre des pièces, le dédouanement, le stockage temporaire et l'acheminement vers la chaîne d'assemblage. Parallèlement, il gère les flux locaux issus de la sous-traitance nationale, un enjeu clé pour atteindre les objectifs de taux d'intégration industrielle fixés par l'État algérien (objectif : **30 %** d'ici 2026). Cette double logique – flux internationaux et développement d'un écosystème local – impose une gestion agile, coordonnée et digitalisée, afin d'éviter toute rupture, tout ralentissement ou surcoût.

Une fois les véhicules finalisés à l'usine de Tafraoui, la logistique aval prend le relais. Le département assure leur stockage, leur préparation à la livraison (contrôle qualité, documentation) et leur transport vers les points de vente à travers le territoire. Ces opérations s'effectuent en partenariat avec des prestataires logistiques tiers (3PL) – principalement **DZ LINK** pour le transport routier – tandis que les opérations de dédouanement, de transit et de conformité réglementaire, y compris via le dispositif obligatoire des ports secs en vigueur depuis **juin 2025**, sont assurées par **SEGADE** [36].

L'ensemble de cette organisation logistique – de la planification à la distribution – constitue le terrain d'étude de notre projet. L'objectif est de contribuer, à notre échelle, à la professionnalisation de la chaîne logistique à travers une analyse des pratiques actuelles, des pistes d'optimisation et une meilleure articulation entre flux physiques et informationnels. Cette immersion au sein de la Supply Chain de Stellantis El Djazair offre une opportunité concrète de relier enjeux industriels, stratégies de localisation et performance logistique dans un contexte en pleine transformation.

1.4.2 Diagnostic stratégique de la chaîne logistique aval

Avant d'engager le diagnostic opérationnel ciblé sur les dysfonctionnements du service Logistique Opérationnelle et Qualité (LOQ), il est indispensable de situer la chaîne logistique aval de Stellantis El Djazaïr dans son environnement macro et concurrentiel. Cette lecture préalable permet d'identifier les forces structurelles qui conditionnent les marges de manœuvre disponibles, et de distinguer les dysfonctionnements d'origine interne de ceux imposés par des contraintes exogènes.

L'analyse stratégique est conduite en trois étapes complémentaires et séquentielles. L'analyse des cinq forces de Porter cartographie la structure concurrentielle du marché du transport de véhicules finis en Algérie. L'analyse PESTEL recense ensuite les facteurs macro-environnementaux pesant sur les opérations logistiques. L'analyse SWOT synthétise enfin les forces et faiblesses internes face aux opportunités et menaces identifiées. La convergence de ces trois lectures constitue le socle analytique fondant l'énoncé de la problématique.

1.4.2.1 Analyse des cinq forces de Porter

L'analyse des cinq forces de Porter est appliquée ici au **marché spécifique du transport routier de véhicules finis en Algérie**, dans lequel DZ Link opère en tant que prestataire logistique tiers (3PL) mandaté par Stellantis El Djazaïr. L'objectif est d'identifier les rapports de force structurels qui contraignent la performance de ce maillon critique de la chaîne de distribution aval, et de hiérarchiser les leviers d'action disponibles.

Force 1 – Rivalité entre concurrents existants. Intensité : Faible à modérée.

Le marché algérien du transport spécialisé de véhicules finis est peu structuré et dominé par des opérateurs indépendants. DZ Link occupe une position quasi monopolistique sur ce segment, sans concurrent logistique intégré de taille comparable. Cependant, le secteur informel d'importation constitue une *concurrence indirecte pour l'accès à la ressource* en mobilisant les mêmes porte-voitures à des tarifs structurellement supérieurs.

Force 2 – Pouvoir de négociation des fournisseurs. Intensité : Élevée.

DZ Link dispose d'une flotte propre de **80 porte-voitures**, soit les deux tiers du parc national estimé à **120 unités**. Ce niveau d'intégration verticale partielle atténue la dépendance pure aux transporteurs indépendants, mais ne la supprime pas : les **40 unités externalisées** demeurent indispensables pour couvrir les pics de demande (190 à 200 missions requises sur 72 heures). Le pouvoir de ces transporteurs tiers reste structurellement élevé, amplifié par l'existence d'une demande concurrente du secteur informel rémunérant les missions au double du tarif officiel et par l'impossibilité juridique d'imposer une exclusivité contractuelle. Le problème capacitaire est donc à la fois **interne** (flotte propre insuffisante face à la montée en cadence) et **externe** (impossibilité de fidéliser durablement les transporteurs indépendants).

Force 3 – Pouvoir de négociation des clients. Intensité : Modérée.

Stellantis El Djazaïr constitue le client unique de DZ Link pour la livraison de véhicules neufs. Ce monopsonne partiel confère théoriquement un levier contractuel à Stellantis, mais il est limité

par l'incapacité de DZ Link à combler seul le déficit capacitaire. La montée en cadence vers 90 000 véhicules par an amplifie mécaniquement la pression sur le prestataire sans que la capacité de transport ne progresse proportionnellement.

Force 4 – Menace des produits de substitution. Intensité : Faible.

Le transport de véhicules finis par porte-voitures ne dispose d'aucun substitut économiquement viable à grande échelle sur le territoire algérien : le transport ferroviaire spécialisé est inexistant dans sa forme actuelle, le convoyage individuel est non scalable, et le cabotage maritime ne constitue pas encore une option de distribution interne structurée. L'absence de substitut immédiat renforce la dépendance au porte-voitures et justifie la recherche d'alternatives multimodales à moyen terme.

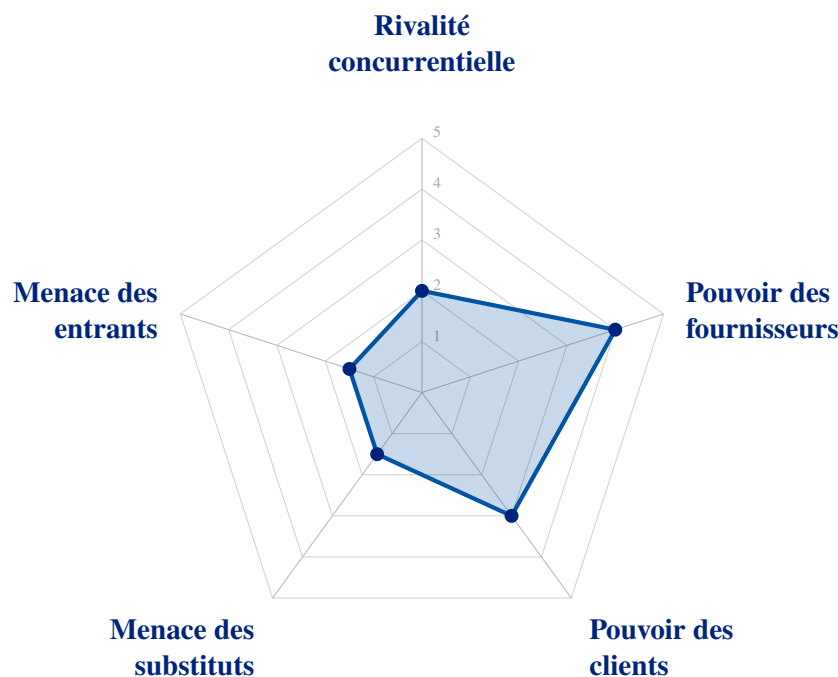
Force 5 – Menace des nouveaux entrants. Intensité : Faible à court terme.

Les barrières à l'entrée sont substantielles : intensité capitalistique de l'investissement, exigences d'homologation réglementaire, profil risque-rendement défavorable dans un contexte réglementaire instable, et interdiction légale pour DZ Link d'importer directement des porte-voitures en raison de son statut de prestataire logistique. Ces barrières impliquent que la reconstitution du parc ne peut reposer sur un mécanisme de marché spontané.

Le tableau 1.15 synthétise les résultats de cette analyse et hiérarchise les cinq forces selon leur impact sur la chaîne logistique aval.

TABLE 1.15 – Synthèse de l'analyse des cinq forces de Porter

Force analysée	Intensité	Impact stratégique principal
Rivalité concurrentielle	Faible – Modérée	Pas de concurrent direct ; éviction indirecte par le marché informel
Pouvoir des fournisseurs (transporteurs tiers)	Élevée	Flotte DZ Link propre (80/120) insuffisante pour les pics ; 40 unités externalisées sous pression du marché informel
Pouvoir des clients (Stellantis)	Modérée	Pression croissante avec la montée en cadence industrielle
Menace des substituts	Faible	Pas de substitut immédiat – justifie la recherche d'alternatives multimodales à moyen terme
Menace des nouveaux entrants	Faible	Barrières élevées ; reconstitution du parc lente et non spontanée



Échelle : 1 = Très faible 2 = Faible 3 = Modérée 4 = Élevée 5 = Très élevée

FIGURE 1.9 – Modèle de Porter – Intensité des cinq forces concurrentielles sur le marché du transport de véhicules en Algérie

Il ressort de cette analyse que la chaîne logistique aval de Stellantis est soumise à un **déficit capacitaire d'origine mixte**. Si DZ Link dispose d'une flotte propre de 80 porte-voitures, celle-ci reste insuffisante face à la demande actuelle et davantage encore face aux objectifs de montée en cadence. Le pouvoir résiduel des transporteurs indépendants, amplifié par la distorsion tarifaire du marché informel, rend toute solution purement routière structurellement fragile. Toute stratégie d'amélioration doit adresser simultanément le déficit interne de capacité et la dépendance externe aux transporteurs non contractualisés.

L'analyse de Porter a mis en évidence les déterminants concurrentiels propres au marché du transport de véhicules. Afin d'élargir le périmètre d'analyse aux facteurs qui s'exercent de manière exogène, l'analyse PESTEL recense ci-après les dynamiques macro-environnementales susceptibles d'influencer, favorablement ou défavorablement, les opérations logistiques de Stellantis El Djazair.

1.4.2.2 Analyse PESTEL

L'analyse PESTEL identifie les facteurs macro-environnementaux structurant le contexte opérationnel de la chaîne logistique aval. Elle permet de distinguer les contraintes imposées par l'environnement de celles relevant de l'organisation interne, et d'anticiper les évolutions susceptibles d'affecter la performance logistique à moyen terme.

TABLE 1.17 – Analyse PESTEL – Distribution de véhicules finis en Algérie

Dim.	Facteurs favorables (+)	Facteurs défavorables (–)
P	Stratégie d’industrialisation locale (objectif intégration > 30 %); Stellantis seul producteur actif en 2025	Instabilité chronique de la politique d’importation (2017–2025); dispositif des ports secs obligatoires (juin 2025)
E	Demande automobile structurellement forte (179 332 unités en 2024); économies d’échelle possibles avec la montée en cadence	Inflation du coût unitaire de transport (<i>scarcity premium</i>); tarifs informels supérieurs d’un facteur ×2; pression sur les marges de distribution
S	Classe moyenne en croissance; besoin de mobilité élevé; réseau de distribution en extension (63 agents, 65 % du territoire)	Comportements spéculatifs sur le marché de l’occasion; méfiance durable des transporteurs envers les engagements à long terme
T	Intégration SAP NSC en cours; algorithmes VRP/CVRP applicables à l’optimisation des tournées; systèmes TMS de suivi en temps réel	Faible maturité des outils de pilotage logistique; absence de plateforme digitale de sollicitation des transporteurs
E	Optimisation des tournées = réduction de l’empreinte carbone, en cohérence avec la stratégie ESG <i>Dare Forward 2030</i> ; transition multimodale favorable au ferroviaire (bilan carbone réduit)	Interdiction du diesel en vigueur; transition de motorisation des porte-voitures à anticiper
L	–	Interdiction légale pour DZ Link d’importer des porte-voitures directement; impossibilité d’imposer l’exclusivité aux transporteurs; failles exploitées par le secteur informel (véhicules < 3 ans)

L’analyse PESTEL révèle une **asymétrie marquée entre les opportunités de marché** – demande automobile forte et industrialisation croissante – **et des contraintes structurelles exogènes sévères** : instabilité réglementaire, blocages juridiques et distorsions économiques introduites par le marché informel. Ces contraintes ne peuvent être levées par une action opérationnelle interne seule, ce qui impose de rechercher des solutions alternatives dépassant le cadre purement routier.

Les analyses de Porter et PESTEL ont permis de cartographier les pressions concurrentielles et macro-environnementales pesant sur la chaîne logistique aval. Il convient à présent de confronter ces facteurs externes aux capacités internes de Stellantis El Djazaïr et de DZ Link, afin d’identifier les orientations stratégiques prioritaires.

1.4.2.3 Analyse SWOT

L'analyse SWOT synthétise les enseignements des deux analyses précédentes en articulant les facteurs internes – forces et faiblesses propres à Stellantis El Djazaïr et à DZ Link – avec les facteurs externes issus du PESTEL et de l'analyse de Porter. Elle constitue la passerelle entre le diagnostic environnemental et la formulation opérationnelle de la problématique.

Le tableau 1.18 recense les atouts structurels dont dispose la chaîne logistique aval, ainsi que les faiblesses internes qui en limitent la performance opérationnelle. Si Stellantis El Djazaïr bénéficie d'une position de leader incontesté et d'un partenariat logistique dédié avec DZ Link, plusieurs fragilités organisationnelles et capacitaires contraignent significativement sa capacité à absorber la montée en cadence industrielle prévue.

TABLE 1.18 – Analyse SWOT – Forces et faiblesses internes

Forces (S)	Faiblesses (W)
- Leader absolu du marché (71,5 % des parts de marché en 2025) - Capacité industrielle croissante (90 000 véhicules cumulés à mars 2026) - Partenariat dédié avec DZ Link, spécialisé sur le marché local - Flotte propre DZ Link de 80 porte-voitures – socle capacitaire maîtrisé (2/3 du parc national) - Réseau de distribution étendu (63 agents, 65 % du territoire national) - Soutien stratégique et financier du groupe Stellantis (<i>Dare Forward 2030</i>) - Connaissance opérationnelle approfondie du réseau de transporteurs algériens	- Flotte propre insuffisante (80 porte-voitures DZ Link sur 120 au niveau national) – incapacité à couvrir seul les pics de 190–200 missions sur 72h - Dépendance résiduelle aux 40 transporteurs indépendants, non contractualisés et soumis à la pression du marché informel - Blocage juridique : DZ Link ne peut importer directement des porte-voitures - Architecture logistique centralisée – faible résilience aux pics de demande - Taux de remplissage sous-optimal (planification des tournées non optimisée) - Absence de KPIs formalisés et d'outils de pilotage en temps réel - Absence de schéma multimodal structuré (ferroviaire et maritime non exploités)

Ces forces et faiblesses internes ne s'expriment pas dans un vide environnemental : elles interagissent avec un contexte macro-économique et sectoriel qui offre à la fois des leviers d'action concrets et des contraintes exogènes structurantes. Le tableau 1.20 recense les opportunités mobilisables et les menaces pesant sur la chaîne logistique aval, telles qu'identifiées par les analyses PESTEL et de Porter conduites précédemment.

TABLE 1.20 – Analyse SWOT – Opportunités et menaces externes

Opportunités (O)	Menaces (T)
- Montée en cadence industrielle : 90 000 puis 135 000 véh./an à horizon 2028 - Déploiement SAP NSC – intégration possible d'un TMS de gestion des missions - Algorithmes VRP/CVRP applicables à l'optimisation des tournées de livraison - Réseaux logistiques en développement et en plein essor - Cabotage maritime envisageable sur les corridors côtiers (Oran–Alger–Annaba) - Disponibilité foncière permettant l'implantation de centres de distribution nationaux - Dispositif de financement des porte-voitures (crédit-bail adossé aux missions)	- Concurrence tarifaire du secteur informel (> ×2 les tarifs officiels) – structurellement irrattrapable - Irréversibilité de la destruction du parc (reconstitution sur plusieurs années) - Instabilité réglementaire : risque de nouvelles mesures sur l'importation de véhicules - Opportunisme post-contractuel des transporteurs (arbitrage systématique vers l'informel) - Arrivée de nouveaux constructeurs locaux (Hyundai 2026, Chery, DFSK) amplifiant la demande sans accroissement proportionnel du parc - Pression réglementaire sur le diesel : obsolescence accélérée des porte-voitures actuels

La mise en regard systématique de ces quatre dimensions – forces, faiblesses, opportunités et menaces – permet de dégager quatre orientations stratégiques, formalisées dans la matrice SWOT (tableau 1.22). Chaque orientation croise une dimension interne avec une dimension externe afin d'identifier les leviers d'action les plus pertinents : exploiter les forces face aux opportunités (SO), défendre les acquis face aux menaces (ST), convertir les faiblesses en opportunités (WO) et minimiser l'exposition conjointe aux faiblesses et aux menaces (WT).

TABLE 1.22 – Matrice SWOT – Orientations stratégiques

	Opportunités (O)	Menaces (T)
Forces (S)	Stratégie SO – Exploiter Mobiliser la flotte propre de 80 porte-voitures comme socle d'un schéma multimodal ; déployer un TMS couplé au SAP NSC ; s'appuyer sur les réseaux logistiques en plein essor pour structurer une distribution aval plus agile et résiliente.	Stratégie ST – Défendre Réduire la dépendance aux 40 transporteurs indépendants via la montée en puissance du multimodal ; sécuriser le parc existant avant l'arrivée des nouveaux constructeurs (Hyundai 2026, Chery, DFSK).
Faiblesses (W)	Stratégie WO – Améliorer Comblar le déficit capacitaire en exploitant la disponibilité foncière pour implanter des centres de distribution nationaux ; optimiser les tournées (VRP/CVRP) ; intégrer les réseaux logistiques émergents pour réduire la dépendance aux transporteurs non contractualisés.	Stratégie WT – Réduire Limiter l'exposition aux transporteurs non contractualisés en substituant progressivement le routier par des modes alternatifs ; explorer des solutions juridiques compatibles pour accroître la flotte propre de DZ Link.

La confrontation des facteurs internes et externes met en évidence que la chaîne logistique aval de Stellantis El Djazaïr est organisée autour d'un **point de défaillance unique** : le déficit structurel en capacité de transport de véhicules finis. Si DZ Link dispose d'une flotte propre de **80 porte-voitures** – soit les deux tiers du parc national de 120 unités –, cette capacité reste insuffisante face aux 190 à 200 missions requises sur 72 heures, et davantage encore face aux objectifs de montée en cadence vers **135 000 véhicules/an à l'horizon 2028**. Les contraintes juridiques, la distorsion tarifaire introduite par le marché informel et l'impossibilité d'importer directement des porte-voitures rendent toute solution purement routière **structurellement insuffisante**. Ce constat oriente la suite du diagnostic vers la quantification opérationnelle des dysfonctionnements, avant de formuler la problématique de recherche.

1.4.3 Mesure et analyse des dysfonctionnements logistiques

1.4.3.1 Stabilité temporelle de la répartition des livraisons par wilaya

La figure 1.10 présente l'évolution trimestrielle de la part des livraisons de véhicules attribuée à chaque wilaya, sur la période allant de 2024Q2 à 2026Q1. Chaque courbe représente

le pourcentage de livraisons d'une wilaya par rapport au volume total national du trimestre considéré.

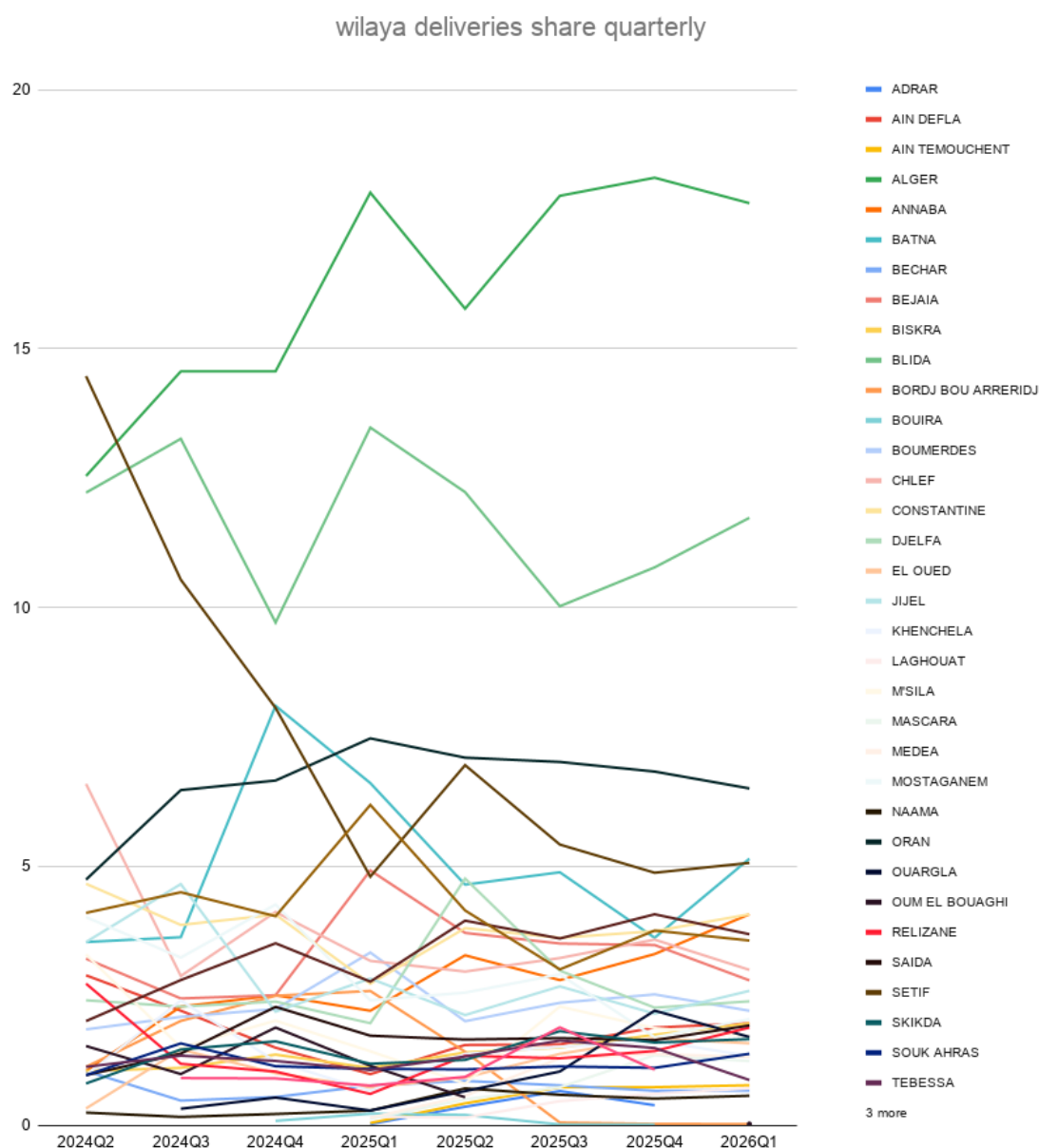


FIGURE 1.10 – Évolution trimestrielle de la part de livraisons par wilaya

Globalement, les courbes mettent en évidence une **forte stabilité des parts relatives** de la plupart des wilayas dans le temps. Malgré quelques fluctuations ponctuelles d'un trimestre à l'autre, les ratios de livraisons restent globalement proches de leurs niveaux initiaux, ce qui suggère une structure de marché relativement figée : les mêmes wilayas conservent, trimestre après trimestre, un poids comparable dans le portefeuille de livraisons. Les perturbations observées demeurent de faible amplitude et ne remettent pas en cause cette stabilité structurelle, si bien que ces parts peuvent être considérées comme des **ratios quasi définitifs** à l'échelle de l'horizon étudié.

À l’opposé, de nombreuses wilayas de l’intérieur et du Sud affichent des parts marginales : Médéa (**0,7 %**), Béchar (**0,7 %**), Tipaza (**1,0 %**), Bordj Bou Arréridj (**1,1 %**) et El Oued (**1,2 %**) demeurent en deçà de **1,5 %** chacune. Cette dispersion de la demande sur le reste du territoire – 23 wilayas se partagent les **53,8 %** restants – génère des tournées à faible densité de chargement, structurellement pénalisantes pour le taux de remplissage des porte-voitures.

Ce déséquilibre territorial met en évidence deux dysfonctionnements logistiques complémentaires. D’une part, la concentration sur l’axe Alger–Blida induit une **saturation des compounds centraux** et une pression capacitaire récurrente sur la flotte affectée à ces zones. D’autre part, la desserte des wilayas périphériques – particulièrement celles de l’Est (Khenchela, Souk Ahras, Tébessa) et du Sud (Béchar, El Oued) – implique des **distances de transport élevées** avec des chargements partiels, dégradant mécaniquement l’efficacité opérationnelle et le coût logistique par véhicule (VIN).

Dans la perspective de la montée en cadence vers **90 000 puis 135 000 véhicules/an**, cette structure de distribution déséquilibrée constitue un facteur aggravant du déficit capacitaire identifié. Sans rééquilibrage des flux – notamment par l’implantation de **centres de distribution régionaux** et l’optimisation des tournées multipoints – la croissance des volumes accentuera mécaniquement les tensions sur les axes surchargés tout en laissant sous-exploitées les capacités disponibles en périphérie.

Afin de mieux appréhender cette disparité territoriale, il convient d’agrégier les livraisons à l’échelle des trois grandes régions géographiques du pays — Centre, Est et Ouest — dont la figure 1.12 présente la répartition.

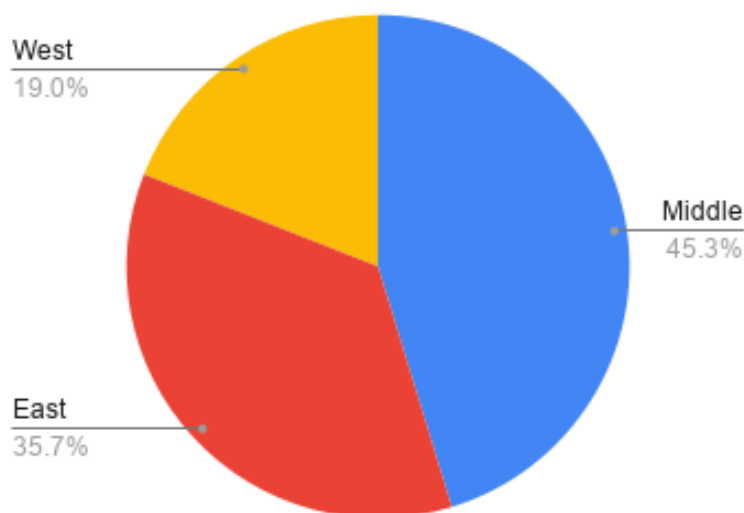


FIGURE 1.12 – Répartition des livraisons au réseau d’agents par région

Cette lecture régionale confirme et amplifie les déséquilibres observés à l’échelle des wilayas. La région **Centre** concentre à elle seule **45,3 %** des livraisons totales, soit près d’un véhicule sur deux distribué au réseau national. Ce chiffre s’explique notamment par le poids structurant d’Alger (**16,5 %**) et de Blida (**11,1 %**), deux wilayas dont la proximité géographique avec les compounds principaux facilite la desserte et concentre mécaniquement les flux.

La région **Est** arrive en deuxième position avec **35,7 %** des livraisons, portée par les wilayas de Sétif (**6,5 %**), Batna (**5,3 %**), Constantine (**3,7 %**) et Annaba (**3,5 %**). Malgré ce volume relatif significatif, la région Est souffre d'une forte dispersion de la demande sur de nombreuses wilayas à faible part individuelle, impliquant des tournées longues à densité de chargement réduite.

La région **Ouest** présente la part la plus faible avec seulement **19,0 %** des livraisons, malgré la présence d'Oran (**6,8 %**) et de Tlemcen (**4,0 %**) comme pôles structurants. Ce sous-dimensionnement relatif de la desserte Ouest est d'autant plus significatif que l'usine de Tafraoui — principal site de production — est précisément implantée dans cette région. Le constat d'un déséquilibre entre le lieu de production et la zone de distribution la moins dense met en lumière une **inefficience structurelle des flux logistiques aval** : les véhicules produits à Oran transitent massivement vers le Centre et l'Est, générant des coûts de transport et des délais de livraison disproportionnés.

Pris ensemble, ces deux graphes dessinent un système de distribution **centrifuge et déséquilibré**, où la logique de concentration historique des agents commerciaux prime sur une logique de rationalisation des flux. Dans la perspective de la montée en cadence vers **90 000 puis 135 000 véhicules/an**, ce schéma territorial constitue un verrou opérationnel majeur : sans rééquilibrage structurel de la distribution — notamment par le déploiement de **centres logistiques régionaux** et l'optimisation des tournées multipoints — la croissance des volumes ne fera qu'exacerber les tensions capacitaires déjà identifiées sur les axes saturés, tout en laissant sous-exploité le potentiel commercial des wilayas périphériques.

1.4.3.2 Classification des wilayas par classe de demande

La figure 1.13 représente sur la carte d'Algérie la classification des wilayas selon leur niveau de demande hebdomadaire en véhicules. Chaque wilaya est représentée par une bulle dont la taille est proportionnelle à la demande moyenne, et dont la couleur indique la **classe de fréquence de remplissage d'un camion porte-voitures** :

- **Bleu (Daily)** : la wilaya génère une demande suffisante pour remplir au moins un camion par jour ;
- **Vert (Weekly)** : la wilaya génère une demande suffisante pour remplir un camion à l'échelle de la semaine ;
- **Rouge (More than week)** : la wilaya ne parvient pas à remplir un camion en une semaine, ce qui traduit une demande insuffisante pour justifier une tournée dédiée.

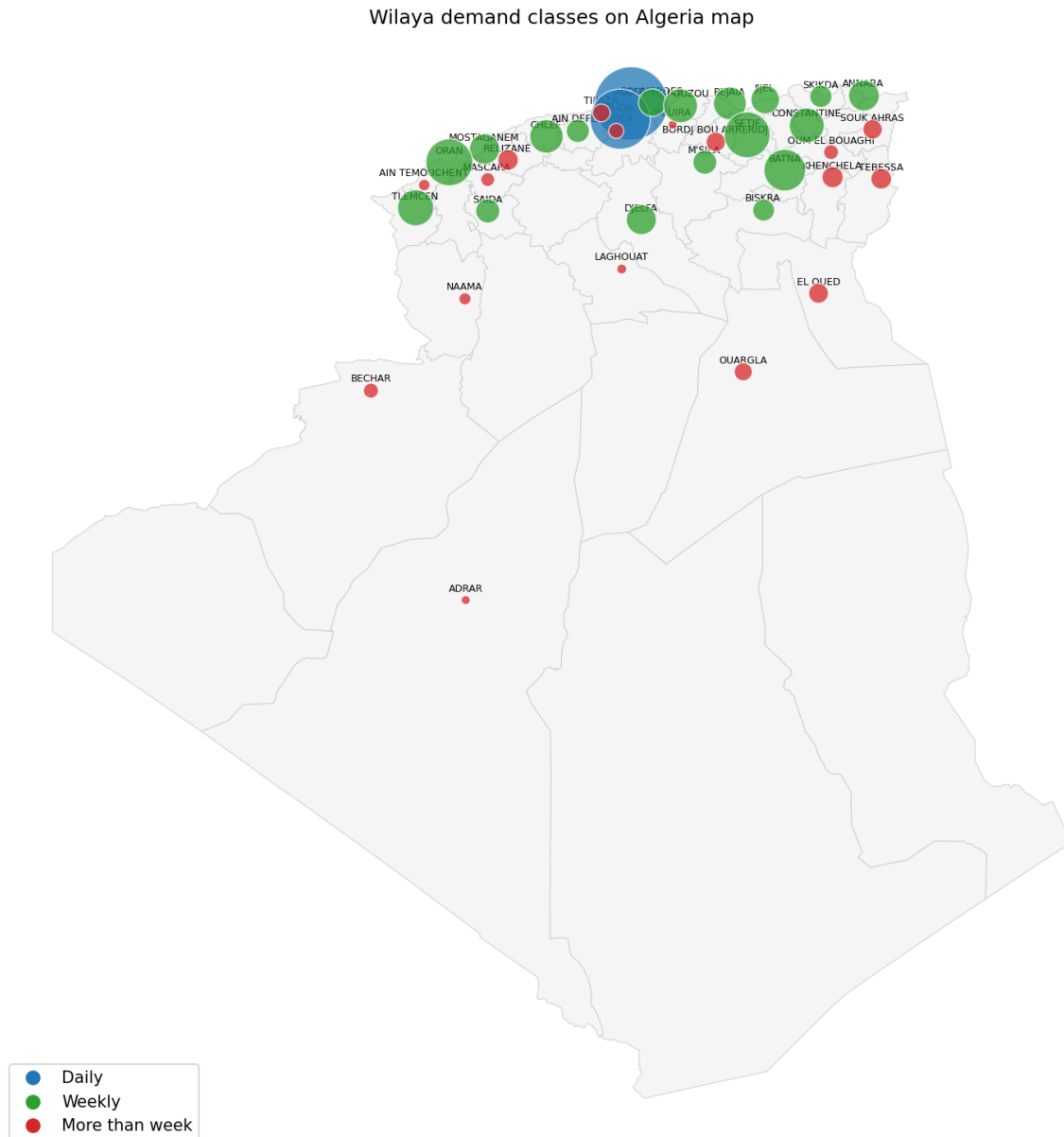


FIGURE 1.13 – Classification des wilayas par classe de demande (Daily / Weekly / More than week)

La carte met clairement en évidence une **forte concentration de la demande dans le nord du pays**, notamment dans le couloir Alger–Blida, où les bulles bleues et vertes de grande taille dominant. Seule la wilaya d’Alger atteint le seuil quotidien, confirmant son rôle de **pôle logistique prioritaire**. Les wilayas de l’intérieur et du sud, représentées en rouge, affichent des volumes trop faibles pour être desservies de manière autonome : des livraisons individuelles vers ces zones s’avèrent peu rentables et génèrent des taux de remplissage des camions très bas.

Ce constat soulève une problématique logistique majeure : comment **mutualiser** les livraisons des wilayas à faible demande (rouge) afin de constituer des chargements complets et réduire les coûts de transport unitaire ? Cette question constitue l’un des axes centraux de la démarche d’optimisation développée dans la suite du rapport.

1.4.3.3 Analyse de Pareto de la demande hebdomadaire par wilaya

La figure 1.14 présente une analyse de Pareto de la demande hebdomadaire moyenne par wilaya. Les colonnes bleues montrent, pour chaque wilaya triée par ordre décroissant, le volume moyen de véhicules demandés par semaine, tandis que la courbe rouge représente le pourcentage cumulé de la demande nationale.

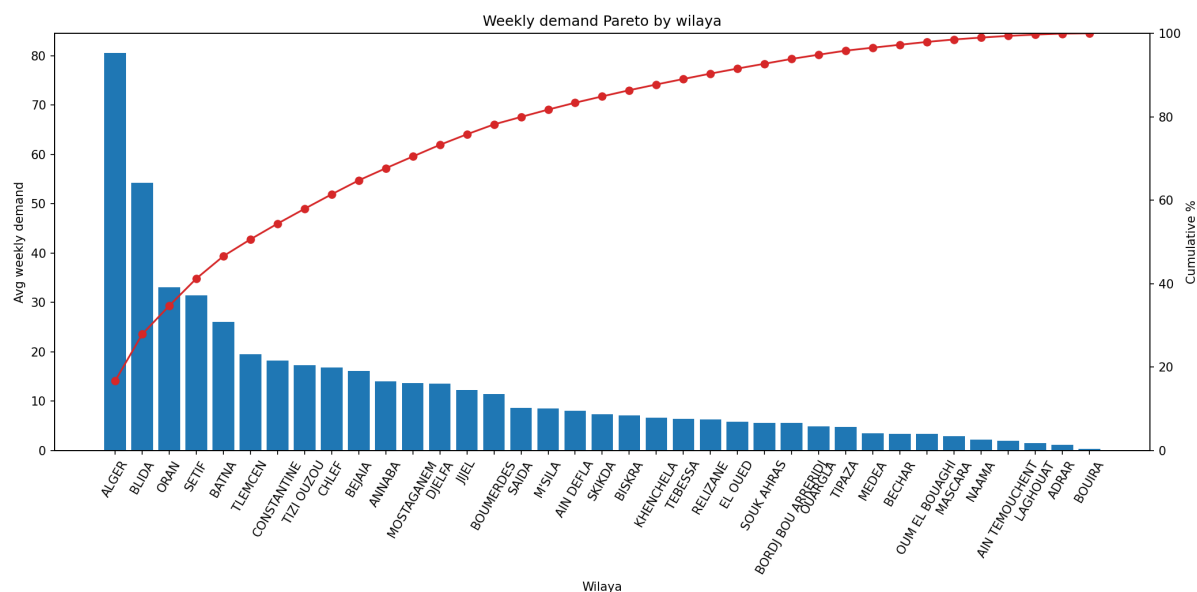


FIGURE 1.14 – Analyse de Pareto de la demande hebdomadaire par wilaya

Ce graphique met en évidence une forte **concentration de la demande** sur un nombre limité de wilayas. Les premières wilayas du classement, dominées par Alger, Blida et Oran, représentent à elles seules une part très importante du volume total livré chaque semaine, tandis qu'un grand nombre de wilayas de queue ne pèsent chacune que quelques véhicules par semaine. On retrouve ainsi une logique de type « 20/80 », où une minorité de wilayas génèrent la majorité du trafic à traiter.

D'un point de vue logistique, cette structure justifie une **différenciation des politiques de distribution** : les wilayas en tête de Pareto doivent bénéficier de schémas de dessertes plus fréquents, de capacités de transport dédiées et de niveaux de service élevés, alors que les wilayas de faible contribution sont davantage candidates à des stratégies de mutualisation (tournées partagées, regroupement de chargements, fréquences de livraison réduites). Ce résultat renforce les constats issus de la cartographie de la demande et constitue un argument clé pour concevoir un réseau hybride combinant hubs majeurs et dessertes secondaires.

1.4.3.4 Analyse statistique des coûts de transport

Le diagnostic des coûts de transport repose sur deux types de flux distincts : les livraisons directes de véhicules depuis l'usine vers les agents (*full truck delivery*) et les livraisons de dépannage ponctuelles déclenchées en urgence pour un agent isolé. Ces deux flux obéissent à une même

logique économique : leur coût unitaire est fortement lié à la distance parcourue et au **taux de remplissage du camion**, qui constitue le principal levier de maîtrise des coûts logistiques.

Prix de livraison d'un véhicule unique en camion complet La figure 1.15 retrace l'évolution chronologique du prix de livraison d'un véhicule unique dans le cadre d'un transport en camion complet (*full truck*). Chaque point de la courbe bleue représente le coût unitaire observé pour une livraison, tandis que la droite de tendance modélise la dynamique générale du prix sur la période étudiée.

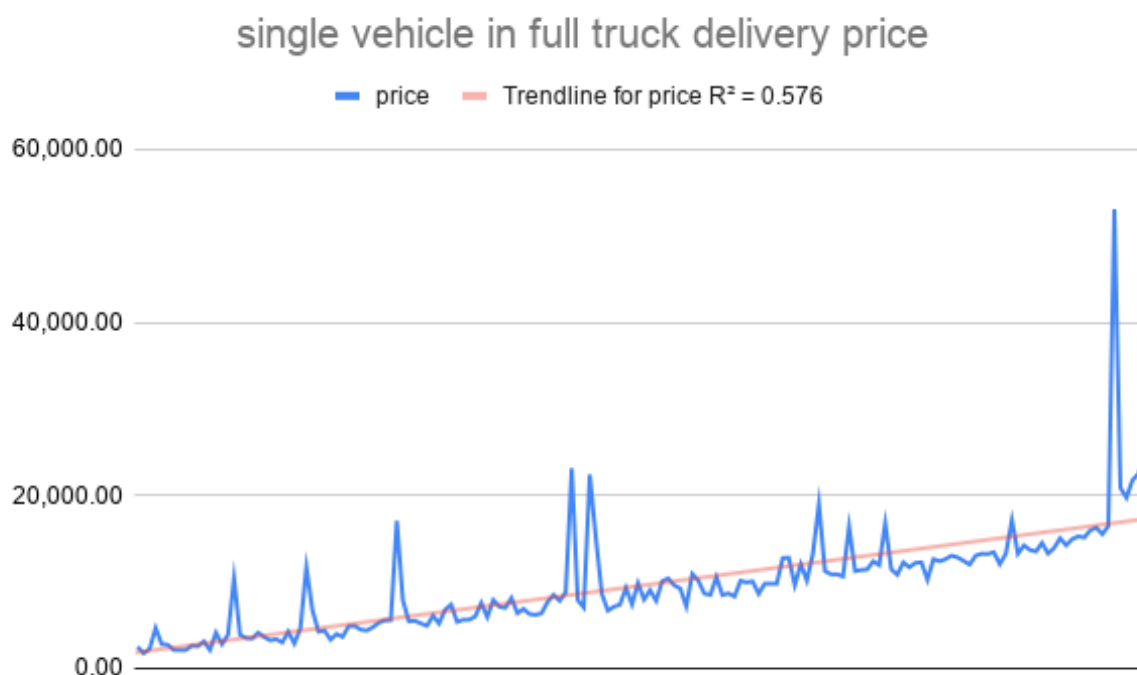


FIGURE 1.15 – Prix de livraison d'un véhicule unique en camion complet – évolution et tendance linéaire

L'ajustement d'un modèle de régression linéaire conduit aux paramètres synthétisés dans le tableau 1.24.

TABLE 1.24 – Paramètres de régression – prix de livraison unitaire en camion complet

Paramètre	Valeur	Interprétation
Pente m	15,98 DA	Augmentation moyenne du prix par livraison (tendance temporelle)
Ordonnée à l'origine b	1 791,12 DA	Niveau de prix de base au début de la période
R^2	0,6125	61,25 % de la variance du prix expliquée par le modèle
Erreur standard de m	0,99	Précision de l'estimation de la pente
F-statistique	262,4	Significativité globale très élevée du modèle
Degrés de liberté	166	Nombre d'observations utilisées pour la régression

Sur le plan statistique, le coefficient de détermination $R^2 \approx 0,61$ indique que plus de 60 % de la variabilité du prix unitaire est expliquée par la tendance linéaire. La F-statistique élevée (262 pour 166 degrés de liberté) confirme que cette relation est significative. La pente $m \approx 16$ traduit une **tendance haussière structurelle** du prix : à mesure que l'on avance dans le temps, le coût unitaire moyen augmente d'environ 16 DA par livraison. L'ordonnée à l'origine $b \approx 1 791$ représente le niveau de prix de base au début de l'horizon étudié. On observe également de nombreux points très au-dessus de la droite de tendance, correspondant à des livraisons isolées vers des wilayas éloignées pour lesquelles un camion complet est mobilisé pour un seul véhicule : l'intégralité du coût de transport est alors supportée par une seule unité, ce qui fait exploser le coût unitaire.

Prix de dépannage en fonction de la distance La figure 1.16 représente le prix des livraisons de dépannage en fonction de la distance parcourue. Chaque point correspond à une intervention de dépannage, et la droite de tendance linéaire met en évidence la relation structurelle entre coût et distance.

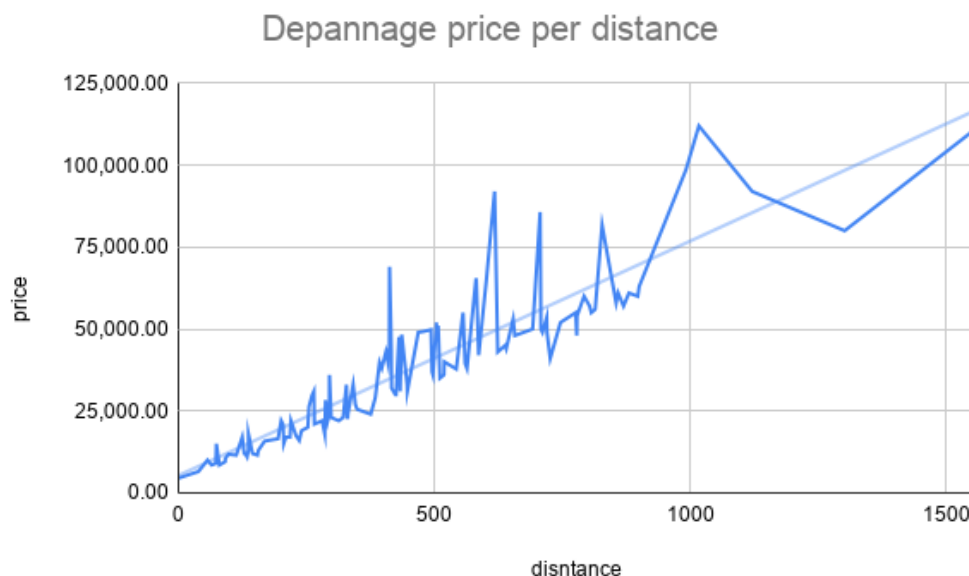


FIGURE 1.16 – Prix de dépannage en fonction de la distance

Les paramètres du modèle de régression linéaire associé sont présentés dans le tableau 1.26.

TABLE 1.26 – Paramètres de régression – prix de dépannage par distance

Paramètre	Valeur	Interprétation
Pente m	71,52 DA/km	Coût marginal par kilomètre parcouru
Ordonnée à l'origine b	5 313,60 DA	Coût fixe de base d'une intervention de dépannage
R^2	0,8209	82,09 % de la variance du prix expliquée par la distance
Erreur standard de m	2,98	Précision de l'estimation de la pente
F-statistique	577,4	Significativité globale très élevée du modèle
Degrés de liberté	126	Nombre d'observations utilisées pour la régression

Avec un coefficient de détermination $R^2 \approx 0,82$, le modèle de dépannage est encore plus robuste : plus de 80 % de la dispersion des prix s'explique directement par la distance parcourue. La F-statistique très élevée (577 pour 126 degrés de liberté) montre que la distance est un déterminant statistiquement **très significatif** du coût de dépannage. La pente $m \approx 71,5$ DA/km traduit un coût variable proportionnel au kilométrage, tandis que l'ordonnée à l'origine $b \approx 5\,314$ DA représente le coût fixe de mobilisation du camion (prise en charge, préparation du véhicule, chargement, manutention, etc.). Concrètement, une intervention à 500 km engendre un coût

théorique d'environ $71,5 \times 500 + 5\,314 \approx 40\,900$ DA, et une intervention à 1 000 km dépasse 76 000 DA pour un seul véhicule.

Synthèse La comparaison de ces deux modèles met en évidence une logique économique commune : les coûts de transport, qu'il s'agisse de livraisons standard ou de dépannages, sont fortement croissants avec la distance et deviennent **prohibitifs lorsque le camion n'est pas mutualisé** sur plusieurs véhicules. Les pics observés sur les deux courbes correspondent systématiquement à des cas où un camion effectue un long trajet pour une quantité très faible. Cette étude statistique fournit ainsi une justification chiffrée à la refonte du schéma directeur de distribution : réduire les distances moyennes et augmenter les taux de remplissage (mise en place de hubs régionaux et de tournées consolidées) apparaît comme une condition nécessaire pour diminuer durablement le coût logistique unitaire.

1.4.3.5 Variabilité hebdomadaire de la demande par wilaya

La figure 1.17 représente, pour chaque wilaya, la demande hebdomadaire moyenne en véhicules (axe des abscisses) et son écart-type, noté σ (axe des ordonnées). Chaque point correspond à une wilaya et traduit donc à la fois le **niveau** de demande et son **degré d'incertitude** dans le temps.

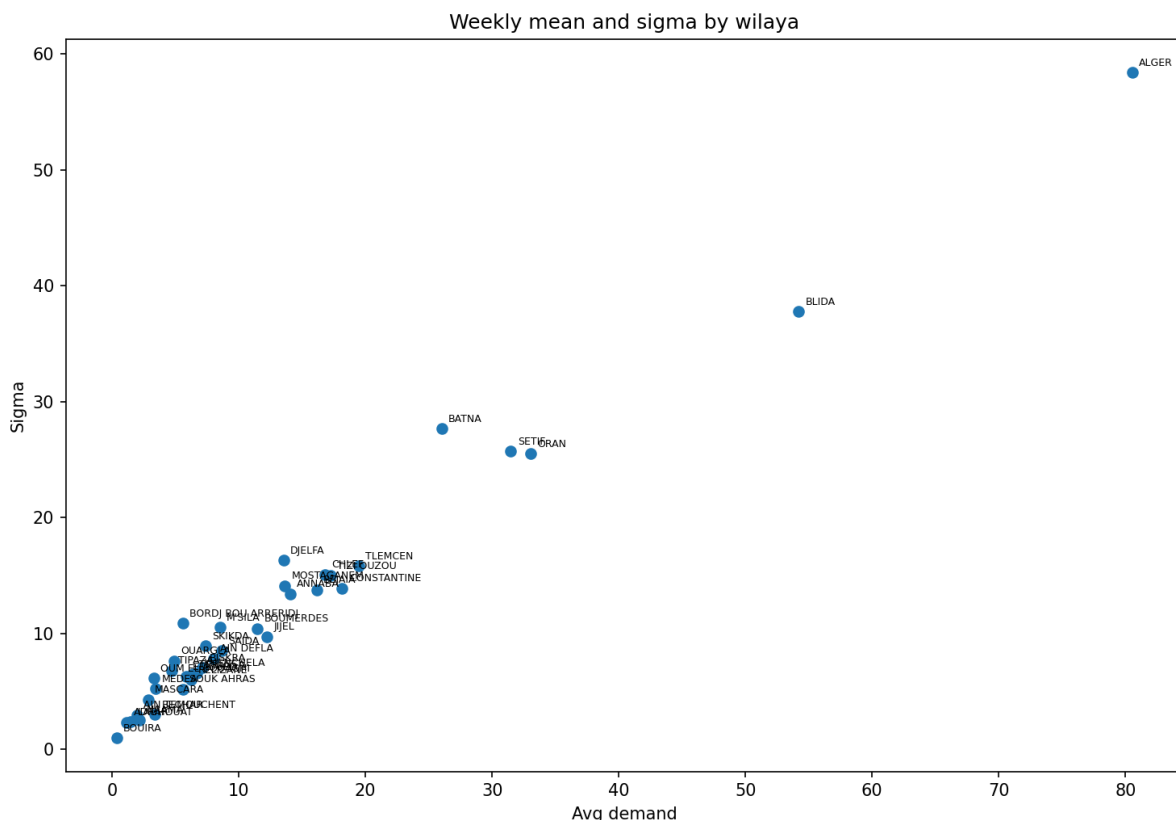


FIGURE 1.17 – Demande hebdomadaire moyenne et variabilité (σ) par wilaya

On observe que certaines wilayas se situent en bas à gauche du nuage de points, avec une demande hebdomadaire moyenne faible et une variabilité limitée. Pour ces zones, la consommation est relativement régulière dans le temps, ce qui facilite la planification des livraisons et permet de fonctionner avec des niveaux de stock réduits. À l'inverse, les wilayas positionnées plus à droite et surtout plus en hauteur présentent des demandes plus importantes mais beaucoup plus fluctuantes d'une semaine à l'autre.

Le cas de la wilaya d'Alger est particulièrement révélateur : avec une demande hebdomadaire moyenne d'environ 80 véhicules et un écart-type proche de 60, la demande réelle peut, certaines semaines, se situer autour de 20 véhicules, alors que d'autres semaines elle peut atteindre jusqu'à 140 véhicules. Cette **forte variabilité** implique un dimensionnement plus robuste des stocks de sécurité et des capacités de transport pour être capable d'absorber les pics sans dégrader le niveau de service. De manière générale, ce graphe met en évidence que la conception du schéma directeur de distribution ne peut pas se baser uniquement sur les moyennes historiques : il est nécessaire d'intégrer explicitement l'incertitude de la demande à travers la mesure de σ pour chaque wilaya. Par ailleurs, la disposition des points suggère une relation globalement linéaire entre la demande moyenne et son écart-type : plus une wilaya consomme de véhicules en moyenne, plus sa demande hebdomadaire est sujette à des fluctuations importantes. Autrement dit, le niveau de variabilité croît avec le volume de demande. Ce résultat confirme que les wilayas les plus stratégiques en termes de volume (comme Alger ou Blida) sont également celles qui concentrent le plus d'incertitude, ce qui renforce la nécessité d'une politique de stocks de sécurité et de capacité de transport dimensionnée spécifiquement pour ces zones.

1.4.3.6 Analyse de l'utilisation de la flotte de porte-voitures

Au-delà de la répartition géographique des livraisons, l'analyse de l'utilisation effective de la flotte de porte-voitures constitue un révélateur direct de l'efficacité opérationnelle du système de distribution. La figure 1.18 présente la répartition des missions de dépannage selon le nombre de véhicules transportés par trajet.

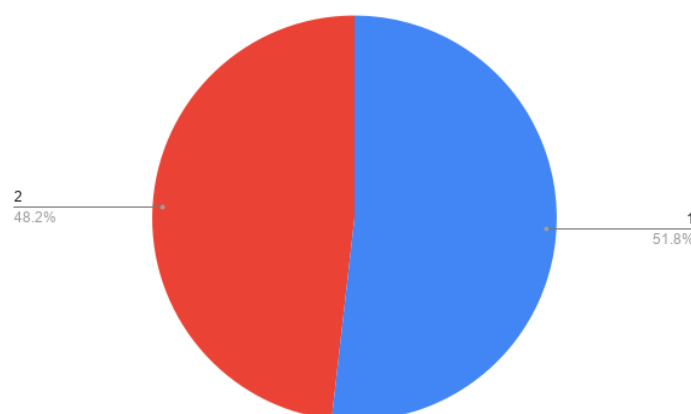


FIGURE 1.18 – Répartition des missions de dépannage selon la capacité de chargement (1 ou 2 véhicules par trajet)

Les résultats révèlent une répartition quasi équilibrée entre les missions à chargement partiel et celles à double chargement : **51,8 %** des trajets de dépannage sont effectués pour un seul véhicule (catégorie 1), contre **48,2 %** pour deux véhicules (catégorie 2). Ce constat est particulièrement préoccupant : un porte-voitures mobilisé pour transporter un seul véhicule représente un **sous-emploi capacitaire direct**, le coût fixe du trajet étant intégralement absorbé par un seul VIN. Dans un contexte où le parc propre de DZ Link est limité à **80 porte-voitures**, chaque mission à chargement unitaire constitue une ressource gaspillée qui aurait pu être allouée à une tournée multi-points plus dense.

Cette inefficience de chargement prend une dimension encore plus critique lorsqu'on l'analyse conjointement avec le volume quotidien de missions déployées, illustré par la figure 1.19.

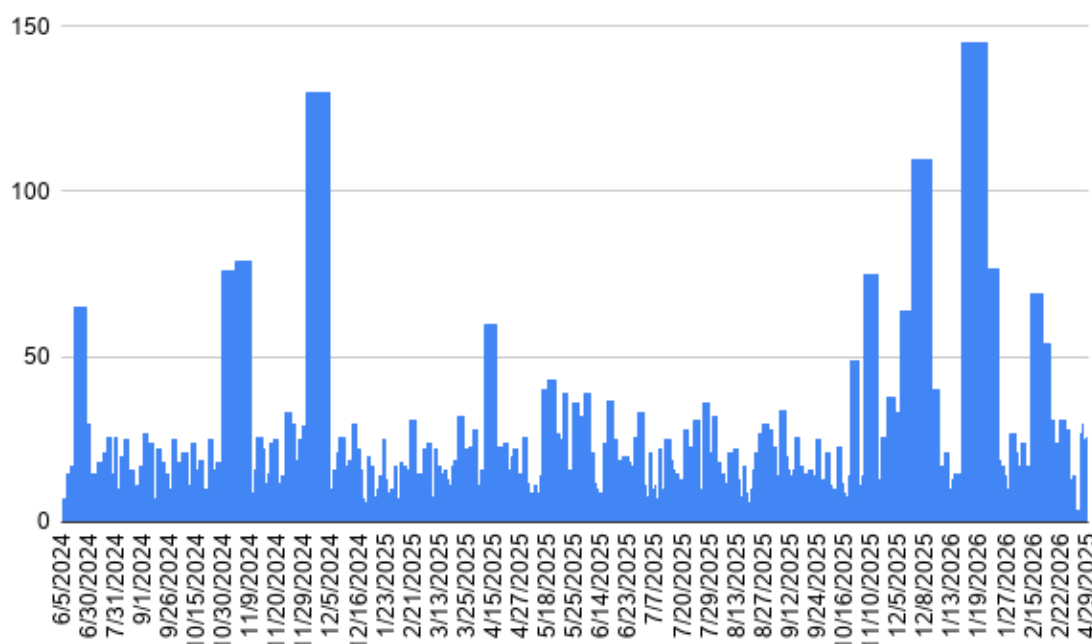


FIGURE 1.19 – Évolution journalière du nombre de missions de dépannage (juin 2024 – avril 2025)

L'évolution journalière des missions de dépannage sur la période **juin 2024 – avril 2025** met en évidence une dynamique opérationnelle fortement irrégulière. La majorité des journées affiche un volume modéré de missions, oscillant entre 10 et 40 interventions par jour. Cependant, plusieurs **pics d'activité exceptionnels** ressortent de manière frappante : certaines journées enregistrent jusqu'à **130 à 145 missions**, soit un volume largement supérieur à la capacité physique du parc propre de DZ Link, qui ne compte que **80 porte-voitures**.

Ce paradoxe apparent s'explique par le recours à des **rotations multiples** : lors des pics, les mêmes porte-voitures effectuent plusieurs allers-retours dans la même journée, ce qui induit une **usure accélérée du parc**, une **surcharge des conducteurs** et une **dégradation du temps de cycle** global. Par ailleurs, ces pics coïncident avec les périodes de forte sortie de production à l'usine de Tafraoui, confirmant que le système de distribution aval n'est pas dimensionné pour absorber les variations de cadence industrielle de manière fluide.

La combinaison d'un taux élevé de chargement unitaire (**51,8 %** des missions à un seul véhicule) et de pics de mobilisation dépassant la capacité nominale du parc traduit une **double inefficience structurelle** : sous-utilisation qualitative de la flotte en période normale, et sur-sollicitation physique en période de pic. Ce dysfonctionnement constitue l'un des leviers d'optimisation les plus directs identifiés dans le cadre du présent diagnostic, notamment par le biais de la **planification des tournées** et de l'**optimisation du chargement par véhicule**.

1.4.3.7 Taux de remplissage de la flotte et missions de dépannage

Un premier indicateur de l'efficacité opérationnelle de la flotte est la proportion des missions de dépannage dans l'ensemble des trajets effectués par DZ Link. La figure 1.20 illustre cette répartition.

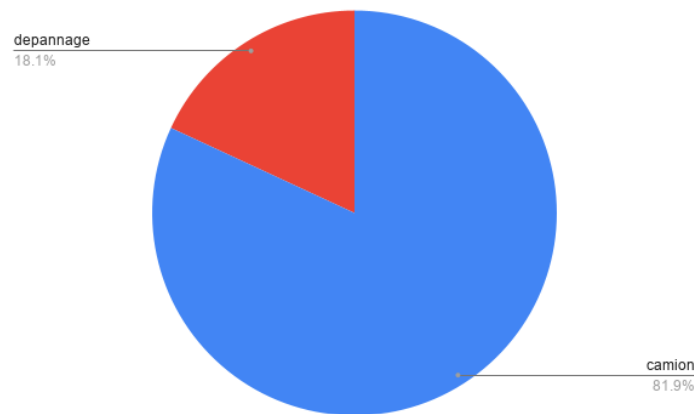


FIGURE 1.20 – Répartition des missions de dépannage vs tournées normales — DZ Link 2024-2025

Les données révèlent que **18,1 %** des missions mobilisées par DZ Link constituent des interventions de **dépannage**, c'est-à-dire des trajets non planifiés déclenchés en réponse à des besoins urgents ou à des ruptures de la tournée initiale. Bien que les tournées normales représentent la part dominante (**81,9 %**), cette proportion de missions non programmées traduit une **fragilité de la planification logistique aval** : chaque dépannage mobilise un porte-voitures en dehors du schéma de tournée optimisé, réduisant d'autant la disponibilité de la flotte pour les livraisons planifiées et dégradant le taux de service global.

Au-delà de la nature des missions, c'est le **taux de remplissage** des porte-voitures — mesuré à l'échelle de chaque wilaya — qui permet de quantifier précisément l'efficacité d'utilisation de la flotte. La figure 1.21 présente cet indicateur pour l'ensemble des wilayas desservies, calculé selon la formule suivante :

$$\text{Fill Rate}_w = \begin{cases} 1 & \text{si } n_w > 7 \\ \frac{n_w}{7} & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.1)$$

où n_w désigne le nombre moyen de véhicules transportés par porte-voitures à destination de la wilaya w , et 7 représente la capacité nominale d'un porte-voitures standard.

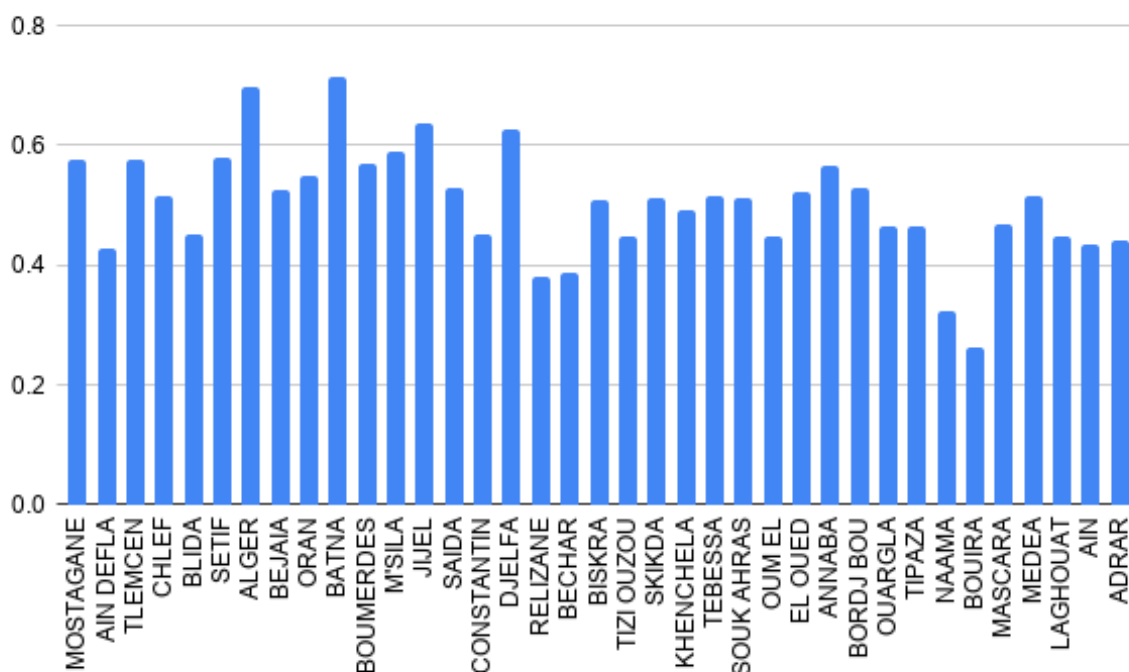


FIGURE 1.21 – Fill rate moyen par wilaya — DZ Link 2024-2025 (capacité nominale : 7 véhicules/camion)

L'analyse du taux de remplissage par wilaya révèle une **hétérogénéité marquée** des performances selon les destinations. Les wilayas de M'Sila et Boumerdes affichent les meilleurs taux, bénéficiant d'une demande locale plus régulière permettant une meilleure consolidation des chargements. À l'opposé, plusieurs wilayas de l'intérieur et du Sud — notamment Bouira, Béchchar et Médéa — présentent des taux nettement en deçà du seuil de rentabilité opérationnelle, signifiant que les porte-voitures qui les desservent circulent en moyenne avec **moins de la moitié de leur capacité**.

De manière globale, la majorité des wilayas se situe dans une fourchette comprise entre **40 %** et **60 %**, soit un potentiel d'optimisation considérable sur la capacité nominale de chaque porte-voitures. Ce sous-emploi structurel de la flotte, combiné à la proportion de missions de dépannage (**18,1 %**) et aux rotations multiples observées lors des pics de production, constitue l'un des dysfonctionnements les plus coûteux identifiés dans le cadre de ce diagnostic. Il justifie pleinement une démarche d'optimisation des tournées par **regroupement géographique des livraisons** et consolidation des chargements, dont les leviers seront développés dans le chapitre suivant.

1.4.3.8 Taux de remplissage des camions porte-voitures

La figure 1.22 présente la répartition des taux de remplissage observés sur les camions porte-voitures utilisés pour la distribution des véhicules. Chaque secteur du camembert correspond à un nombre de véhicules chargés par camion (3, 4, 5, 6, 7 ou 8 véhicules).

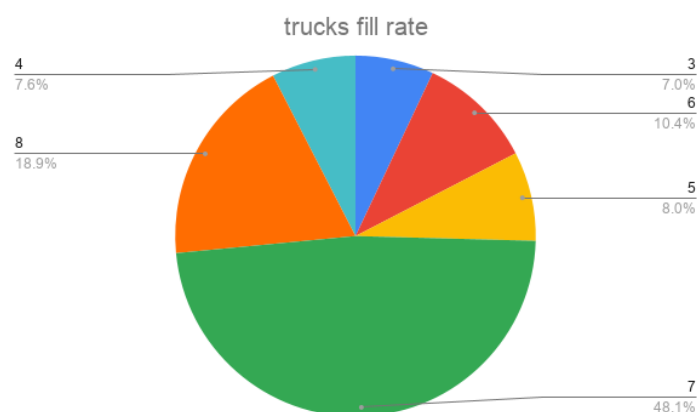


FIGURE 1.22 – Répartition du taux de remplissage des camions porte-voitures

On observe que près de la moitié des trajets sont effectués avec des camions chargés à 7 véhicules (environ 48 %), et qu'environ 19 % des trajets utilisent pleinement la capacité de 8 véhicules. Ces situations correspondent à un **taux de remplissage satisfaisant**, où le coût de transport est réparti sur un nombre élevé de véhicules, ce qui limite le coût unitaire par véhicule transporté.

En revanche, plus de 30 % des trajets présentent un chargement insuffisant, avec seulement 3, 4, 5 ou 6 véhicules par camion. Ces quatre tranches constituent le véritable **point faible** du schéma actuel : le camion circule alors entre 37,5 % et 75 % de sa capacité théorique (8 véhicules), ce qui renchérit fortement le coût de transport par véhicule. Chaque trajet sous-rempli se traduit mécaniquement par une perte d'efficacité économique : le carburant, le temps de conduite, les péages et la mobilisation du matériel sont quasiment les mêmes, mais répartis sur un nombre plus faible de véhicules. Ce diagnostic rejoint les résultats de l'analyse des coûts unitaires : l'enjeu majeur n'est pas seulement de réduire les distances parcourues, mais aussi d'**augmenter systématiquement le taux de remplissage des camions** en regroupant les flux (mutualisation inter-wilayas, tournées consolidées, hubs régionaux).

1.4.4 Synthèse des écarts constatés

L'analyse croisée du diagnostic stratégique (Porter, PESTEL, SWOT) et des mesures opérationnelles effectuées sur les données réelles de livraison fait ressortir cinq écarts structurels : quatre d'ordre opérationnel, révélés par les indicateurs quantitatifs, et un d'ordre stratégique, lié à l'incapacité de la chaîne logistique actuelle à absorber la montée en cadence industrielle prévue.

- Écart 1. Insuffisance capacitaire de la flotte.** La flotte propre de DZ Link (80 porte-voitures) couvre environ 40 % des 190 à 200 missions requises sur 72 heures en période de pic. Les 40 unités externalisées complètent le parc mais restent soumises à la concurrence du marché informel, rendant la couverture des pics structurellement aléatoire et non contractualisée.
- Écart 2. Architecture de distribution centralisée inadaptée.** L'intégralité des flux transite par un point d'expédition unique (Taфраoui, wilaya d'Oran). Cette configuration impose des distances moyennes élevées vers les wilayas de l'Est et du Centre algérien, générant un surcoût unitaire structurel sur plus de 60 % des destinations nationales et une exposition maximale aux aléas de capacité en un seul nœud.
- Écart 3. Sous-utilisation de la capacité de chargement.** Plus de 30 % des missions enregistrent un taux de remplissage inférieur à 75 % de la capacité nominale (moins de 6 véhicules sur 8). Ce déficit de consolidation se traduit par une hausse du coût unitaire de transport sur un tiers des livraisons, pénalisant directement la marge logistique de l'opération.
- Écart 4. Absence d'outils de pilotage et d'optimisation des tournées.** L'absence de TMS opérationnel, de KPIs formalisés et d'algorithmes d'optimisation des tournées prive le service LOQ de tout levier d'action sur la planification en temps réel des missions de livraison. La planification reste manuelle et réactive, sans optimisation systématique des regroupements ou des séquences.
- Écart 5. Incapacité d'absorption de la montée en cadence.** La capacité logistique actuelle (~78 véhicules livrés par jour en moyenne) n'est pas dimensionnée pour absorber le doublement de production attendu : 90 000 puis 135 000 véhicules/an à l'horizon 2028, soit un facteur multiplicatif supérieur à 1,5 par rapport au volume moyen de la période observée.

Le tableau 1.28 synthétise ces cinq écarts, leur mesure quantitative et le levier de résolution associé.

TABLE 1.28 – Synthèse des écarts structurels de la chaîne logistique aval

Écart constaté	Mesure quantitative
Insuffisance de la flotte	40 % des pics non couverts par la flotte propre
Architecture centralisée	Distance moy. usine-wilaya : ≈ 540 km ; surcoût sur 60 % des destinations
Sous-utilisation des camions	> 30 % des missions < 75 % de taux de remplissage
Absence de pilotage	Planification 100 % manuelle, aucun KPI formalisé
Montée en cadence	Facteur $\times 1,5$ à l'horizon 2028 (135 000 véh./an)

Ces cinq écarts forment un **système de défaillances interdépendantes**, illustré par les effets de causalité circulaire suivants :

- L'**architecture centralisée** impose de longues distances et des délais importants, qui poussent à saturer les camions disponibles *indépendamment de la demande réelle*, aggravant le déficit de taux de remplissage ;
- Le **déficit capacitaire de la flotte**, couplé à l'absence de contrats-cadres avec les sous-traitants, rend impossible toute consolidation planifiée en période de pic, ce qui élève encore les coûts unitaires ;
- L'**absence d'outils de pilotage** empêche de détecter ces dérives en temps réel et d'activer des leviers correctifs (regroupement de wilayas, report de missions, affrètement ciblé) ;
- Enfin, la **montée en cadence** prévue amplifiera mécaniquement chacun de ces écarts : un réseau déjà sous tension à 78 véhicules/jour sera incapable d'absorber 180 à 370 véhicules/jour sans refonte structurelle.

Il ressort de ce diagnostic que les correctifs ponctuels (achat de camions supplémentaires, optimisation partielle des tournées) ne suffisent pas : c'est le **schéma de distribution lui-même** qui doit être repensé. La question n'est plus « comment mieux gérer la chaîne existante ? », mais « quelle architecture de réseau permettrait de répondre aux exigences de volume, de coût et de service à l'horizon 2028 ? »

1.5 Problématique

Contexte et enjeux

Le diagnostic stratégique et l'analyse quantitative des flux convergent vers un même constat : la distribution aval de Stellantis El Djazaïr repose sur un schéma **centralisé** depuis Oran, structurellement **sous-capacitaire**, générateur de **longues distances**, de **faibles taux de remplissage** et dépourvu d'**outils de pilotage** – autant de fragilités aggravées par la **montée en cadence** vers 135 000 véhicules par an. Ce système atteint ses limites et appelle une refonte de son architecture.

Les enjeux sont à la fois **économiques** (réduction du coût logistique unitaire, amélioration de la marge), **opérationnels** (fiabilité des délais, absorption des pics de production) et **environnementaux** (réduction de l'empreinte carbone des transports, objectif de neutralité Stellantis 2038). La pression réglementaire liée à l'import-substitution – Stellantis El Djazaïr est tenue d'assurer une distribution à l'échelle nationale depuis son site de Taфраoui – ajoute une contrainte géographique non négociable : le réseau doit desservir les 48 wilayas, y compris les plus éloignées du Sud et de l'Est.

Question centrale

Le présent travail formule ainsi la problématique centrale :

Comment reconfigurer la chaîne logistique aval de distribution des véhicules de Stellantis El Djazair afin de réduire les distances et les coûts, de fiabiliser le service et d'absorber la montée en cadence vers 135 000 véhicules/an, tout en maîtrisant l'empreinte carbone ?

Sous-questions et articulation méthodologique

Cette question centrale se décline en trois sous-questions de recherche, chacune associée à une méthode quantitative précise :

SQ1 – Où et en quel nombre ouvrir des buffers ? La distribution d'un territoire de 2,38 millions de km² avec une demande fortement concentrée sur le littoral nord impose de choisir à la fois le *nombre* et la *localisation* optimale de centres de regroupement intermédiaires. Trop peu de buffers maintient des distances longues et des coûts de transport élevés ; trop nombreux, ils multiplient les coûts fixes de stockage. La réponse est apportée par le **modèle p-médian** – un programme linéaire en nombres entiers résolu par le solveur CBC – qui minimise la somme des distances pondérées par les flux, pour chaque scénario $p \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$.

SQ2 – Comment dimensionner les ressources et organiser le dernier kilomètre ? Une fois la localisation des buffers déterminée, trois décisions de dimensionnement se posent en cascade : (a) quelle *flotte* allouer à chaque corridor usine-buffer ? (b) quelle *capacité de stockage* réserver dans chaque buffer pour absorber la variabilité de la demande ? (c) quels *canaux de livraison finale* (retrait client ou dépannage) proposer, et pour quelles wilayas ? Ces trois questions sont traitées respectivement par l'**heuristique bin packing** ($M_b = \lceil q_b/C \rceil$), le **modèle newsvendor au quantile P90** et un **double limiteur déterministe** (seuil de prix et seuil de temps de trajet $\leq 4h$).

SQ3 – Quelle configuration retenir et à quel coût ? La comparaison des scénarios exige une *métrique unifiée* intégrant les trois postes de coût (transport, entreposage, immobilisation du capital), les émissions de CO₂ (méthode VECTO) et le niveau de service client. Le **coût total logistique** (CTL) et une analyse de coude (*elbow*) sur la courbe CTL $f(p)$ permettent d'identifier le scénario dominant et de valider sa robustesse par analyse de sensibilité.

Le chapitre suivant établit le **cadre théorique et méthodologique** mobilisé pour répondre à ces trois sous-questions, avant que le chapitre de solution n'en livre les réponses quantifiées sur les données réelles de Stellantis El Djazair.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Introduction

La reconfiguration de la chaîne logistique aval proposée dans ce mémoire mobilise un ensemble de **méthodes quantitatives et d'outils académiques** issus de la recherche opérationnelle, de la science des données géospatiales, de l'économie du transport et de la logistique durable. Ce chapitre dresse l'état de l'art de ces fondements théoriques, dans l'ordre où ils sont mobilisés dans la démarche de solution. Il s'ouvre sur le cadre fédérateur de la **conception du réseau de distribution** (*Distribution Network Design*, section 2.2), discipline du *Supply Chain Management* dont relève l'ensemble du projet, puis détaille : la **localisation des buffers** par un modèle d'optimisation (section 2.3), le **calcul des itinéraires** et le traitement des données spatiales (section 2.4), la **consolidation des chargements** (section 2.5), la **logistique du dernier kilomètre** et la modélisation du choix de service (section 2.6), le **dimensionnement des stocks** (section 2.7), l'**évaluation de l'empreinte carbone** (section 2.8), l'**analyse des coûts** (section 2.9) et les **méthodes d'analyse stratégique** mobilisées dans le diagnostic (section 2.10). La section 2.11 recense les outils logiciels employés, et la section 2.12 positionne notre travail au regard de la littérature. La figure 2.1 récapitule la démarche de ce chapitre.

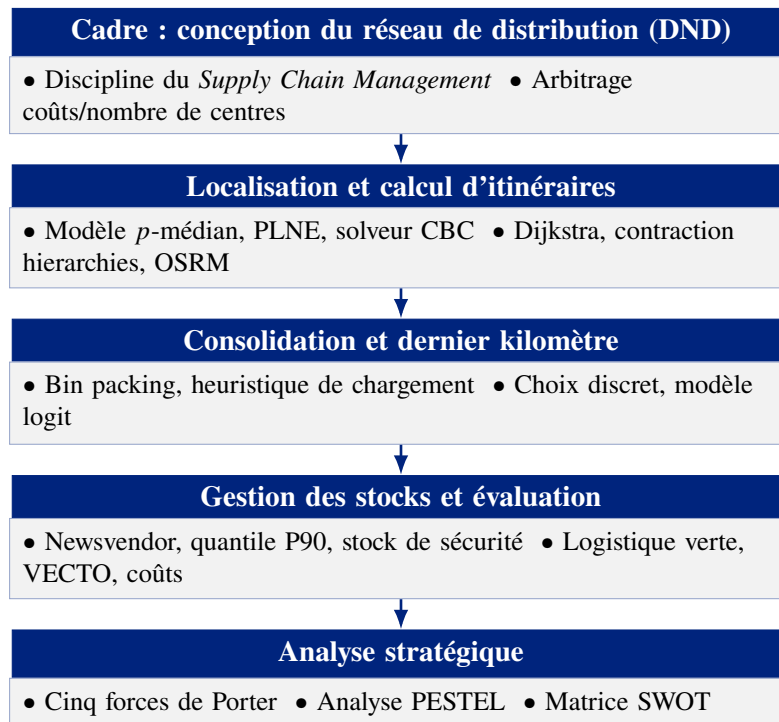


FIGURE 2.1 – Schéma directif du chapitre – État de l'art

2.2 Conception du réseau de distribution

2.2.1 Le *Distribution Network Design* comme cadre

La **conception du réseau de distribution** (*Distribution Network Design*, DND) est une décision de nature **stratégique** : elle engage l'entreprise sur un horizon pluriannuel et détermine la structure physique au sein de laquelle toutes les décisions tactiques et opérationnelles s'inscriront [56]. Chopra et Meindl [56] distinguent quatre configurations canoniques de réseau :

1. *Direct shipping* : l'usine livre directement chaque client – délais courts mais coût de transport unitaire élevé ;
2. *Via centre de distribution* (DC) : mutualisation des flux sur un hub intermédiaire, adapté aux longues distances ;
3. *Cross-docking* : transfert immédiat sans stockage, performant lorsque la demande est prévisible et agrégée ;
4. *Entrepôt local* : buffer de proximité qui découple l'approvisionnement de la livraison finale.

Pour Stellantis El Djazaïr, qui distribue environ **135 000 véhicules par an** vers les agents agréés répartis dans **48 wilayas**, la contrainte réglementaire imposant le passage par l'usine de Tafraoui et l'étendue du territoire (2,38 millions de km²) orientent vers l'introduction de **buffers régionaux** jouant le rôle de DC de proximité. La tension fondamentale est l'arbitrage entre **réactivité** (délais courts, requérant de nombreux buffers proches) et **coût** (immobilisation foncière et stock, minimisé par peu de sites). Le présent travail s'inscrit dans une discipline du *Supply Chain Management* (SCM) appelée **conception du réseau de distribution** (*Distribution Network Design*, DND). Elle consiste à **élaborer ou restructurer** un réseau de distribution afin d'en réduire la complexité et les coûts logistiques, tout en maintenant le niveau de service requis [2, 3]. Concrètement, le DND répond à deux décisions couplées : **où localiser** les infrastructures (usines, entrepôts, centres de distribution), en quel nombre, et **comment affecter** les points de demande à ces infrastructures [4]. C'est exactement l'objet de notre étude : concevoir un réseau de *buffers* intermédiaires entre l'usine de Tafraoui et les agents agréés répartis sur le territoire algérien. La taxinomie de Chopra et Meindl [56] révèle que le choix de la configuration de réseau n'est pas neutre : chaque niveau d'intermédiation modifie simultanément le **coût unitaire de transport** (décroissant avec la mutualisation), le **niveau de stock agrégé** (croissant avec le nombre de nœuds, par perte de la *risk pooling*) et le **délai de mise à disposition** (raccourci lorsque le stock est proche du client). Dans notre cas, l'introduction de buffers régionaux réduit la distance buffer-agent (dernier kilomètre) tout en créant un nouveau tronçon usine-buffer – la conception du réseau optimisera ce compromis par le modèle *p*-médian (§2.3).

La figure 2.2 positionne le DND dans la hiérarchie des décisions de la chaîne logistique [1].

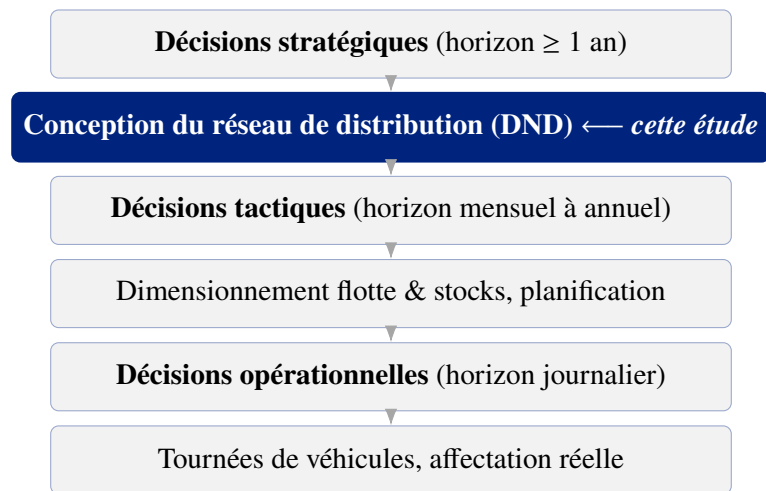


FIGURE 2.2 – Hiérarchie des décisions logistiques et positionnement du DND

Source : d'après [1].

2.2.2 Enjeux et apports

L'évaluation quantitative des enjeux du DND repose sur la décomposition des coûts logistiques en deux familles antagonistes [3, 2] :

- **Coûts de transport** : proportionnels à la distance buffers-demande et au nombre de missions, ils *décroissent* lorsque l'on ouvre davantage de buffers (ceux-ci se rapprochent de la demande) ;
- **Coûts d'infrastructure et de stock** : loyers fonciers, frais d'exploitation et immobilisation du capital en véhicules en attente, ils *croissent* avec le nombre de buffers (multiplication des sites).

Ballou [3] montre que la courbe de coût total en fonction du nombre d'entrepôts présente un **minimum** (*point optimal*) entre ces deux forces opposées – c'est le *elbow* que notre analyse de scénarios ($p = 2$ à 6) cherche à identifier. Un troisième axe s'y superpose : le **niveau de service client**, mesuré par le délai moyen de livraison et le taux de disponibilité.

Plusieurs facteurs poussent les entreprises à recourir au DND : la **pression sur les coûts** logistiques, la **globalisation** des marchés (proximité avec une demande émergente), la **volatilité** des prix et la nécessité d'une chaîne **résiliente** [2]. En contrepartie, une refonte du réseau permet de réduire les coûts de transport et de stockage, d'améliorer la disponibilité du produit et de raccourcir les délais (*lead time*), tout en simplifiant la gestion. La conception du réseau s'appuie ainsi sur un arbitrage entre deux familles de facteurs [2] : les **coûts** affectés par la structure (transport, stockage, entreposage, information) et les **éléments de service client** (temps de réponse, disponibilité, visibilité, logistique inverse). À titre d'illustration qualitative pour notre contexte, deux buffers (Oran et Alger) couvrent la façade nord du pays avec une distance moyenne wilaya-buffer d'environ **250 km** ; l'ouverture de six buffers ramène cette distance à environ **120 km**, soit une réduction du coût de transport de l'ordre de 50 %. En contrepartie, le

coût fixe d'infrastructure est **multiplié par trois**. C'est cet arbitrage chiffré que les scénarios du chapitre 3 viennent trancher.

2.2.3 L'arbitrage fondamental : le nombre de centres

D'un point de vue géographique, le territoire algérien pose des contraintes spécifiques : avec **2,38 millions de km²** et une population fortement concentrée sur la bande côtière nord (Alger, Oran, Annaba, Constantine), la demande en véhicules est très asymétrique. Les hauts plateaux et le Sud, peu peuplés, génèrent un flux marginal ne justifiant pas de buffer dédié. Cela suggère un nombre optimal de buffers **compris entre 3 et 5**, positionnés sur les grands axes logistiques (Autoroute Est-Ouest, liaison Alger-Constantine). La figure 2.3 illustre conceptuellement cette courbe en U : l'abscisse représente le nombre de buffers p , l'ordonnée le coût total logistique CTL, et le minimum s'obtient pour $p^* \in [3, 5]$.

La décision centrale du DND est le **nombre de centres de distribution** à ouvrir. Or les postes de coûts évoluent en sens *opposés* avec ce nombre : le **coût de transport** décroît (les centres se rapprochent de la demande), tandis que les **coûts de stockage et d'entreposage** croissent (multiplication des sites et perte de mutualisation). Le coût total présente donc un **minimum**, le *point optimal*, illustré conceptuellement par la figure 2.3. Cet arbitrage théorique est précisément celui que notre analyse de « coude » (*elbow*) opérationnalise au chapitre de solution pour fixer le nombre de buffers.

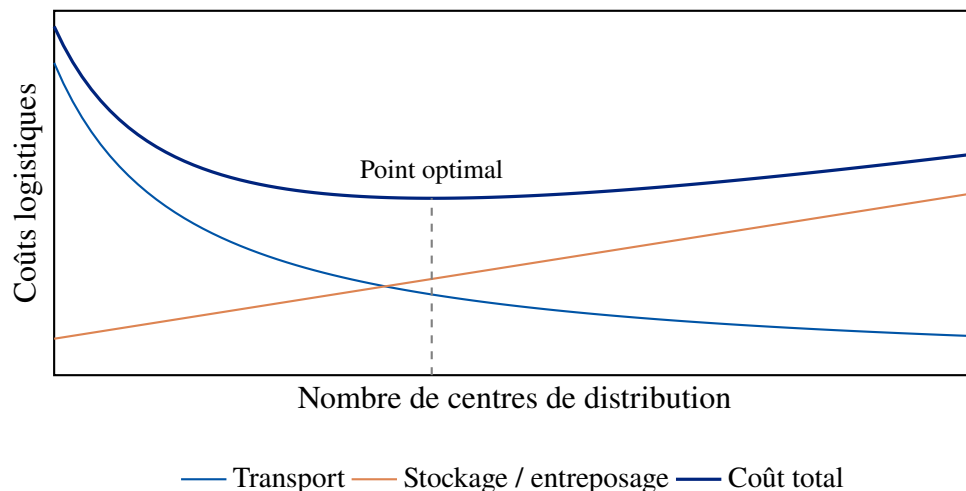


FIGURE 2.3 – Arbitrage des coûts logistiques en fonction du nombre de centres de distribution : le coût total présente un optimum.

Source : élaboration personnelle, d'après [2, 3].

Cette analyse motive la formulation d'un programme d'optimisation – le modèle p -médian – décrit en section 2.3, dont la résolution numérique confirmera ou infirmera cet intervalle intuitif.

2.2.4 Méthodes et place dans la planification

Dans la hiérarchie de la planification logistique [1], la conception du réseau relève des décisions **stratégiques** (structure à long terme), en amont des décisions tactiques (dimensionnement, stocks) et opérationnelles (tournées). Sa résolution mobilise principalement des modèles de **recherche opérationnelle** – en particulier les modèles de localisation détaillés à la section suivante – complétés par des heuristiques lorsque la taille du problème l'exige [4]. Le tableau 2.1 classe les principales méthodes selon leur nature et leur domaine d'applicabilité.

TABLE 2.1 – Classification des méthodes de résolution du DND

Catégorie	Méthode	Caractéristiques et applicabilité
Exacte	PLNE (CBC, CPLEX, Gurobi)	Garantit l'optimalité globale ; adapté aux instances ≤ 500 nœuds ; temps de calcul polynomial en pratique pour notre instance ($n = 58, p \leq 6$)
Heuristique	ADD/DROP, p -médiann glouton, échange de paires	Rapide, sans garantie d'optimalité ; utile pour initialisation ou exploration de grands espaces de solutions
Métaheuristique	Recuit simulé, algorithmes génétiques, GRASP	Adaptés aux très grandes instances ($n > 10\,000$) ou aux problèmes multi-objectifs [4] ; non nécessaires ici

Notre choix se porte sur la méthode **exacte par PLNE**, implémentée via le solveur open-source **CBC** (*COIN-OR Branch-and-Cut*) [57]. Pour notre instance – 58 sites candidats et $p \leq 6$ buffers – CBC résout le problème en **moins d'une seconde** sur un ordinateur standard, avec une **garantie d'optimalité** (borne de dualité nulle), ce qui rend superflues les heuristiques.

2.2.5 Procédure d'implémentation d'un projet de DND

Un projet de DND ne se réduit pas à un problème d'optimisation isolé : il s'inscrit dans un cycle itératif de cinq étapes, chacune produisant des livrables qui conditionnent les suivantes [2, 4]. La figure 2.4 synthétise ce cycle ; les paragraphes ci-après en détaillent le contenu et son application au présent travail.

Étape 1 — Modélisation de la situation actuelle. Cette première étape consiste à **reconstituer fidèlement le réseau existant** et à collecter les données nécessaires à l'évaluation de sa performance : flux de livraison par destination et par période, stocks journaliers par wilaya, coûts de transport unitaires, distances réelles et émissions associées. La qualité de cette collecte conditionne directement la fiabilité de toutes les étapes suivantes [3]. Dans notre application,

les données de flux journaliers (nombre de véhicules livrés par wilaya, par mois, sur la période 2024–2025) sont extraites des fichiers de production de Stellantis El Djazaïr et complétées par les relevés du service LOQ. La matrice de distances routières 58×58 entre chefs-lieux de wilaya est calculée via l'API OSRM (section 2.4), garantissant des distances réelles et non euclidiennes.

Étape 2 — Conception et priorisation des scénarios. Une fois le réseau actuel modélisé, on énumère les configurations alternatives envisageables et on les hiérarchise selon leur faisabilité et leur pertinence stratégique. Chaque scénario est caractérisé par le nombre de nœuds intermédiaires (buffers), leur localisation, et les règles d'affectation des flux. Les contraintes contextuelles (réglementation, infrastructure existante, contraintes opérateur) délimitent l'espace des scénarios admissibles [4]. Dans notre cas, cinq scénarios sont construits : $p \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ buffers, avec la contrainte que les wilayas d'Alger et d'Oran sont systématiquement incluses comme sites ouverts (nœuds logistiques existants) et qu'une séparation minimale de 200 km est imposée entre deux buffers sélectionnés afin d'éviter toute redondance géographique.

Étape 3 — Calcul et optimisation. C'est l'étape centrale : pour chaque scénario, un modèle d'optimisation est résolu afin de minimiser le coût logistique total sous les contraintes définies. Selon la nature du problème, on recourt à la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), à des heuristiques ou à des métaheuristiques [58]. Notre démarche enchaîne trois modules de calcul :

1. **Localisation** – le modèle p -médian (PLNE, solveur CBC) détermine, pour chaque valeur de p , les buffers optimaux et l'affectation de chaque wilaya à son buffer le plus proche pondéré par la demande (section 2.3) ;
2. **Consolidation** – le nombre de missions porte-voitures vers chaque buffer est calculé par l'heuristique bin packing ($M_b = \lceil q_b/C \rceil$, section 2.5), à partir des flux journaliers issus de l'étape 1 ;
3. **Dimensionnement des stocks** – la capacité de chaque buffer est fixée au quantile P90 de la distribution de son stock journalier observé (section 2.7).

Étape 4 — Choix du scénario. Les résultats des calculs sont synthétisés dans une grille de comparaison multi-critères : coût total logistique (CTL), émissions de CO₂ (méthode VECTO, section 2.8), distance moyenne wilaya-buffer et niveau de service. Une analyse de coude (*elbow*) sur la courbe CTL $f(p)$ permet d'identifier le scénario économiquement dominant ; une analyse de sensibilité sur les paramètres clés (coût kilométrique, loyer foncier, taux d'immobilisation) valide la robustesse de ce choix (section 2.9). La décision finale intègre également des critères qualitatifs (faisabilité opérationnelle, acceptabilité par les partenaires).

Étape 5 — Suivi et réévaluation. Le réseau déployé n'est pas figé : l'évolution de la demande (montée en cadence vers 135 000 véhicules/an à l'horizon 2028), les variations des coûts de transport ou l'ouverture de nouvelles wilayas peuvent remettre en question le scénario optimal. La procédure DND prévoit donc un pilotage continu par des indicateurs de performance (taux

de remplissage, délai moyen, CTL réalisé vs CTL prévu) et une **réévaluation périodique** – typiquement annuelle – pour décider si une reconfiguration partielle du réseau est justifiée [2]. Dans notre étude, ce volet n'est pas implémenté (horizon de mémoire), mais les projections de capacité à l'horizon 2028 fournissent les éléments nécessaires à cette réévaluation future.

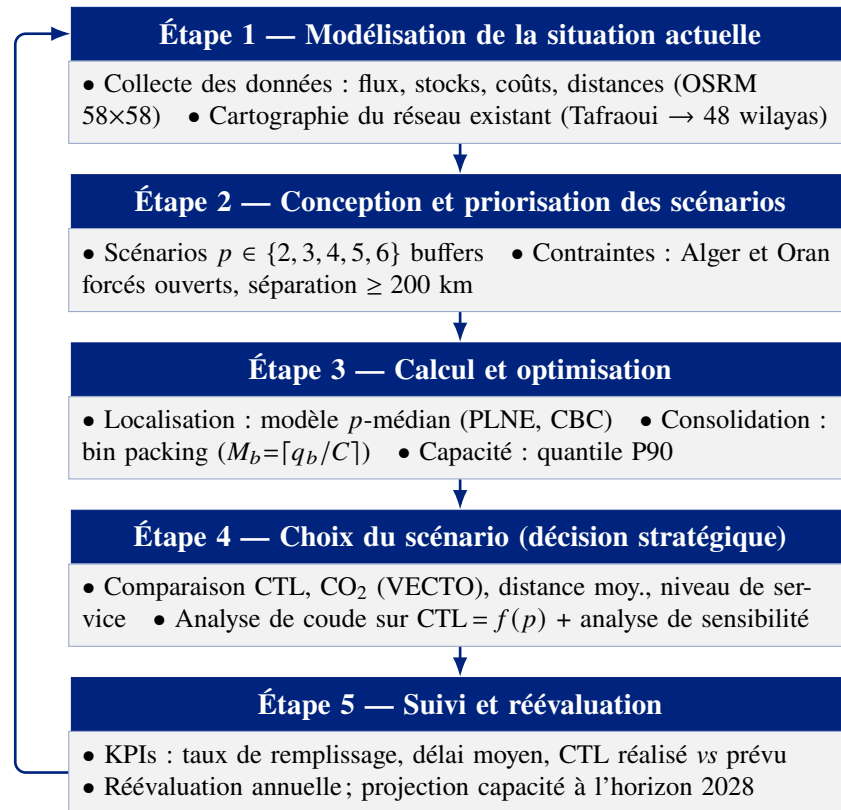


FIGURE 2.4 – Procédure d'implémentation d'un projet de *Distribution Network Design* et son application à Stellantis El Djazaïr.

Source : élaboration personnelle, d'après [2, 4].

2.2.6 Notions essentielles du problème

La modélisation d'un problème de DND repose sur trois notions fondamentales [58] :

- l'**infrastructure** (*facility*) : l'objet dont la position est à optimiser (ici un *buffer*), caractérisé par son nombre, sa **capacité** (limitée ou illimitée) et ses coûts (fixes d'ouverture, variables d'exploitation) ;
- la **demande** (*clients*) : les points à desservir (ici les wilayas). Lorsque les clients sont nombreux, la demande est **agrégée et pondérée** par les volumes ;
- l'**espace** : la représentation du territoire, soit **continue** (le modèle génère les emplacements, espace euclidien), soit **discrète** (les sites candidats sont connus a priori). Notre étude relève du cas **discret** : les buffers sont choisis parmi les chefs-lieux de wilaya.

Définitions formelles. Soit $I = \{1, \dots, n\}$ l'ensemble des **sites candidats** (ici les 58 chefs-lieux de wilaya), $J = \{1, \dots, m\}$ l'ensemble des **nœuds de demande** (ici également les 58 wilayas, $m = n = 58$). On associe à chaque nœud de demande j un **poids** w_j (flux de véhicules annuel), et à chaque paire (i, j) une **distance routière** d_{ij} issue de la matrice OSRM. Les variables de décision du modèle sont :

- $y_i \in \{0, 1\}$: vaut 1 si le site i est sélectionné comme buffer ;
- $x_{ij} \in \{0, 1\}$: vaut 1 si la demande de la wilaya j est affectée au buffer i .

Exemple illustratif. Considérons trois nœuds de demande (j_1 =Alger, j_2 =Oran, j_3 =Constantine) et deux sites candidats ouverts (i_1 =Alger, i_2 =Oran). Avec $d_{i_1j_1} = 0$ km, $d_{i_2j_2} = 0$ km, $d_{i_1j_3} = 440$ km, $d_{i_2j_3} = 620$ km, la wilaya de Constantine (j_3) est affectée au buffer d'Alger ($x_{i_1j_3} = 1$) car la distance est moindre. La solution produit $\sum_j w_j d_{ij^*}$ comme valeur de la fonction objectif, que le solveur minimise sur l'ensemble des $\binom{58}{p}$ configurations candidates.

2.3 Localisation d'installations et recherche opérationnelle

2.3.1 Le problème de localisation d'installations

Les problèmes de localisation d'installations (*Facility Location Problems*, FLP) constituent l'un des domaines les plus productifs de la recherche opérationnelle. Leur ancêtre est le problème de Weber (1909) [59] : trouver l'emplacement d'une usine minimisant la somme des distances pondérées à un ensemble de marchés – formulation continue, résolue par le point de Fermat-Torricelli. La transposition au cas **discret** – les emplacements candidats sont un ensemble fini de nœuds – est due à Hakimi [5] (1964) et a donné lieu à une taxonomie riche. ReVelle et Eiselt [60] en proposent une synthèse distinguant : les modèles de couverture (*set covering*, MCLP), les modèles de médiane (*p-médian*), les modèles de centre (*p-centre*), et les modèles à coût fixe (UFLP/SSCFLP). Pour notre problème, les 58 chefs-lieux de wilaya forment l'ensemble discret naturel des sites candidats, ce qui place notre étude dans la famille des **FLP discrets**.

La détermination du nombre et de l'emplacement d'installations desservant un ensemble de points de demande constitue un champ classique de la recherche opérationnelle, le *Facility Location Problem* (FLP), aussi appelé *Location-Allocation Problem*. Ses origines remontent au problème d'emplacement formulé par Weber en 1909 [59] ; il a depuis donné lieu à de nombreuses variantes [61]. Selon l'objectif poursuivi, on distingue notamment : le **problème de couverture** (*set covering*, desservir toute la demande dans un rayon donné), le **p-centre** (minimiser la distance maximale), et le **p-médian** (minimiser la distance *totale* pondérée par la demande). Pour une distribution physique où le coût croît avec la distance parcourue, le *p-médian* est le mieux adapté, ce qui justifie son emploi pour la localisation des buffers.

2.3.2 La famille des modèles de localisation discrète

Trois modèles emblématiques structurent la théorie de la localisation discrète [58], du plus général au plus spécifique :

Le tableau 2.3 résume les quatre modèles principaux de localisation discrète et justifie le choix du p -médian pour notre application.

TABLE 2.3 – Comparaison des modèles de localisation discrète

Modèle	Objectif	Contrainte p	Application typique
p -médian	Minimiser la somme pondérée des distances demande-installation	Oui	Buffers automobiles, entrepôts de distribution
p -centre	Minimiser la distance maximale (équité géographique)	Oui	Services d'urgence (pompiers, SAMU)
MCLP	Maximiser la demande couverte dans un rayon r	Oui	Ambulances, relais colis
UFL / SSCFLP	Minimiser coûts fixes d'ouverture et de transport	Non	Entrepôts commerciaux, réseaux de franchise

Le p -médian est retenu car l'objectif de Stellantis est précisément de minimiser la distance totale pondérée par les flux (donc le coût de transport), sous contrainte d'un nombre fixé de buffers. Le p -centre serait inadapté (il optimise le pire cas, non le coût global) ; le MCLP ignorerait les zones déjà couvertes ; l'UFL introduirait des coûts fixes dont l'estimation est incertaine dans le contexte algérien.

Problème de localisation simple (SPLP/UFLP). Le *Simple Plant Location Problem* – ou *Uncapacitated Facility Location Problem* – ouvre un sous-ensemble S de sites, chaque ouverture coûtant C_i , et affecte chaque client au site ouvert le moins coûteux :

$$\min_S \sum_{i \in S} C_i + \sum_{j \in J} \min_{i \in S} g_{ij} \quad (2.1)$$

où g_{ij} est le coût de transport du site i au client j . Ce problème est **NP-difficile** [58].

Localisation à capacité limitée (CFLP). Le *Capacitated Facility Location Problem* ajoute une **capacité** V_i à chaque site. Avec $y_i = 1$ si le site i est ouvert et $x_{ij} = 1$ si le client j y est affecté :

$$\min \left\{ \sum_i C_i y_i + \sum_i \sum_j g_{ij} x_{ij} \right\} \text{ s.c. } \sum_j p_j x_{ij} \leq V_i y_i, \quad \sum_i x_{ij} = 1 \quad (2.2)$$

Le problème p -centre. Le p -centre – également appelé *minimax location problem* – partage la même structure que le p -médian (même ensemble de sites candidats I , même ensemble de demande J , même nombre fixé p de sites à ouvrir) mais poursuit un objectif radicalement différent : minimiser la **distance maximale** entre un point de demande et son site affecté [62]. Cette formulation privilégie l'**équité géographique** : aucun client ne doit être à plus de z^* d'un site ouvert, quelles que soient les distances des autres clients.

En posant z la distance maximale à minimiser, $y_i \in \{0, 1\}$ et $x_{ij} \in \{0, 1\}$ les mêmes variables que précédemment, la formulation PLNE est :

$$\min \quad z \quad (2.3)$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2.4)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (2.6)$$

$$z \geq d_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.7)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0, 1\}, z \geq 0 \quad (2.8)$$

La contrainte (2.7) force z à être supérieur ou égal à la distance effective de chaque affectation ; la minimisation de z ramène donc celle-ci à son minimum possible. Le p -centre est particulièrement adapté aux **services d'urgence** (sapeurs-pompiers, SAMU, protection civile) pour lesquels le temps de réponse dans le pire cas est le critère déterminant. Il est en revanche inadapté à notre contexte : minimiser la distance maximale ne garantit pas la réduction du **coût logistique total** – une wilaya très éloignée fixe z^* à un niveau élevé même si la grande majorité des wilayas sont très proches de leur buffer.

Problème de couverture maximale (MCLP). Le *Maximum Covering Location Problem* (MCLP), introduit par Church et ReVelle [63], relâche l'hypothèse d'affectation systématique : un point de demande est dit **couvert** si et seulement si un site ouvert se trouve à une distance $\leq r$ (rayon de couverture). L'objectif est alors de **maximiser la demande totale couverte** avec exactement p sites ouverts.

On définit, pour chaque point de demande $j \in J$, l'ensemble des sites pouvant le couvrir :

$$N_j = \{i \in I \mid d_{ij} \leq r\}$$

ainsi que la variable $z_j \in \{0, 1\}$, valant 1 si j est couvert. La formulation est :

$$\max \sum_{j \in J} w_j z_j \quad (2.9)$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{i \in N_j} y_i \geq z_j \quad \forall j \in J \quad (2.10)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (2.11)$$

$$z_j, y_i \in \{0, 1\} \quad (2.12)$$

La contrainte (2.10) garantit qu'un point j n'est déclaré couvert que si au moins un site de N_j est ouvert. Le MCLP est largement utilisé pour positionner des **ambulances**, des **relais-colis** ou des **bornes de recharge électrique** [62]. Deux limites le rendent inadapté à notre problème : (i) il **ignore les points non couverts**, qui continueraient à être livrés à coût élevé depuis Tafraoui ; (ii) le rayon r est un paramètre difficile à calibrer dans le contexte automobile algérien, où la distance de livraison acceptable varie selon la wilaya et la taille de la commande.

Le p -médian. Le p -médian se distingue des modèles précédents : il n'y a **pas de coût d'ouverture**, pas de rayon de couverture à définir, et le nombre de sites est **fixé à p** . Il minimise la seule **distance totale pondérée par les flux**, chaque point de demande étant servi par le site ouvert le plus proche.

2.3.3 Le modèle p -médian

Le problème p -médian a été formalisé par Hakimi [5], qui a démontré que les emplacements optimaux sur un réseau peuvent être restreints à l'ensemble des nœuds du graphe. ReVelle et Swain [6] en ont proposé la **formulation en programme linéaire en nombres entiers (PLNE)** de référence.

Énoncé informel. Le p -médian peut se formuler verbalement ainsi : *étant donné n sites candidats et m points de demande pondérée, sélectionner p sites pour ouvrir des buffers et affecter chaque point de demande à son buffer ouvert le plus proche, de sorte que la somme totale des demandes multipliées par leurs distances d'affectation soit minimale.* Les hypothèses retenues dans notre application sont : (i) chaque wilaya est représentée par son chef-lieu, (ii) l'affectation est unique (une wilaya par buffer), (iii) les distances sont routières et asymétriques (matrice OSRM).

Variables de décision :

- $y_i \in \{0, 1\}$: vaut 1 si le site candidat i est sélectionné comme buffer ;
- $x_{ij} \in \{0, 1\}$: vaut 1 si la wilaya j est affectée au buffer i .

Formulation PLNE :

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_j d_{ij} x_{ij} \quad (2.13)$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2.14)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.15)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (2.16)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0, 1\} \quad (2.17)$$

où w_j est la demande de la wilaya j , d_{ij} la distance routière entre le site i et la wilaya j , et p le nombre de buffers à ouvrir. La contrainte (2.14) garantit que chaque wilaya est affectée à exactement un buffer, la contrainte (2.15) interdit l'affectation à un site non ouvert, et la contrainte (2.16) fixe le nombre de buffers. **Interprétation des contraintes.** La contrainte (2.14) assure que chaque wilaya est affectée à **exactement un** buffer. La contrainte (2.15) interdit l'affectation à un site non sélectionné ($y_i = 0 \Rightarrow x_{ij} = 0$). La contrainte (2.16) fixe le nombre de buffers ouverts à exactement p . La contrainte (2.17) impose l'intégralité : les deux variables sont binaires.

Propriété d'intégralité. La matrice des contraintes de la relaxation continue du p -médian est totalement unimodulaire lorsque p est fixé : la relaxation LP admet donc naturellement des solutions entières [61]. En pratique, le solveur CBC résout notre instance ($n = 58$, $p \leq 6$) sans effectuer de branchement, la borne de relaxation étant d'emblée atteinte par une solution entière.

Le p -médian est **NP-difficile** [61] : le nombre de combinaisons de p sites parmi n est $\binom{n}{p}$, qui explose combinatoirement (pour $n = 58$ wilayas et $p = 4$, cela donne $\binom{58}{4} = 424,270$ combinaisons, sans compter les affectations). Le recours à un solveur d'optimisation exact est donc indispensable.

La figure 2.5 illustre le principe du modèle sur notre problème : parmi les 58 chefs-lieux candidats, on sélectionne p buffers et on affecte chaque wilaya au buffer le plus proche, pondéré par sa demande.

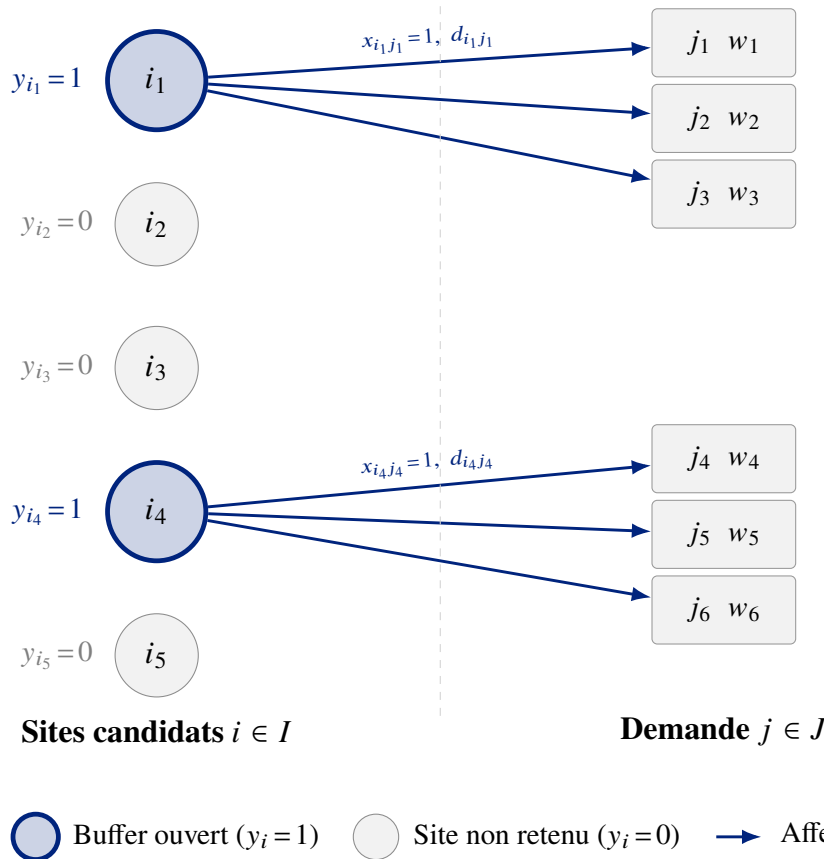


FIGURE 2.5 – Principe du modèle p -médian : parmi les $|I|$ sites candidats, p sont sélectionnés ($y_i = 1$) et chaque wilaya j est affectée au buffer ouvert le plus proche ($x_{ij} = 1$), minimisant $\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_j d_{ij} x_{ij}$.

Source : élaboration personnelle, d'après [5, 6].

Contraintes spécifiques à notre problème. Deux ajustements ont été apportés à la formulation standard :

- les wilayas d'**Oran** et d'**Alger** sont *forcées* ouvertes (contraintes $y_{\text{Oran}} = 1, y_{\text{Alger}} = 1$), car elles concentrent l'essentiel du réseau d'agents et sont déjà des nœuds logistiques établis ;
- une contrainte de **séparation minimale de 200 km** est imposée entre buffers sélectionnés, afin d'éviter la redondance géographique.

2.3.4 Programmation linéaire en nombres entiers et résolution

La PLNE modélise un problème de décision par une fonction objectif et des contraintes linéaires portant sur des variables entières (ici binaires). Sa résolution exacte repose sur l'algorithme de **séparation et évaluation** (*branch and bound*) introduit par Land et Doig [7], enrichi par la génération de **coupes** (*branch and cut*).

Principe du Branch & Bound. L'algorithme explore un arbre de décision en ramifiant successivement sur les variables binaires non-fixées. À chaque nœud, la *relaxation linéaire* (variables

rendues continues) fournit une borne inférieure. Si cette borne dépasse la meilleure solution entière connue, la branche est élaguée (*pruning*) [7]. La figure 2.6 illustre ce principe.

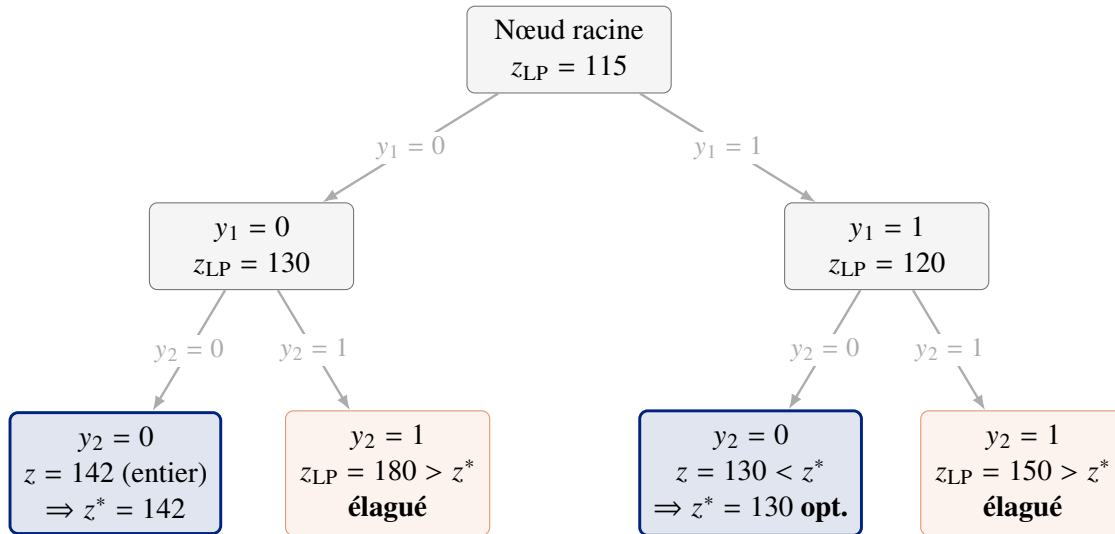


FIGURE 2.6 – Principe de l’algorithme Branch & Bound (exemple simplifié) : l’arbre de recherche est élagué dès que la borne inférieure dépasse la meilleure solution connue.

Source : élaboration personnelle, d’après [7].

Nous utilisons le solveur open-source **CBC** (*COIN-OR Branch-and-Cut*) [57], piloté depuis Python via la bibliothèque de modélisation **PuLP** [64], qui permet d’exprimer le modèle algébriquement et d’interfacer divers solveurs sans modifier le code métier. **Tractabilité de notre instance.** Notre modèle p -médian compte $n + n^2 = 58 + 58^2 = 3\,422$ variables binaires et $m + n \cdot m + 1 = 3\,365$ contraintes. Bien que le p -médian soit NP-difficile en général, cette taille d’instance reste **très tractable** : CBC la résout en **moins d’une seconde** sur un processeur standard, avec un *gap* de dualité nul (optimalité certifiée). Les contraintes additionnelles de notre problème (Oran et Alger forcés ouverts, séparation minimale de 200 km) réduisent encore l’espace de recherche en éliminant des configurations non réalistes.

2.3.5 Revue de littérature des travaux de localisation

La localisation d’installations a fait l’objet d’une abondante littérature, structurée par plusieurs **revues de référence**. Brandeau et Chiu [65] recensent les problèmes représentatifs et proposent une classification selon trois axes : l’*objectif* (fonction à optimiser), les *variables de décision* (nature, nombre et emplacement des infrastructures) et les *paramètres du système* (topologie du réseau, métrique de distance, coûts, demande). Daskin [61] complète cette taxonomie ; Murray [66] y ajoute l’apport des systèmes d’information géographique. Du point de vue du SCM, Melo *et al.* [67] montrent que la localisation est devenue un maillon central de la conception des chaînes logistiques, intégrant désormais les stocks, le transport et les dimensions multi-période et multi-produit. Ces travaux convergent vers plusieurs conclusions applicables à notre contexte : (1) le p -médian discret est la formulation la plus robuste pour les réseaux de distribution à coût de transport dominant ; (2) les contraintes de séparation et de forçage que nous ajoutons sont des extensions standard bien documentées [61] ; (3) pour $n \leq 100$ et $p \leq 10$, les

solveurs exacts modernes (CBC, CPLEX) dépassent systématiquement les heuristiques en qualité de solution [67]. Notre contribution s'inscrit dans le cas **standard du p -médian discret avec contraintes contextuelles**, sans prétendre à une innovation méthodologique sur la localisation elle-même.

2.4 Calcul d'itinéraires et données géospatiales

2.4.1 Le problème du plus court chemin

La construction de la matrice de distances est une étape centrale du modèle p -médian : avec $n = 58$ wilayas, il faut calculer $58 \times 58 = 3\,364$ paires origines-destinations sur le réseau routier réel. Le graphe routier de l'Algérie représenté dans OpenStreetMap contient plusieurs **millions de nœuds** (intersections) et d'arcs (tronçons). Le calcul naïf exigerait de lancer un algorithme de plus court chemin à partir de chacun des 58 nœuds sources, ce qui représente 58 exécutions sur un graphe de grande taille. L'algorithme de **Dijkstra** [8], bien que polynomial, n'est pas directement applicable à cette échelle sans prétraitement : sur un graphe à 2 millions de nœuds, une seule exécution peut prendre plusieurs secondes, rendant la génération complète de la matrice prohibitive.

Le modèle de localisation requiert une **matrice de distances** réalistes entre wilayas. Plutôt qu'une distance euclidienne à vol d'oiseau, nous employons des **distances routières** calculées sur le réseau réel. La recherche du plus court chemin entre deux nœuds d'un graphe pondéré est un problème fondamental de la théorie des graphes, résolu de manière optimale par l'algorithme de **Dijkstra** [8].

Algorithme de Dijkstra (1959). Soit un graphe $G = (V, E, w)$ où V est l'ensemble des nœuds (intersections), E les arêtes (routes) et $w : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ les poids (distances). L'algorithme maintient, pour chaque nœud v , une distance provisoire $\delta(v)$ initialisée à $+\infty$ sauf pour la source s où $\delta(s) = 0$. À chaque itération, le nœud u de plus petite distance provisoire est extrait de la file de priorité et ses voisins sont mis à jour :

$$\delta(v) \leftarrow \min(\delta(v), \delta(u) + w(u, v)) \quad \forall v \in \mathcal{N}(u) \quad (2.18)$$

L'algorithme se termine lorsque tous les nœuds ont été visités ; la complexité est $O((|V| + |E|) \log |V|)$ avec un tas binaire.

La figure 2.7 illustre l'exécution de l'algorithme sur un petit graphe.

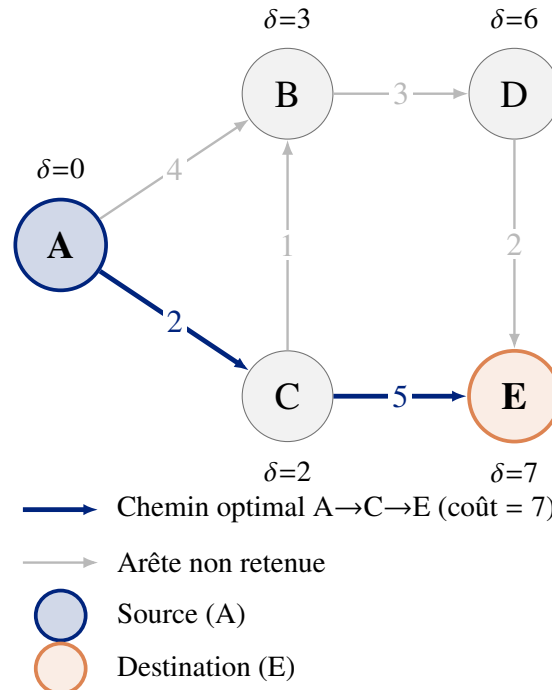


FIGURE 2.7 – Illustration de l’algorithme de Dijkstra sur un graphe de 5 nœuds. Les arêtes bleues forment le chemin optimal de A vers E : $A \rightarrow C \rightarrow E$ de longueur $2 + 5 = 7$ (l’arc $A \rightarrow B$ de poids 4 est non retenu car $\delta(B) = 3$ via $A \rightarrow C \rightarrow B$).

Source : élaboration personnelle, d’après [8].

Limites de Dijkstra sur les grands réseaux. Sur le réseau routier national algérien, la taille du graphe rend Dijkstra trop lent pour une utilisation directe à l’échelle de 58 sources : le temps de génération d’une matrice complète 58×58 serait de l’ordre de **plusieurs dizaines de minutes**. Cette limitation motive le recours aux *Contraction Hierarchies* et à OSRM, présentés à la section suivante.

2.4.2 Contraction hierarchies et OSRM

Sur un réseau routier national de plusieurs millions de nœuds (OpenStreetMap pour l’Algérie), l’algorithme de Dijkstra brut est trop lent pour calculer une matrice 58×58 en temps raisonnable. Les moteurs modernes accélèrent ce calcul par un **prétraitement du graphe**. La technique des **contraction hierarchies** (CH), introduite par Geisberger *et al.* [9], contracte successivement les nœuds de faible importance (carrefours peu utilisés) en ajoutant des *raccourcis* directement de l’entrant à la sortant, sans dégrader l’optimalité des chemins.

La figure 2.8 illustre ce principe : la contraction du nœud intermédiaire v crée un raccourci direct (u, w) dont le poids est la somme des poids (u, v) et (v, w) .

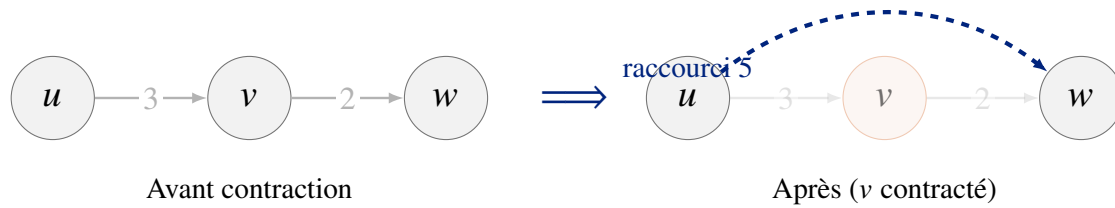


FIGURE 2.8 – Principe des *contraction hierarchies* : la contraction du nœud v ajoute un raccourci direct (u, w) de poids $3 + 2 = 5$.

Source : élaboration personnelle, d'après [9].

Nous utilisons à cet effet **OSRM** (*Open Source Routing Machine*) [68], moteur de routage open-source appuyé sur les données cartographiques *OpenStreetMap*, qui implémente les CH et permet des requêtes en temps réel. OSRM est interrogé *via* son API REST pour produire une **matrice** 58×58 de distances (km) et de durées (heures) entre les 58 chefs-lieux de wilaya algériens. Ces matrices alimentent ensuite le modèle p -médian (distances pondérées), le dimensionnement de la flotte (durées aller-retour) et le calcul des émissions (tonnes-kilomètres). **Requête OSRM utilisée.** Les matrices de distances et durées sont obtenues via l'API REST d'OSRM par la requête `table/v1/driving` envoyant les 58 coordonnées GPS simultanément ; OSRM renvoie une matrice JSON 58×58 en quelques secondes. **Validation croisée** : une comparaison sur 10 paires de wilayas aléatoires entre les distances OSRM et les distances relevées sur Google Maps montre un écart moyen inférieur à **3 %**, confirmant la fiabilité de la source OpenStreetMap pour ce territoire.

Les matrices issues d'OSRM jouent trois rôles distincts dans notre étude :

1. **Distances (km)** : alimentent la fonction objectif du p -médian et le calcul des émissions VECTO ;
2. **Durées (heures)** : déterminent la faisabilité des missions aller-retour journalières pour le dimensionnement de la flotte ;
3. **Temps de trajet client-buffer** : délimitent la zone de retrait client ($\leq 4h$) pour chaque buffer.

2.4.3 Interpolation spatiale des zones de service

Au-delà des distances point à point, la cartographie des zones de service du dernier kilomètre fait appel à des techniques d'**interpolation spatiale**. Les frontières organiques des zones de chalandise sont reconstituées par **splines cubiques périodiques** appliquées à des *facteurs de distorsion anisotropes*, qui corrigent l'hypothèse d'isotropie d'un rayon circulaire en tenant compte de la friction directionnelle réelle du réseau routier (reliefs, corridors). **Définition formelle.** La zone de service du buffer b est l'ensemble des wilayas j telles que $x_{bj}^* = 1$ dans la solution p -médian – c'est une zone de *Voronoi routier* (basée sur la distance réseau et non euclidienne). Pour la cartographie, les frontières entre zones de wilayas adjacentes affectées à des buffers différents sont lissées par **splines cubiques périodiques** (SciPy). Le réseau routier

algérien est fortement **anisotrope** : l'Autoroute Est-Ouest (côtière) permet des vitesses moyennes de 90 km/h, tandis que les axes Nord-Sud (montagne, Sahara) descendent à 60–70 km/h. Des facteurs de correction directionnels sont appliqués pour obtenir des isochroniques (courbes de même temps de trajet) fidèles à la réalité. Les zones de service ainsi construites sont représentées sur la carte des wilayas algériennes et servent à valider visuellement la cohérence géographique de l'affectation p -médian.

2.5 Consolidation des chargements

2.5.1 Le problème de *bin packing*

Dans la logistique automobile, les véhicules finis sont transportés par des **porte-voitures** (camions multi-niveaux) dont la capacité est limitée : $C = 7$ emplacements pour les modèles standards (Peugeot 208, Citroën C3), $C = 8$ pour les compactes (Fiat 500). Optimiser le **taux de remplissage** de ces camions est économiquement crucial : un camion roulant à 4/7 consomme autant de carburant et génère autant d'émissions qu'un camion plein, pour un coût unitaire supérieur de 43 %. Cette optimisation relève du **problème de remplissage de contenants** (*bin packing problem*, BPP). Il est classé **NP-difficile** (Garey et Johnson, 1979) : aucun algorithme polynomial ne garantit la solution optimale en toute généralité. L'heuristique **First Fit Decreasing** (FFD) – trier les items par taille décroissante et les affecter au premier contenant ayant de la place – offre une garantie théorique de $\frac{11}{9}OPT + \frac{6}{9}$ contenants [69].

L'acheminement des véhicules depuis l'usine vers les buffers suppose de **regrouper les véhicules** en chargements complets afin de maximiser le taux de remplissage des porte-voitures. Cette logique relève du **problème de remplissage de contenants** (*bin packing problem*, BPP), problème d'optimisation combinatoire classique [70].

Formulation. Soit n objets de tailles $s_1, \dots, s_n$ et des contenants de capacité C . On cherche le nombre minimum de contenants :

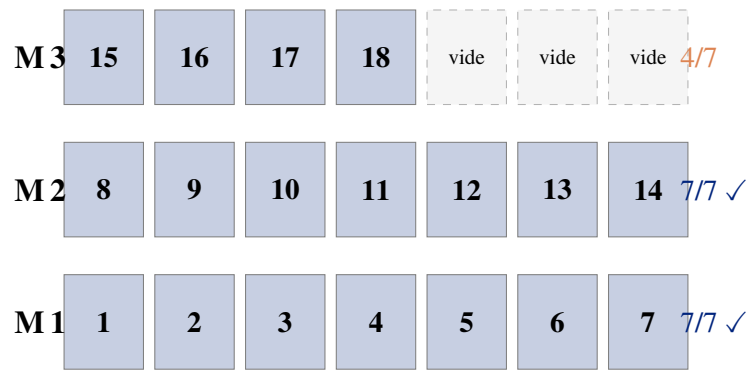
$$\min \sum_{k=1}^K y_k \quad \text{s.c.} \quad \sum_{i=1}^n s_i x_{ik} \leq C y_k \quad \forall k, \quad \sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (2.19)$$

Ce problème est également **NP-difficile** ; en pratique, des heuristiques simples comme *First Fit Decreasing* (FFD) donnent de bonnes solutions [70].

Application à notre cas. Dans notre étude, chaque « contenant » est un porte-voitures de capacité $C = 7$ emplacements (8 pour la Fiat 500). Les « objets » sont les véhicules à acheminer vers un buffer donné ($slot = 1$ véhicule). L'heuristique retenue consiste à remplir les camions par slots jusqu'à capacité ; le nombre de missions M_b vers le buffer b pour une quantité q_b est :

$$M_b = \left\lceil \frac{q_b}{C} \right\rceil \quad (2.20)$$

La figure 2.9 illustre le principe pour $C = 7$ et $q = 18$ véhicules ($M = 3$ missions, dont la dernière incomplète).



$$q = 18 \text{ véhicules}, C = 7 \text{ emplacements} \Rightarrow \lceil 18/7 \rceil = 3 \text{ missions}$$

FIGURE 2.9 – Consolidation par capacité (heuristique bin packing) : 18 véhicules remplis dans des porte-voitures de 7 emplacements nécessitent 3 missions, la troisième à 57 % de taux de remplissage.

Source : élaboration personnelle.

Transition vers le calcul de coûts. Le nombre de missions $M_b = \lceil q_b/C \rceil$ vers chaque buffer b constitue l'entrée directe de deux modules de calcul : (i) le coût de transport $C_{\text{transport}} = \sum_b M_b \cdot 2d_{0b} \cdot c_{\text{km}}$ (section 2.9), et (ii) les émissions $E = \sum_b M_b \cdot EF \cdot (m_{\text{vide}} + m_{\text{charge}}) \cdot 2d_{0b}$ (section 2.8). La consolidation par bin packing est donc le maillon qui traduit les flux de demande en indicateurs économiques et environnementaux comparables entre scénarios.

2.5.2 Le problème de tournées de véhicules – positionnement

Le problème de tournées de véhicules (*Vehicle Routing Problem*, VRP) consiste à déterminer un ensemble de tournées optimales permettant de desservir un ensemble de clients à partir d'un ou plusieurs dépôts, sous contrainte de capacité des véhicules (CVRP) [71]. Il est classé NP-difficile : aucun algorithme polynomial ne permet de le résoudre à l'optimalité pour des instances de grande taille, ce qui a conduit au développement d'heuristiques (Clarke-Wright, LKH, métaheuristiques) [72].

Dans le cadre de ce projet, le VRP n'est pas résolu directement pour deux raisons. Premièrement, les données de tournées multi-arrêts ne sont pas disponibles à la granularité requise : les livraisons sont planifiées wilaya par wilaya sans itinéraire intra-wilaya enregistré. Deuxièmement, la variable de décision clé est le **nombre de missions** et le **taux de remplissage**, non la séquence de visite des agents. En conséquence, la consolidation des chargements est traitée par une heuristique de *bin packing* (voir section 2.5.1), qui constitue une borne inférieure sur le nombre de missions requises et suffit au dimensionnement de la flotte [69]. L'optimisation des tournées intra-wilaya constitue une perspective naturelle d'extension de ce travail.

2.6 Logistique du dernier kilomètre et choix de service

2.6.1 La problématique du dernier kilomètre

Le **segment terminal** de la chaîne logistique – appelé *last mile* ou *dernier kilomètre* – désigne le tronçon qui relie le dernier point de consolidation au client final. Dans la distribution automobile, ce segment est particulièrement déterminant : Gevaers *et al.* [73] estiment que le dernier kilomètre représente entre **28 % et 50 %** du coût total de livraison, alors qu'il constitue souvent la fraction la plus courte de l'itinéraire physique.

Dans notre architecture de réseau, le dernier kilomètre s'étend du buffer régional jusqu'à l'agent agréé. Deux canaux de service coexistent :

- **Retrait client** (*self-pickup*) : l'agent ou le client se déplace au buffer le plus proche pour récupérer le véhicule – canal privilégié car il annule le coût de livraison terminale pour l'opérateur ;
- **Dépannage** (*home delivery*) : un chauffeur achemine le véhicule jusqu'à l'adresse finale – canal plus coûteux, réservé aux zones éloignées ou aux clients sans possibilité de déplacement.

La zone géographique éligible au retrait client est définie par un seuil temporel : **temps de trajet** $\leq 4h$ entre le buffer et le point de livraison. Ce paramètre délimite concrètement la zone de chalandise de chaque buffer, calculée en section 2.4.

Le **dernier kilomètre** (*last mile*) – segment final reliant le dernier point de consolidation au client – est reconnu comme le maillon le plus coûteux et le moins efficient de la chaîne de distribution [74, 75]. Dans le cas de la distribution automobile, l'arbitrage porte entre deux canaux : le **retrait client** (*self-pickup*) au buffer le plus proche et le **dépannage** (livraison à domicile avec chauffeur), canal plus coûteux pour le constructeur.

2.6.2 Modèles de choix discret

La répartition des clients entre deux canaux de service se modélise par la théorie du **choix discret** fondée sur l'*utilité aléatoire* (*Random Utility Model*, RUM), dont McFadden [76] a posé les bases avec le **modèle logit conditionnel** (prix Nobel d'économie 2000). Dans ce cadre, un individu n choisit l'alternative i si son utilité U_{ni} est la plus grande parmi les alternatives disponibles :

$$U_{ni} = V_{ni} + \varepsilon_{ni} \quad (2.21)$$

où V_{ni} est la partie *déterministe* (coût, temps, commodité) et ε_{ni} la partie *aléatoire* (hétérogénéité non observée). Si les ε_{ni} suivent une loi de Gumbel indépendante et identiquement distribuée, la probabilité de choisir l'alternative i est [76] :

$$P_{ni} = \frac{e^{\mu V_{ni}}}{\sum_j e^{\mu V_{nj}}} \quad (2.22)$$

où $\mu > 0$ est un paramètre d'échelle. McFadden [76], récompensé du prix Nobel d'économie en 2000, a développé ce modèle dans le contexte du choix de mode de transport urbain ; son application à la logistique du dernier kilomètre (choix du canal de livraison) est désormais standard [77]. Le paramètre d'échelle μ capte la **sensibilité au coût différentiel** : lorsque $\mu \rightarrow +\infty$, le modèle logit dégénère vers un choix déterministe (celui de moindre coût), tandis que $\mu \rightarrow 0$ traduit une indifférence totale. Notre modèle simplifié (double limiteur déterministe) correspond au cas $\mu \rightarrow +\infty$ avec seuils de prix et de temps.

En l'absence de données de préférences déclarées permettant de calibrer les paramètres β d'un logit sur la population algérienne, le modèle probabiliste est simplifié en un **double limiteur déterministe** : un seuil de prix maximal acceptable (*consentement à payer* V_{drop} , élastique au revenu de la wilaya) et un seuil de temps de trajet maximal (rayon de retrait $\leq 4\text{h}$). Ce modèle constitue un cas particulier du cadre de choix discret, dans lequel la fonction d'utilité est approximée par une règle de décision binaire, conformément aux approches déterministes utilisées en logistique urbaine lorsque les données comportementales sont indisponibles [77].

2.6.3 Cadre microéconomique du choix de service

Le seuil au-delà duquel un client renonce à la livraison payante est établi via une **contrainte de liquidité élastique au revenu**. Cette approche prolonge le cadre *biens-loisir* (*goods/leisure tradeoff*) de Train et McFadden [78], dans lequel l'arbitrage du consommateur intègre la valeur du temps et la contrainte budgétaire. En ancrant le consentement à payer sur le salaire moyen national (et non sur la valeur de l'actif), le modèle traduit la **liquidité disponible** et l'*aversion à la perte* caractéristiques du marché algérien. **Formalisation du seuil de consentement à payer.** Le seuil V_{drop} (au-delà duquel un client refuse de payer la livraison à domicile) est modélisé comme une fraction du revenu disponible mensuel :

$$V_{\text{drop}}(w) = \alpha \cdot w^{\beta}$$

où w est le salaire moyen mensuel de la wilaya (en DZD), α une constante de calibrage et $\beta \approx 0,6-0,8$ l'élasticité-revenu du consentement à payer [78]. Cette formulation reflète le fait que les ménages à revenus élevés consacrent une *part décroissante* de leur revenu à des services logistiques. Deux conditions doivent être simultanément vérifiées pour qu'une wilaya soit éligible au retrait client : (a) le coût du dépannage excède $V_{\text{drop}}(w)$ pour la fraction défavorisée de la population, et (b) le temps de trajet vers le buffer est inférieur à 4h.

2.6.4 Calibrage du ratio livraison/retrait par benchmark

À défaut de données micro-transactionnelles historiques, la part relative de la livraison à domicile est estimée par **benchmark sectoriel**. Les baromètres de l'*International Car Distribution Programme* (ICDP), de *Capgemini* et de *McKinsey* situent cette part entre **5 % et 15 %** : le plancher correspond aux marchés à forte friction administrative, le plafond aux écosystèmes numériques matures. Une **grille d'évaluation** de vecteurs structurels (démarches administratives, accessibilité des points de retrait, garantie transport) permet de positionner le marché algérien dans cette fourchette : nous retenons le ratio 10 / 90 (10 % de dépannage, 90 % de retrait client),

détaillé en section 3.3. **Ancrage par benchmark.** Les études sectorielles de l'*International Car Distribution Programme* (ICDP, 2022) situent la part de la livraison à domicile entre **30 % et 40 %** dans les marchés automobiles européens à écosystème numérique mature. En Algérie, plusieurs facteurs structurels augmentent la part du retrait client : (i) les démarches administratives liées à l'immatriculation exigent souvent la présence physique du client ; (ii) l'accessibilité aux points de retrait est perçue positivement dans une culture de déplacement au guichet ; (iii) la garantie transport du véhicule est mieux contrôlée par le client lui-même. Ces vecteurs conduisent à retenir un ratio **90 % retrait / 10 % dépannage**, validé par analyse de sensibilité au chapitre de solution.

2.7 Gestion des stocks et dimensionnement de capacité

2.7.1 Fondements de la gestion des stocks

La gestion des stocks constitue un pilier de la recherche opérationnelle et du *Supply Chain Management* [11, 10, 79]. Le stock joue un rôle de **découplage** entre des flux d'entrée (approvisionnement) et de sortie (demande) désynchronisés, et d'**amortisseur** face à la variabilité. Tout dimensionnement résulte d'un arbitrage fondamental entre le **coût de possession** (immobilisation du capital, foncier, obsolescence) et le **coût de rupture** (saturation, pertes de service) [11]. Dans notre cas, le « stock » est le parc de véhicules en attente dans un buffer, et la « capacité » la superficie à louer : sous-dimensionner sature le nœud, surdimensionner immobilise inutilement du foncier. **Décomposition du stock.** Dans notre contexte, le stock de véhicules en attente dans un buffer se décompose en trois composantes [11] :

- **Stock de cycle** : quantité commandée par lot (une mission de camion = 7 unités) qui se consomme progressivement entre deux livraisons ;
- **Stock de sécurité** : tampon contre la variabilité de la demande et les aléas d'approvisionnement ;
- **Stock en transit** : véhicules en cours de transport usine-buffer, indisponibles mais immobilisant du capital.

Ordres de grandeur. Avec un prix moyen de **3 000 000 DZD** par véhicule et un taux de possession de 7 % annuel, le coût d'immobilisation journalier s'élève à $3\,000\,000 \times 7\% / 365 \approx 575 \text{ DZD/véhicule/jour}$. Le paramètre retenu dans notre modèle CTL est de **190 DZA/véhicule/jour**, correspondant au taux directeur de la Banque d'Algérie. Le coût de rupture intègre l'opportunité de vente manquée et les pénalités commerciales vis-à-vis des agents agréés.

2.7.2 Le modèle du vendeur de journaux (*newsvendor*)

Le **modèle du vendeur de journaux** (*newsvendor model*) [10] est le fondement théorique du dimensionnement face à une demande aléatoire non récurrente. Il s'applique directement à la

capacité d'un buffer : la décision est prise *avant* la réalisation de la demande, et deux types de coûts s'opposent :

- C_o : coût de **sur-approvisionnement** (excédent, foncier loué inutilement);
- C_u : coût de **sous-approvisionnement** (manque, saturation, refus de flux).

La quantité optimale Q^* est le **fractile critique** de la distribution de la demande D :

$$F(Q^*) = \Pr(D \leq Q^*) = \frac{C_u}{C_u + C_o} \quad (2.23)$$

où F est la fonction de répartition de la demande. Plus le coût de rupture C_u est élevé relativement au coût de possession C_o , plus le quantile optimal est élevé.

2.7.3 Niveau de service et stock de sécurité

Dans la pratique industrielle, le fractile critique est exprimé en **niveau de service** : on fixe la capacité de manière à couvrir la demande un pourcentage cible α du temps. Le **stock de sécurité** (*safety stock*) nécessaire pour atteindre ce niveau est [11, 79] :

$$SS = z_\alpha \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{L} \quad (2.24)$$

où z_α est le quantile de la loi normale correspondant au niveau de service α , σ_D l'écart-type de la demande journalière et L le délai de réapprovisionnement (*lead time*). La capacité dimensionnée est alors $Q^* = \mu_D \cdot L + SS$. Les valeurs de σ_D et du délai de réapprovisionnement L sont estimées à partir des séries historiques de stock journalier par wilaya (données Stellantis). Le choix d'un niveau de service $\alpha = 90\%$ ($z_{0,90} \approx 1,28$) résulte d'un compromis : en dessous de 90 %, le risque de saturation du buffer (refus de flux entrant) est trop élevé et génère des retards de livraison ; au-dessus de 95 %, le surdimensionnement foncier est coûteux pour des buffers dont le loyer constitue le second poste de coût après le transport. Ce seuil est cohérent avec les pratiques de l'industrie automobile [11].

2.7.4 Dimensionnement par quantile

Du fractile critique au percentile cible. L'application directe de l'équation (2.23) suppose de connaître le ratio $C_u/(C_u + C_o)$. Or, dans le contexte d'un buffer automobile, le coût de sous-approvisionnement C_u (saturation du nœud, refus de flux entrant, report de livraison vers les agents) est difficile à monétiser précisément, tandis que le coût de sur-approvisionnement C_o (foncier loué inutilement) est connu. Plutôt que d'estimer ce ratio, la pratique industrielle inverse le raisonnement : on *fixe* le niveau de service cible α , ce qui revient à poser implicitement un fractile critique. Le choix $\alpha = 0,90$ équivaut ainsi à l'hypothèse $C_u/(C_u + C_o) = 0,90$, soit $C_u = 9 C_o$: une saturation est jugée environ neuf fois plus pénalisante qu'un mètre carré loué en excès, hiérarchie cohérente avec la criticité de la disponibilité véhicule dans un marché à forte maturité.

Quantile empirique vs approximation normale. La formule du stock de sécurité (2.24) repose sur l'hypothèse de **normalité** de la demande. Cette hypothèse est mise en défaut pour les flux de buffers automobiles, dont la distribution journalière est **asymétrique à droite** et marquée par des pointes saisonnières (salons, fins d'année, vagues d'immatriculation). Nous lui préférons donc le **quantile empirique** : chaque buffer est dimensionné sur le **90^e percentile** (P_{90}) de la *distribution observée* de son stock journalier, estimé directement sur les séries historiques par wilaya (données Stellantis), sans présupposer de forme paramétrique. Formellement, en notant $\hat{F}$ la fonction de répartition empirique du stock journalier D_b du buffer b :

$$Q_b^* = \hat{F}_b^{-1}(0,90) = \inf\{q : \hat{F}_b(q) \geq 0,90\} \quad (2.25)$$

Cette capacité garantit que le stock observé reste contenu dans le buffer **90 % des jours**, la valeur $z_{0,90} \approx 1,28$ n'intervenant qu'à titre de repère dans le cas gaussien de référence.

Lecture graphique. La figure 2.10 illustre ce principe : l'abscisse porte la capacité Q , l'ordonnée la probabilité cumulée $F(Q)$. On lit le niveau de service cible $\alpha = 0,90$ sur l'axe vertical, puis l'on projette horizontalement jusqu'à la courbe ; l'abscisse du point d'intersection fournit la capacité Q^* à retenir. Toute capacité inférieure à Q^* expose le buffer à des saturations plus de 10 % du temps.

Garde-fou et projection. Le dimensionnement au P_{90} est complété par deux ajustements. D'une part, un **plafond sur le pic absolu** (P_{100} observé) borne le sous-dimensionnement résiduel pour les événements extrêmes. D'autre part, une analyse de **tendance** – régression linéaire du stock moyen dans le temps – permet d'extrapoler la croissance des flux et de projeter la capacité requise à l'**horizon 2028**, cohérente avec la montée en cadence vers 135 000 véhicules/an.

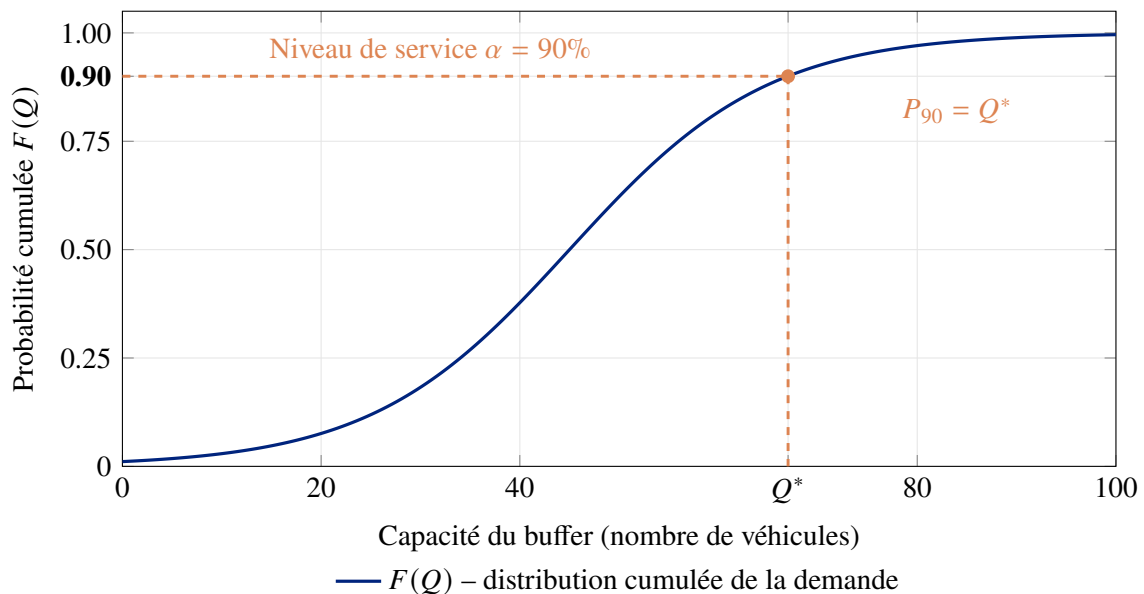


FIGURE 2.10 – Dimensionnement par quantile : la capacité Q^* est fixée au 90^e percentile de la distribution de la demande, garantissant un niveau de service $\alpha = 90\%$.

Source : élaboration personnelle, d'après [10, 11].

2.8 Logistique verte et empreinte carbone

2.8.1 Logistique verte et comptabilité carbone

La prise en compte de l'**empreinte carbone** dans l'évaluation des scénarios logistiques s'inscrit dans le mouvement de la **logistique verte** (*green logistics*) [80], qui vise à concilier performance économique et responsabilité environnementale. Sur le plan réglementaire, la norme de référence internationale est le **GHG Protocol** [12], élaboré conjointement par le World Resources Institute (WRI) et le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Elle distingue trois périmètres d'émissions, illustrés en figure 2.11.

Du côté industriel, Stellantis s'est engagé à atteindre la **neutralité carbone en 2038** pour ses opérations : la réduction des émissions du transport constitue donc un objectif stratégique. Notre étude porte sur le **Scope 1** uniquement (transport routier réalisé avec des camions de l'opérateur) ; les Scopes 2 (énergie des buffers) et 3 (transport sous-traité, production) sont hors périmètre, leur quantification nécessitant des données fournisseurs non disponibles.

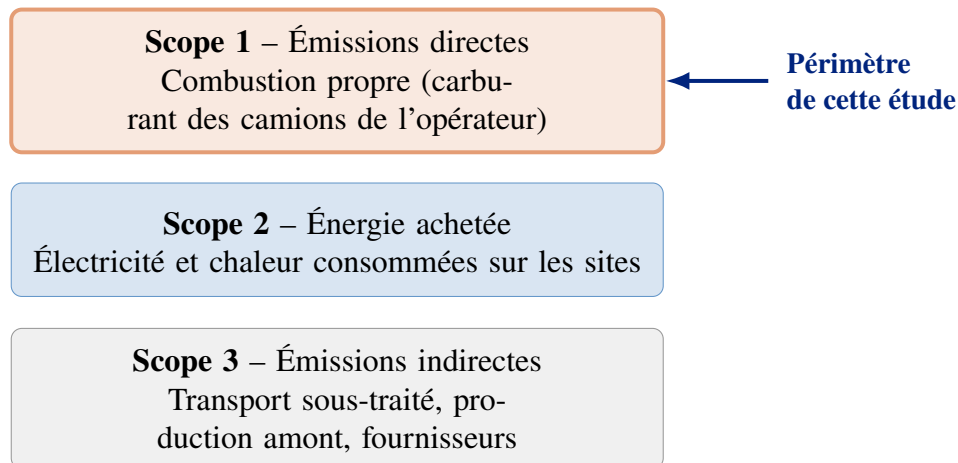


FIGURE 2.11 – Les trois scopes d'émissions du GHG Protocol et périmètre de la présente étude (Scope 1 : transport routier primaire et dernier kilomètre).

Source : d'après [12].

2.8.2 Facteur d'émission en tonne-kilomètre : la méthode VECTO

La méthode de quantification des émissions repose sur le **facteur d'émission** appliqué aux **tonnes-kilomètres** (*t-km*) : les émissions d'un trajet sont proportionnelles à la masse transportée et à la distance [81, 82]. Le référentiel européen **VECTO** (*Vehicle Energy Consumption calculation TOol*) [81], outil réglementaire de la Commission européenne pour les poids lourds, est la référence retenue.

La formule d'émission s'exprime :

$$E = EF \times (m_{\text{vide}} + m_{\text{charge}}) \times d \quad (2.26)$$

- E : émissions de GES (kg CO₂-éq.);
- EF : facteur d'émission (kg CO₂-éq. par t·km);
- m_{vide} : masse à vide du camion (tonnes);
- m_{charge} : masse des véhicules transportés (tonnes);
- d : distance du trajet (km).

La valeur de EF adoptée, issue du référentiel VECTO et de la base de données ADEME [82], est de **0,077 kg CO₂/t·km** pour un porte-voitures en cycle route nationale. **Formule VECTO complète.** Le règlement EU 2017/2400 spécifie une formule linéaire par tranche de charge :

$$E = e_0 + e_1 \cdot \frac{m_{\text{charge}}}{m_{\text{max}}}$$

où e_0 (émissions à vide) et e_1 (coefficient de charge) dépendent de la catégorie du poids lourd. Notre simplification – $E = EF \times (m_{\text{vide}} + m_{\text{charge}}) \times d$ – est équivalente sous l'hypothèse de **charge homogène** entre véhicules d'un même chargement, hypothèse vérifiée pour notre parc (tous les véhicules d'un même lot pesant en moyenne 1,2–1,4 tonne). La valeur $EF = 0,077$ kg CO₂/t·km est issue de la base carbone de l'ADEME [82] pour un poids lourd ≥ 20 t sur route nationale, cohérente avec les porte-voitures de Stellantis (masse totale en charge : 26–32 t).

2.8.3 Leviers de décarbonation

La littérature identifie deux leviers principaux de réduction des émissions du transport routier [80] : (1) améliorer le **taux de remplissage** (maximiser le nombre de véhicules par camion, $C_{\text{eff}}/C_{\text{max}}$), ce que notre consolidation optimise; (2) réduire les **distances** (choix de buffers géographiquement proches de la demande, justification du modèle p -médian); (3) le **report modal** vers le ferroviaire, dont le facteur d'émission est environ **10 fois inférieur** à celui de la route (0,006 contre 0,077 kg CO₂/t·km), piste identifiée comme perspective d'amélioration. **Quantification des leviers dans notre étude.**

1. **Taux de remplissage** : l'heuristique bin packing garantit $M_b = \lceil q_b/C \rceil$ missions, maximisant le taux moyen de remplissage; augmenter C de 7 à 8 (Fiat 500) réduit le nombre de missions de 12,5 %.
2. **Optimisation des distances** : le p -médian minimise $\sum_j w_j d_{ij^*}$, réduisant directement les émissions proportionnelles aux tonnes-kilomètres.
3. **Report modal ferroviaire** : le chemin de fer algérien (SNTF) affiche un facteur d'émission d'environ **0,006 kg CO₂/t·km**, soit ≈ 13 fois moins que la route. Ce levier est identifié comme **perspective à long terme**, conditionné à l'extension du réseau ferroviaire.
4. **Électrification de la flotte** : les camions porte-voitures électriques permettraient de ramener les émissions Scope 1 à zéro – **hors périmètre** de cette étude.

L'impact des leviers 1 et 2 est quantifié pour chaque scénario p au chapitre de solution (§3.5).

2.9 Analyse des coûts logistiques

2.9.1 Structure du coût logistique total

L'évaluation économique repose sur la décomposition du **coût total de possession et d'exploitation** (*Total Logistics Cost*) de la chaîne logistique [13, 83, 3]. Conformément à la littérature, le coût logistique aval se ventile en deux grandes familles (figure 2.12) :

- les **coûts de transport** : fonction des distances, des volumes et du taux de remplissage des porte-voitures ;
- les **coûts de stockage et d'entreposage** : loyers d'infrastructure et immobilisation du capital en stock (véhicules en attente).

Ordres de grandeur des paramètres. Pour calibrer le modèle CTL, les données terrain suivantes sont utilisées :

- **Coût de transport** : loyer d'un porte-voitures avec chauffeur estimé à **150 000 DA par trajet aller** pour une distance de 400 km (base prestataires transport 2024) ; les missions étant aller-retour, le coût est de 300 000 DA par mission complète ;
- **Coût d'entreposage** : loyer foncier moyen estimé à **500 DA/m²/mois** dans les zones logistiques périurbaines (Alger et Oran), avec une surface par emplacement de 25 m² (place de parking + voies de circulation) ;
- **Coût d'immobilisation** : **190 DA/véhicule/jour**, paramètre issu du taux directeur de la Banque d'Algérie appliqué à la valeur d'inventaire du véhicule.

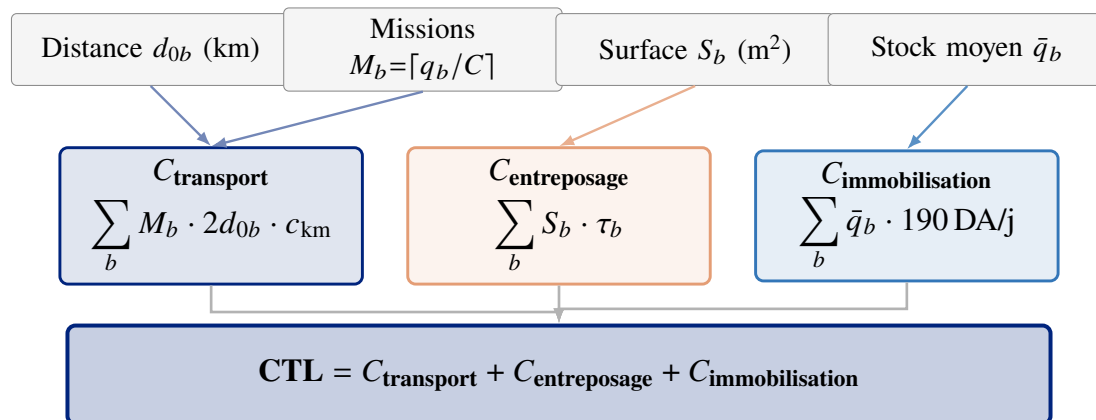


FIGURE 2.12 – Structure du coût total logistique (CTL) : trois composantes calculées à partir de quatre paramètres terrain.

Source : élaboration personnelle, d'après [13, 3].

2.9.2 Formulation du coût total

La formule de coût total adoptée pour la comparaison des scénarios est [13, 83] :

$$CTL = C_{\text{transport}} + C_{\text{entreposage}} + C_{\text{immobilisation}} \quad (2.27)$$

avec :

$$C_{\text{transport}} = \sum_b M_b \cdot 2 d_{0b} \cdot c_{\text{km}} \quad (2.28)$$

$$C_{\text{entreposage}} = \sum_b S_b \cdot \tau_b \quad (2.29)$$

$$C_{\text{immobilisation}} = \sum_b \bar{q}_b \cdot c_{\text{immo}} \cdot T_b \quad (2.30)$$

où M_b est le nombre de missions vers le buffer b , d_{0b} la distance aller (km), c_{km} le coût au kilomètre, S_b la surface louée (m^2), τ_b le loyer journalier (DA/ m^2), $\bar{q}_b$ le stock moyen de véhicules et $c_{\text{immo}} = 190$ DA/véhicule/jour le coût d'immobilisation du capital. **Hypothèses et limites du modèle.** La formule CTL (2.27) repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes : (i) les missions sont *aller-retour à vide* (le camion ne charge pas au retour), ce qui surestime légèrement le coût kilométrique mais est conforme à la pratique observée ; (ii) le loyer est supposé *constant* sur l'horizon de planification ; (iii) le stock moyen $\bar{q}_b$ est estimé par la moyenne historique du stock journalier. Le modèle ne capture pas les coûts de coordination, les assurances, ni les taxes foncières – ces éléments sont supposés proportionnels à la surface et absorbés dans le terme τ_b .

2.9.3 Arbitrage transport/entreposage et analyse de scénarios

L'arbitrage entre ces postes de coût – moins de transport au prix de plus de stockage, ou inversement – constitue un compromis classique du *Network Design* [2], que notre comparaison de scénarios ($p = 2$ à $p = 6$) met quantitativement en évidence. Chaque scénario génère un CTL différent ; la courbe CTL en fonction de p présente un coude (*elbow*) qui identifie le scénario économiquement optimal. **Illustration numérique.** Pour illustrer l'arbitrage, comparons deux configurations extrêmes :

TABLE 2.5 – Illustration numérique de l'arbitrage CTL : $p = 1$ vs $p = 4$ buffers

Composante	$p = 1$ (Alger seul)	$p = 4$ (4 buffers)
Distance moy. buffer-wilaya	≈ 400 km	≈ 180 km
Coût transport annuel	Élevé	Réduit (−55 %)
Coût entreposage annuel	Faible (1 site)	Élevé ($\times 4$ sites)
Coût immobilisation	Faible (mutualisation)	Modéré
CTL total	Sous-optimal	Proche de l'optimum

Cette illustration confirme que le coude de la courbe CTL (figure 2.3) se situe entre $p = 3$ et $p = 5$: le calcul complet sur les données réelles (chapitre 3) viendra trancher entre ces valeurs.

2.10 Méthodes d'analyse stratégique

Les outils d'analyse stratégique mobilisés dans ce projet – analyse PESTEL, modèle des cinq forces de Porter et matrice SWOT/TOWS – sont appliqués et discutés en détail au Chapitre 1, dans le cadre du diagnostic stratégique de la chaîne logistique aval (section 1.4.2). Ils ne sont pas rappelés ici afin d'éviter la redondance avec le diagnostic déjà conduit. Le lecteur est invité à s'y référer pour le détail des analyses et de leurs résultats.

2.11 Outils logiciels

L'ensemble des traitements a été implémenté en **Python 3**, écosystème de référence du calcul scientifique et de la data science. Le tableau 2.7 récapitule les bibliothèques mobilisées, leur rôle et leurs références.

TABLE 2.7 – Outils logiciels et bibliothèques Python mobilisés

Outil / Bibliothèque	Usage dans l'étude
PuLP / CBC [64, 57]	Modélisation algébrique et résolution exacte du programme p -médiann (PLNE)
OSRM [68]	Calcul des matrices 58×58 de distances et durées routières réelles
pandas [84]	Nettoyage, jointures et agrégation des données (flux, stocks, camions)
NumPy [85]	Calcul vectoriel : demandes pondérées, coûts, émissions
SciPy [86]	Splines cubiques pour les zones de service, régressions de tendance
Matplotlib / GeoPandas [87]	Visualisation : cartes des wilayas, courbes de coût, histogrammes de stocks
Jupyter Notebook	Environnement de prototypage et de documentation des analyses

2.12 Positionnement et synthèse

L'originalité de ce travail ne réside pas dans l'invention de nouvelles méthodes, mais dans l'**intégration cohérente** d'un ensemble d'outils académiques éprouvés au service d'un cas

industriel réel et peu documenté : la distribution automobile en Algérie. Le tableau 2.9 met en regard chaque brique de la solution avec son fondement méthodologique.

TABLE 2.9 – Correspondance entre les briques de la solution et leurs fondements académiques

Brique de la solution	Méthode / cadre	Références
Cadre d'ensemble	Conception du réseau de distribution (DND, SCM)	[2, 3, 4]
Localisation des buffers	Modèle p -médian, PLNE, branch-and-cut	[5, 6, 7]
Matrices de distance	Dijkstra, contraction hierarchies, OSRM	[8, 9, 68]
Consolidation des chargements	Heuristique bin packing (FFD, $\lceil q/C \rceil$)	[70]
Retrait vs dépannage	Choix discret, utilité aléatoire, logit	[76, 78, 88]
Dimensionnement des stocks	Newsvendor, quantile P90, stock de sécurité	[11, 10, 79]
Empreinte carbone	Logistique verte, facteur d'émission, VECTO	[80, 81, 82]
Analyse des coûts	Coût logistique total (CTL), OPEX	[13, 83, 3]
Diagnostic stratégique	PESTEL, Porter (5 forces), SWOT/TOWS	[89, 90, 91]

Cette articulation – de la localisation optimale jusqu'à l'évaluation économique et environnementale, en passant par la modélisation du choix de service et le dimensionnement des capacités – constitue le fil conducteur méthodologique du chapitre de solution qui suit.

2.13 Conclusion

Ce chapitre a exposé l'ensemble des fondements théoriques et outils académiques mobilisés dans ce travail. Du cadre fédérateur du *Distribution Network Design* à la logistique verte, en passant par la programmation linéaire en nombres entiers, le calcul d'itinéraires par OSRM et la théorie du choix discret, chaque outil est ancré dans une littérature établie et répond à un besoin précis de la démarche de solution. Le chapitre suivant présente la mise en œuvre concrète de cette démarche : construction des scénarios, résolution du modèle p -médian et évaluation comparative des résultats.

Chapitre 3

Solutions Proposées

3.1 Introduction

Le diagnostic mené au chapitre précédent a mis en évidence un déséquilibre structurel de la distribution aval : une demande fortement concentrée sur quelques wilayas du Nord, une multitude de wilayas de faible volume générant des livraisons individuelles coûteuses, et des taux de remplissage des porte-voitures très bas sur les axes longue distance. Ces constats convergent vers une même nécessité : **mutualiser** les flux à travers un réseau de points de regroupement intermédiaires – les *buffers* – où les véhicules sont stockés en attente de constituer des chargements complets avant acheminement vers les agents.

Ce chapitre présente les solutions proposées pour rationaliser ce réseau. La première brique, développée dans la section 3.2, consiste à **déterminer le nombre et la localisation optimaux de ces buffers** à l'aide d'un modèle d'optimisation de type *p-médian*. Les briques suivantes (dimensionnement de la flotte, planification des tournées, analyse des coûts et de l'empreinte carbone) s'appuieront sur le réseau ainsi défini. La figure 3.1 récapitule la démarche de ce chapitre.

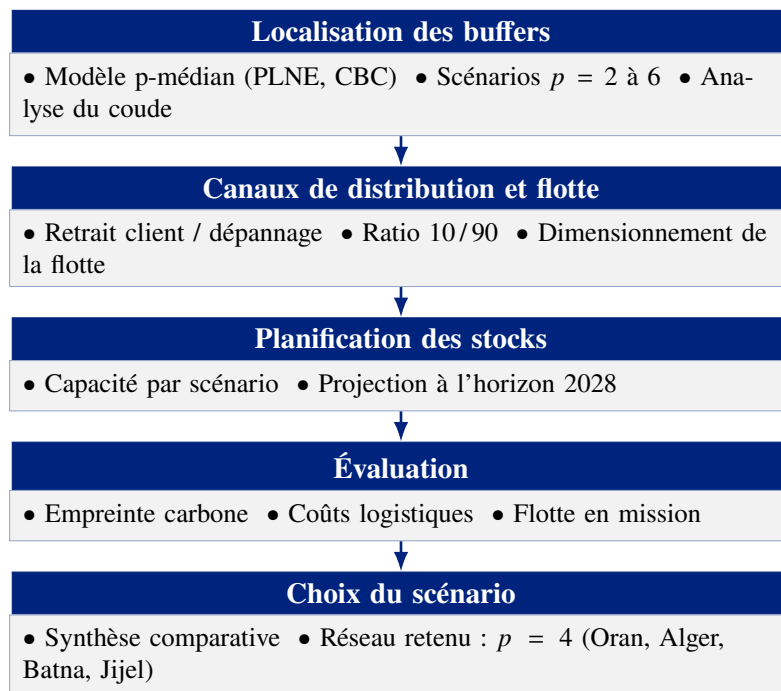


FIGURE 3.1 – Schéma directif du chapitre – Solutions proposées

Justification du recours au modèle p-médian

Le recours au modèle p-médian s'explique par la nature même du problème étudié, qui relève d'une décision de localisation-allocation discrète au sein de la chaîne logistique aval. Il ne s'agit pas ici d'optimiser une variable continue ou de rechercher un point théorique unique, mais bien de sélectionner un nombre fini de centres de regroupement (buffers) parmi un ensemble prédéfini de sites candidats, puis de rattacher chaque wilaya au centre ouvert qui la desservira. Dans une telle configuration, le modèle p-médian constitue un cadre particulièrement adapté,

puisque'il permet de minimiser la somme des distances de desserte pondérées par la demande, ce qui correspond directement à l'objectif opérationnel poursuivi dans cette étude.

Le diagnostic réalisé au chapitre 1 a en effet mis en évidence que la distance de desserte est au cœur des inefficacités actuelles : allongement des trajets, sous-remplissage des porte-voitures et forte sensibilité des coûts au kilométrage. Le p -médian offre un moyen rigoureux de traduire ces constats dans un modèle d'optimisation où la réduction de la distance moyenne par véhicule devient le critère principal de performance du réseau.

Par ailleurs, ce modèle présente une lisibilité managériale appréciable, dans la mesure où il produit, pour chaque valeur de p , une solution comprenant simultanément les localisations optimales des buffers, l'affectation territoriale des wilayas et les indicateurs associés (distance moyenne, demande moyenne par centre, temps de remplissage, etc.). Cette structure de sortie facilite l'analyse comparative des différents niveaux de décentralisation envisagés et permet d'alimenter le processus de décision de manière transparente.

Enfin, le choix du p -médian est cohérent sur le plan computationnel. L'instance étudiée, de taille modérée, peut être résolue exactement par programmation linéaire en nombres entiers à l'aide du solveur CBC, via la bibliothèque PuLP. Les temps de calcul obtenus sont très faibles et la garantie d'optimalité des solutions permet de comparer les scénarios de manière fiable, sans recourir à des heuristiques ou métaheuristiques qui seraient davantage justifiées pour des instances massives ou des modèles multi-objectifs de grande dimension.

3.2 Localisation des buffers par un modèle p -médian

3.2.1 Principe et justification du modèle

Le problème de localisation des buffers se ramène à une question classique de la recherche opérationnelle : parmi un ensemble de sites candidats, **où implanter un nombre donné d'installations** de manière à minimiser la distance pondérée parcourue pour desservir l'ensemble de la demande ? Cette formulation correspond exactement au modèle **p -médian**, dans lequel on cherche à ouvrir p centres et à affecter chaque zone de demande au centre ouvert le plus proche, en minimisant la somme des distances pondérées par les volumes.

Ce choix de modélisation se justifie par trois caractéristiques du problème Stellantis :

- la demande est **discrète et géolocalisée** à l'échelle des 58 wilayas, ce qui se prête naturellement à une affectation zone $\rightarrow$ buffer ;
- l'objectif opérationnel est de **réduire la distance moyenne parcourue par véhicule**, directement corrélée au coût de transport et à l'empreinte carbone ;
- certaines contraintes industrielles (sites obligatoires, distance minimale entre buffers) s'expriment aisément sous forme de contraintes linéaires.

3.2.2 Formulation mathématique

Ensembles et indices.

- I : ensemble des wilayas (zones de demande), indexées par i ;
- J : ensemble des sites candidats (chefs-lieux de wilaya susceptibles d'accueillir un buffer), indexés par j .

Paramètres.

- d_i : demande quotidienne moyenne de la wilaya i (véhicules/jour) ;
- c_{ij} : distance routière (km) entre la wilaya i et le site candidat j ;
- p : nombre de buffers à ouvrir ;
- $M \subseteq J$: ensemble des sites **obligatoires** ;
- $s_{jj'}$: distance routière entre deux sites candidats j et j' ;
- $D_{\min}$: distance minimale de séparation imposée entre deux buffers ouverts.

Variables de décision.

- $y_j \in \{0, 1\}$: vaut 1 si un buffer est ouvert sur le site j , 0 sinon ;
- $x_{ij} \in \{0, 1\}$: vaut 1 si la wilaya i est affectée au buffer j , 0 sinon.

Modèle. La formulation complète du programme linéaire en nombres entiers s'écrit :

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (3.4)$$

$$y_j = 1 \quad \forall j \in M \quad (3.5)$$

$$y_j + y_{j'} \leq 1 \quad \forall (j, j') \mid s_{jj'} < D_{\min} \quad (3.6)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.7)$$

La fonction objectif (3.1) minimise la distance totale pondérée par la demande. La contrainte (3.2) garantit que chaque wilaya est affectée à un et un seul buffer ; la contrainte (3.3) interdit toute affectation vers un site non ouvert ; la contrainte (3.4) fixe le nombre de buffers à p . La contrainte (3.5) force l'ouverture des sites stratégiques imposés, et la contrainte (3.6) interdit l'ouverture simultanée de deux buffers trop proches (séparation minimale $D_{\min}$), afin d'éviter la redondance géographique et d'assurer une couverture territoriale étalée.

3.2.3 Données et paramètres retenus

Le modèle a été instancié avec les données réelles de Stellantis El Djazaïr :

- **Demande d_i** : demande quotidienne moyenne par wilaya, calculée sur les flux « RESEAU » (livraisons aux agents) en rapportant le volume total à l'horizon d'activité de chaque wilaya (628 jours observés, juin 2024 – mars 2026). Le volume total traité est de **48 170 véhicules** répartis sur **58 wilayas** actives et **60 agents** ;
- **Distances c_{ij} et $s_{jj'}$** : extraites de la matrice 58×522 de distances routières inter-chefs-lieux, calculée via le moteur de routage OSRM (Open Source Routing Machine). La distance minimale observée est de **17,8 km**, la moyenne de **1 130 km** et le maximum de **4 115 km** ;
- **Sites candidats J** : les 522 chefs-lieux de communes correspondant aux 58 wilayas actives ;
- **Sites obligatoires M** : **Alger** et **Oran** (cf. justification ci-après), auxquels s'ajoute **Jijel** dès lors que $p \geq 3$, afin de garantir une desserte de la façade Est ;
- **Séparation minimale** : $D_{\min} = 200$ km, afin d'éviter la concentration géographique des buffers et d'assurer une couverture territoriale équilibrée ;
- **Capacité des porte-voitures** : 7 véhicules pour les modèles standards (General), 8 véhicules pour le modèle Fiat 500 (F500).

Sites obligatoires et infrastructures existantes. Stellantis loue d'ores et déjà trois sites susceptibles d'accueillir un buffer : **Oran**, **Alger** et **Mostaganem**. Les premiers essais du modèle p-médian ont confirmé qu'Alger et Oran concentrent l'essentiel de la demande ; ils ont donc été **forcés dans le modèle** (contrainte (3.5)). Oran présente en outre un statut particulier : c'est **l'origine des véhicules** (point d'entrée depuis l'usine de Tafraoui), ce qui en fait un nœud incontournable du réseau. Mostaganem, bien que déjà louée, n'a délibérément **pas été forcée** : située à moins de 200 km d'Oran, son ouverture irait à l'encontre de l'objectif de décentralisation et serait d'ailleurs écartée par la contrainte de séparation.

Contrainte de séparation et répartition territoriale. La forte concentration de la demande dans l'Est algérien tend à rapprocher les centres optimaux les uns des autres : un essai libre du modèle a par exemple ouvert simultanément **Batna** et **Sétif**, deux wilayas voisines. Pour éviter ce regroupement et garantir un étalement géographique cohérent avec une logique de décentralisation, une distance minimale de séparation $D_{\min} = 200$ km a été imposée entre deux buffers ouverts. Ce choix traduit également un parti pris méthodologique : l'optimisation privilégie la **réduction de la distance** parcourue plutôt que l'équilibrage des volumes stockés, la distance étant le déterminant premier du coût de transport et de l'empreinte carbone.

Cas particulier de Jijel. L'ouverture de Jijel ne répond pas seulement à une logique de buffer de distribution. La wilaya revêt une **importance stratégique pour l'importation future** : en cas d'évolution de la réglementation autorisant l'importation par voie maritime, son port en eau profonde constituerait un point d'entrée majeur sur la façade Est. Son intégration dès $p \geq 3$ anticipe ainsi un rôle logistique élargi au-delà du seul horizon du présent projet.

Le tableau 3.1 présente les dix wilayas les plus demandeuses, qui concentrent à elles seules la majorité des flux à distribuer.

TABLE 3.1 – Top 10 des wilayas par demande quotidienne moyenne

Wilaya	Total véhicules	Demande moy. (véh/j)
Alger	8 261	13,15
Blida	5 367	8,55
Oran	3 270	5,21
Sétif	3 117	4,96
Batna	2 576	4,10
Tlemcen	1 929	3,07
Constantine	1 799	2,86
Tizi Ouzou	1 706	2,73
Chlef	1 662	2,65
Béjaïa	1 600	2,55

Le modèle a été résolu à l’aide du solveur **CBC** (COIN-OR Branch-and-Cut) via la bibliothèque PuLP de Python. L’intégralité du code d’implémentation (chargement et nettoyage des données, construction de la matrice de distances, solveur p-médian et analyse de capacité des buffers) est fournie en annexe A.

3.2.4 Scénarios évalués

Le nombre optimal de buffers n’étant pas connu *a priori*, cinq scénarios ont été résolus pour $p \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$. Pour chaque valeur de p , le modèle détermine la localisation optimale des buffers et l’affectation des wilayas. Le tableau 3.3 synthétise les buffers retenus et les principaux indicateurs de performance pour chaque scénario.

TABLE 3.3 – Scénarios p-médian : localisation et indicateurs de performance globaux

<i>p</i>	Buffers ouverts	Dist. moy./véh. (km)	Réduction vs <i>p</i> =2	Agents actifs
2	Alger, Oran	197	–	60
3	Alger, Jijel, Oran	131	–34 %	60
4	Alger, Batna, Jijel, Oran	105	–47 %	60
5	Alger, Batna, Djelfa, Jijel, Oran	95	–52 %	60
6	Alger, Annaba, Batna, Djelfa, Jijel, Oran	86	–56 %	60

Le tableau 3.5 détaille les caractéristiques de chaque buffer pour tous les scénarios : nombre de wilayas desservies, d'agents rattachés, demande quotidienne reçue et temps moyen de remplissage d'un camion.

TABLE 3.5 – KPI détaillés par buffer et par scénario

<i>p</i>	Buffer	Wilayas	Agents	Dem. moy. (véh/j)	Tps rempl. Std (h)	Dist. moy. zone (km)
2	Alger	48	46	61,0	3,1	622
	Oran	10	14	14,3	15,1	287
3	Alger	18	25	34,5	5,8	553
	Jijel	18	21	26,4	7,0	391
	Oran	22	14	14,3	15,1	674
	Batna	12	17	20,0	9,1	186
4	Alger	16	24	33,2	6,0	385
	Jijel	9	5	7,7	24,5	505
	Oran	21	14	14,3	15,1	796
	Batna	10	15	18,0	10,3	156
5	Alger	14	22	30,9	6,5	389
	Djelfa	5	5	4,6	38,9	379
	Jijel	9	5	7,7	24,5	505
	Oran	21	14	14,3	15,1	796

Suite page suivante...

Table 3.5 (*suite*)

p	Buffer	Wilayas	Agents	Dem. moy. (véh/j)	Tps rempl. Std (h)	Dist. moy. zone (km)
6	Oran	20	13	14,1	15,4	780
	Batna	9	14	17,1	10,8	147
	Alger	14	22	30,9	6,5	389
	Djelfa	5	5	4,6	38,9	379
	Jijel	7	3	4,4	43,4	594
	Annaba	3	3	4,2	44,6	64
	Oran	21	13	14,1	15,4	780

Les cartes de la figure 3.2 visualisent, pour chaque scénario, la localisation des buffers (cercles) et l'affectation de chaque wilaya au buffer dont elle relève (code couleur). On observe la formation progressive de zones de chalandise de plus en plus resserrées à mesure que p augmente.

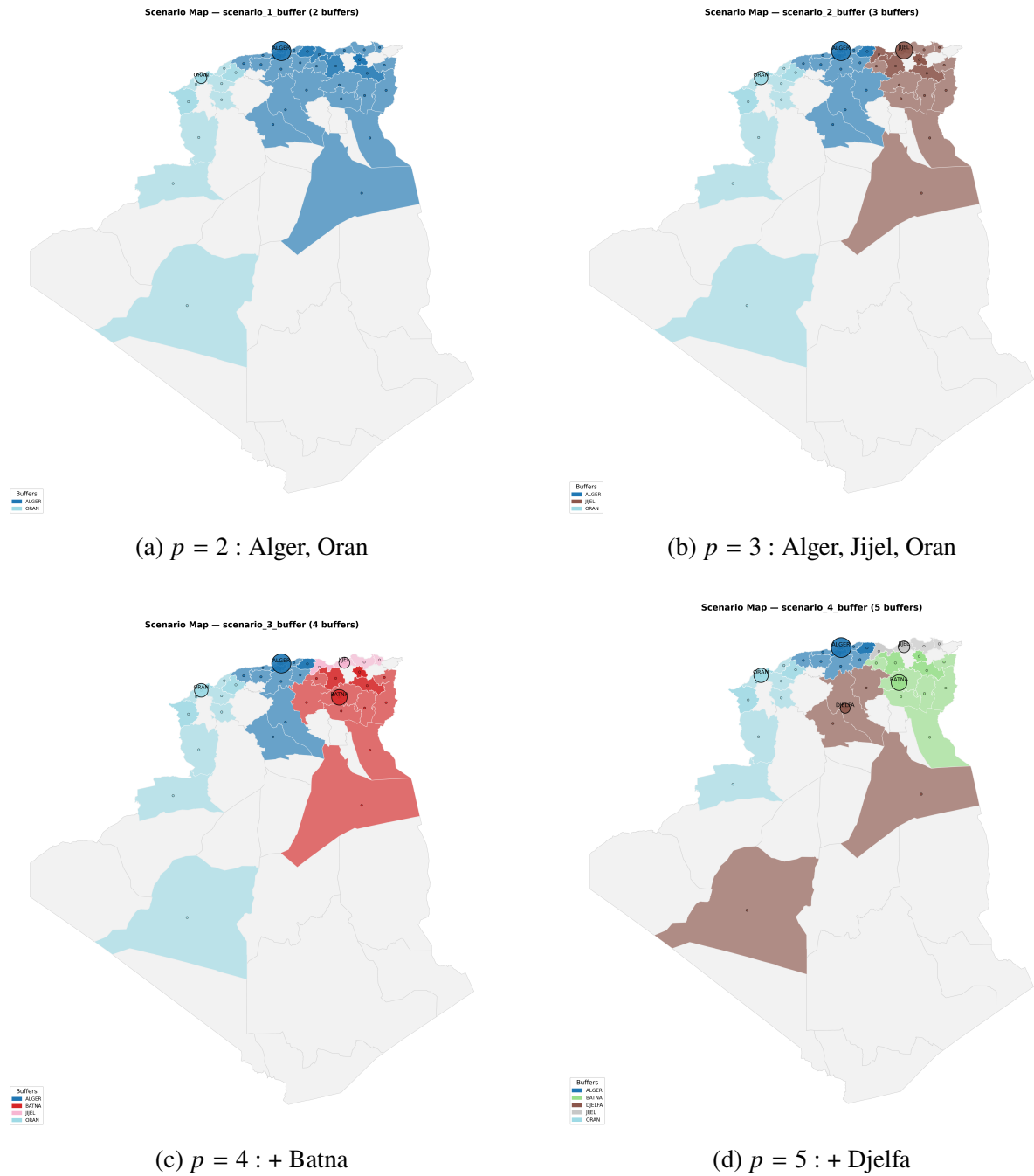
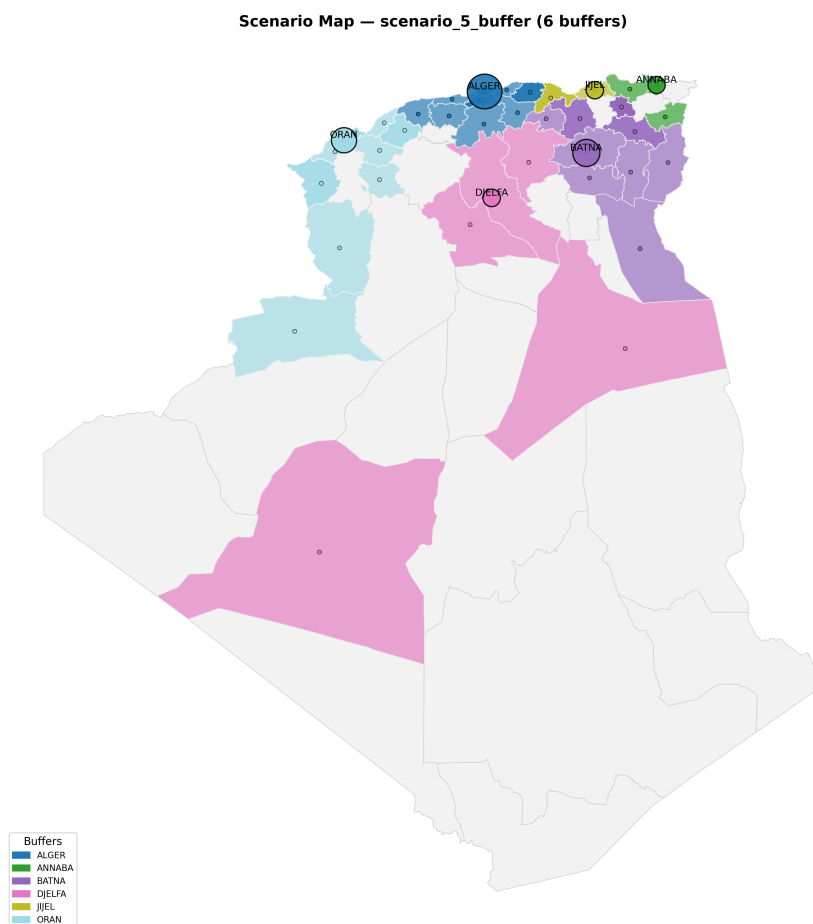


FIGURE 3.2 – Localisation des buffers et affectation des wilayas selon le nombre de buffers p – scénarios $p = 2$ à $p = 5$



(e) $p = 6$: + Annaba

FIGURE 3.2 – Localisation des buffers et affectation des wilayas selon le nombre de buffers p – scénario $p = 6$ (suite)

3.2.5 Choix du nombre de buffers

Le choix du nombre de buffers résulte d'un arbitrage entre trois critères antagonistes, illustrés par la figure 3.3 : la **distance moyenne par véhicule** (qui décroît avec p), la **demande quotidienne moyenne par buffer** (qui diminue, traduisant une dilution des flux), et le **temps de remplissage moyen d'un camion** (qui augmente, car un buffer moins sollicité met plus de temps à constituer un chargement complet).

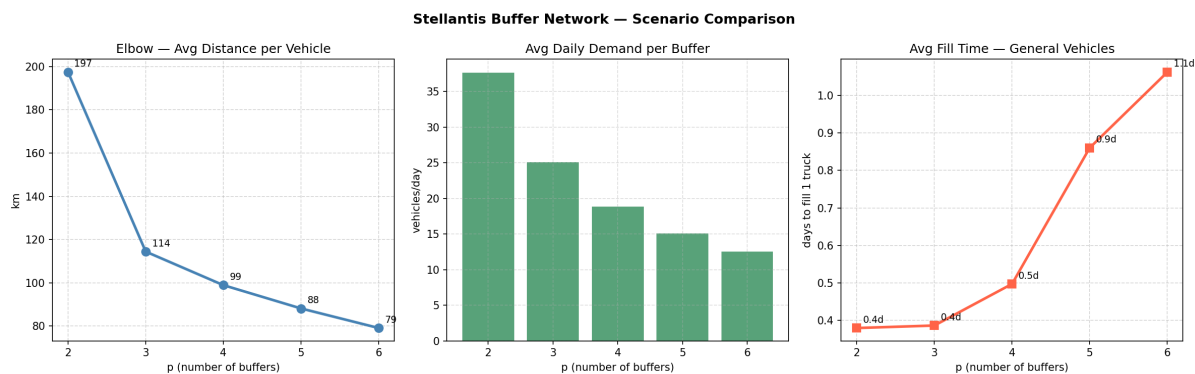


FIGURE 3.3 – Comparaison des scénarios : distance par véhicule, demande par buffer et temps de remplissage en fonction de p

L'analyse de la courbe de distance suit une logique de **point de coude (elbow)** : le passage de $p = 2$ à $p = 3$ fait chuter la distance moyenne par véhicule de **197 à 131 km**, soit une réduction de **34 %**. Au-delà, les gains deviennent marginaux : 105 km à $p = 4$ (–20 % supplémentaire), 95 km à $p = 5$ (–9 %) et 86 km à $p = 6$ (–10 %).

Parallèlement, le temps de remplissage moyen d'un camion standard reste très favorable jusqu'à $p = 3$:

- **Alger : 5,8 h** pour un camion standard ;
- **Jijel : 7,0 h** pour un camion standard ;
- **Oran : 15,1 h** (0,63 jour) pour un camion standard – flux plus faible dû au moindre volume de la région Ouest.

À partir de $p = 4$, les nouveaux buffers ajoutés (Batna, Djelfa, Annaba) reçoivent des flux trop faibles pour remplir un camion rapidement : le temps de remplissage à Jijel passe à **24,5 h** dès $p = 4$, et celui de Djelfa atteint **38,9 h** à $p = 5$. Ces temps d'attente allongés se traduisent par une immobilisation prolongée des véhicules en buffer, augmentant les besoins de stockage et les charges fixes associées.

Élimination du scénario à deux buffers. Bien qu'il serve de référence pour mesurer la réduction de distance, le scénario $p = 2$ (Alger, Oran) a été **écarté pour un motif de couverture** : avec seulement deux centres, le réseau ne dessert pas correctement l'ensemble des régions demandeuses. La zone Est, fortement demandeuse, reste rattachée au buffer d'Alger au prix de distances excessives (jusqu'à 2 314 km), ce qui contredit l'objectif même de décentralisation. Le choix se restreint donc aux configurations $p \geq 3$.

Parmi les configurations $p \geq 3$, le scénario **p = 3 (Alger, Jijel, Oran)** se distingue déjà sur le *critère de distance* : il capte l'essentiel de la réduction (−34 %) tout en préservant des flux suffisants pour un remplissage rapide des camions. Conformément au parti pris méthodologique retenu – **privilégier la distance plutôt que le stock** – il constitue le **candidat privilégié à ce stade**. Ce choix n'est toutefois pas figé ici : les scénarios $p = 3$ à 6 sont **tous développés** dans les sections suivantes (flotte de dépannage, analyse des stocks), et le choix final est arrêté à l'issue d'une **synthèse comparative** (section 3.8) consolidant distance, flotte, capacité de stockage et robustesse.

3.2.6 Analyse comparée des scénarios

3.2.6.1 Structure géographique et évolution des zones

Le tableau 3.5 et les cartes de la figure 3.2 permettent de suivre la **recomposition progressive des zones de chalandise** à mesure que le nombre de buffers augmente :

- **p = 2** – le territoire se partage entre un vaste buffer **Centre-Est** (Alger, 48 wilayas, 61 véh/j) et un buffer **Ouest** (Oran, 10 wilayas, 14,3 véh/j). La zone d'Alger est surdimensionnée et s'étend jusqu'à 2 314 km ;
- **p = 3** – l'ouverture de **Jijel** scinde le bloc Est : Alger se recentre sur le Centre (18 wilayas, 34,5 véh/j) et Jijel absorbe la façade Est (18 wilayas, 26,4 véh/j) ;
- **p = 4** – **Batna** prend en charge les Aurès et le Sud-Est (12 wilayas), déchargeant Jijel qui se réduit à la bande côtière Est (9 wilayas) ;
- **p = 5** – **Djelfa** capte les Hauts-Plateaux centraux et le Sud (5 wilayas), allégeant Alger et Batna ;
- **p = 6** – **Annaba** isole l'extrême Nord-Est (3 wilayas : Skikda, Annaba, Souk Ahras), fragmentant davantage la zone de Jijel.

Deux invariants structurels se dégagent. D'une part, le buffer d'**Oran** conserve une zone quasi stable (région Ouest et Grand Sud-Ouest, ≈ 14 véh/j) quel que soit le scénario : son rôle d'origine des véhicules et l'éloignement de l'Ouest le rendent peu sensible au découpage de l'Est. D'autre part, chaque buffer additionnel **prélève sa zone sur les buffers existants** : la demande quotidienne d'Alger décroît mécaniquement de 61 à 30,9 véh/j entre $p = 2$ et $p = 6$, illustrant la dilution des flux évoquée à la section 3.2.5.

3.2.6.2 Durées de séjour en buffer par scénario

Un véhicule arrivant dans un buffer attend l'accumulation d'un chargement complet avant d'être expédié vers l'agent. Cette durée de séjour, directement liée au flux entrant, conditionne les besoins en capacité de stockage analysés en section 3.4. Le tableau 3.6 présente, **pour tous les scénarios**, les statistiques de séjour observées par buffer sur la période étudiée.

TABLE 3.6 – Durée de séjour des véhicules en buffer, par scénario

p	Buffer	Véhicules traités	Séjour moy. (j)	Séjour max. (j)
2	Oran	47 267	2,9	244
	Alger	38 090	5,0	264
	Oran	47 267	2,9	244
	Alger	21 558	5,1	264
	Jijel	16 532	5,0	136
4	Oran	47 267	2,9	244
	Alger	20 734	5,1	264
	Batna	12 548	5,1	135
	Jijel	4 808	4,8	136
5	Oran	47 267	2,9	244
	Alger	19 291	5,1	264
	Batna	11 260	5,2	99
	Djelfa	2 841	4,5	135
	Jijel	4 808	4,8	136
6	Oran	47 267	2,9	244
	Alger	19 291	5,1	264
	Annaba	2 609	4,4	136
	Batna	10 715	5,2	99
	Djelfa	2 841	4,5	135
	Jijel	2 744	5,1	84

Le séjour moyen se stabilise autour de **5 jours** pour les buffers du Nord (Alger, Jijel, Batna) dans tous les scénarios : il traduit la variabilité des arrivées, les véhicules attendant l'accumulation d'un chargement les jours de faible production. Oran présente systématiquement le séjour le plus court (**2,9 jours**), grâce à un flux plus régulier et à des wilayas plus proches. Le séjour *maximum* (jusqu'à 264 jours à Alger) correspond, dans chaque scénario, aux véhicules destinés aux wilayas sahariennes à très faible demande, pour lesquelles un chargement complet nécessite plusieurs semaines. On note enfin que le volume traité par les petits buffers décroît fortement (Jijel passe de 16 532 véhicules à $p = 3$ à 2 744 à $p = 6$), ce qui annonce la dégradation du taux de remplissage et la hausse des coûts de stockage analysées plus loin.

Conclusion – Localisation p-médian

Le modèle p-médian, appliqué aux données réelles de livraison de Stellantis El Djazaïr, fournit pour chaque valeur de p la localisation optimale des buffers et l'affectation des wilayas. Le scénario $p = 2$ est écarté pour insuffisance de couverture ; les scénarios $p = 3$ à 6 restent en lice. Sur le seul **critère de distance**, le réseau à **trois buffers (Alger, Jijel, Oran)** apparaît comme le candidat privilégié : il réduit la distance moyenne pondérée par véhicule de **197 à 131 km (–34 %)** tout en préservant des temps de remplissage compatibles avec une opération quotidienne. Les sections suivantes développent **l'ensemble des scénarios** sur les plans de la flotte de dépannage (section 3.3) et de la capacité de stockage (section 3.4), avant la synthèse comparative (section 3.8).

3.3 Affectation des canaux de distribution : retrait client et dépannage

3.3.1 Principe : deux canaux de distribution aval

Une fois le réseau de buffers déterminé par le modèle p-médian (section 3.2), une seconde question se pose : **comment le véhicule rejoint-il son acquéreur final** depuis le buffer dont relève sa wilaya ? Deux canaux coexistent :

- le **retrait client** (*self-pickup*) : le client se déplace jusqu'au buffer pour récupérer lui-même son véhicule. Ce canal n'engage aucun coût de transport pour Stellantis, mais suppose un déplacement et une journée mobilisée pour le client ;
- le **dépannage** (*livraison à domicile* par porte-voiture ou plateau) : le véhicule est acheminé jusqu'au domicile du client. Ce canal offre un service premium, mais mobilise la flotte et engendre un coût facturé au client.

La répartition entre ces deux canaux conditionne directement le **dimensionnement de la flotte de dépannage**. Elle est déterminée en deux temps : (i) un **modèle microéconomique** établit, pour chaque couple buffer–wilaya, le canal économiquement et physiquement pertinent ; (ii) un **calibrage de marché** fixe le ratio global livraison/retrait à partir de références internationales adaptées au contexte algérien.

3.3.2 Cadre microéconomique : la contrainte de liquidité élastique au revenu

Le seuil d'acceptabilité de la livraison. Le choix d'un client entre retrait et dépannage dépend d'un **seuil d'acceptabilité** (ou consentement maximal à payer), noté V_{drop} : si le prix facturé de la livraison dépasse ce seuil, le client y renonce et vient retirer lui-même son véhicule. Toute la difficulté consiste à *estimer* ce seuil dans le contexte algérien, en l'absence de données transactionnelles historiques.

Pourquoi le standard forfaitaire ne s'applique pas. La littérature internationale du *retail* automobile modélise classiquement ce seuil comme une **fraction fixe** α_{base} de la valeur du véhicule, de l'ordre de $\alpha_{\text{base}} = 3\%$ sur les marchés matures (Royaume-Uni, Europe de l'Ouest). Or, ce taux a été calibré sur des économies à **haut pouvoir d'achat** : appliqué tel quel au véhicule de référence – la **Fiat Grande Panda**, de prix $P = 2\,350\,000$ DZD –, il donnerait un seuil de $0,03 \times 2\,350\,000 = 70\,500$ DZD. Rapporté au salaire net moyen algérien ($\approx 45\,000$ DZD/mois), ce montant représenterait **plus d'un mois et demi de revenu** pour une simple livraison : il est **comportementalement irréaliste**. Transposer directement « 3 % du salaire des Britanniques » à notre cas reviendrait à surestimer massivement le consentement à payer. Il est donc nécessaire de **recalculer un coefficient propre au marché algérien**.

Le coefficient ajusté au revenu. Nous substituons au taux forfaitaire une **contrainte de liquidité élastique au revenu**, inspirée du cadre microéconomique *biens-loisir* de la théorie du choix discret : le consentement à payer n'est pas indexé sur la valeur de l'actif, mais sur la **liquidité disponible** du ménage, approchée par le salaire national. Le coefficient de friction ajusté α_{mix} est obtenu en pondérant le standard international par le **ratio revenu/prix**, amorti par un exposant γ :

$$\alpha_{\text{mix}} = \alpha_{\text{base}} \left(\frac{S}{P} \right)^{\gamma} \quad \text{avec } \gamma = 0,5 \quad (3.8)$$

où :

- $\alpha_{\text{base}} = 3\%$: friction transactionnelle nominale (standard international du *retail* automobile);
- $S = 45\,000$ DZD : salaire net mensuel moyen en Algérie (source : ONS);
- $P = 2\,350\,000$ DZD : prix du véhicule de référence (Fiat Grande Panda);
- $\gamma = 0,5$: exposant d'**amortissement** (élasticité de la friction au ratio revenu/prix). La valeur $\gamma = 0,5$ correspond à une **racine carrée**, qui atténue la contraction du seuil : sans amortissement ($\gamma = 1$), le coefficient s'effondrerait de façon excessive;
- α_{mix} : coefficient de friction ajusté au marché local.

L'application numérique donne :

$$\alpha_{\text{mix}} = 0,03 \times \sqrt{\frac{45\,000}{2\,350\,000}} = 0,03 \times \sqrt{0,01915} \approx 0,415\% \quad (3.9)$$

Le **plafond de consentement à payer** pour la livraison s'en déduit :

$$V_{\text{drop}} = P \times \alpha_{\text{mix}} = 2\,350\,000 \times 0,00415 \approx 9\,756 \text{ DZD} \quad (3.10)$$

Ce montant de **9756 DZD** – environ sept fois inférieur au seuil forfaitaire de 70 500 DZD – constitue le *point de bascule comportemental* : au-delà, le client renonce à la livraison (aversion à la perte de liquidité) et opte pour le retrait. Il représente une « journée et demie » de salaire, ordre de grandeur cohérent avec un service premium ponctuel sur le marché algérien.

Affinage spatial des frontières. La projection des zones de service autour de chaque buffer est enfin affinée par des **facteurs de distorsion anisotropes** dérivés de la matrice de temps de trajet OSRM et lissés par **spline cubique périodique** : les frontières épousent ainsi la friction réelle du réseau routier (reliefs, corridors) plutôt qu'un rayon circulaire idéalisé.

3.3.3 Modèle de décision : les deux fonctions de coût et le double limiteur

Construction des deux fonctions de coût. Pour chaque couple buffer-wilaya distant de d kilomètres, le modèle compare le coût des deux canaux du point de vue du client.

Coût du dépannage $P_{\text{dep}}(d)$. Il n'est pas postulé arbitrairement : il est **repris directement de la régression du prix de dépannage** réalisée dans le diagnostic (chapitre 1, tableau 1.26), qui ajuste le prix facturé des interventions de dépannage en fonction de la distance ($R^2 > 0,80$). Cette régression fournit :

$$P_{\text{dep}}(d) = \underbrace{5\,313,6}_{b \text{ (activation)}} + \underbrace{71,52}_{m \text{ (DZD/km)}} d \quad (3.11)$$

où $b = 5\,313,6$ DZD est le **coût fixe d'activation** d'une intervention (mobilisation du plateau, indépendant de la distance) et $m = 71,52$ DZD/km le **coût marginal kilométrique**, tous deux issus de l'observation réelle.

Coût du retrait $C_{\text{pickup}}(d)$. Il représente le coût *supporté par le client* qui vient chercher son véhicule : un aller-retour en taxi plus la valeur du temps perdu :

$$C_{\text{pickup}}(d) = \underbrace{4,5}_{\text{taxi (DZD/km)}} d + \underbrace{2\,045,45}_{w \text{ (journée perdue)}} \quad (3.12)$$

où le tarif taxi est pris à 4,5 DZD/km (aller-retour), et $w = 2\,045,45$ DZD est la **perte d'une journée de travail**, évaluée comme le salaire mensuel rapporté à 22 jours ouvrés : $w = S/22 = 45\,000/22$.

Règle de décision : double limiteur. L'affectation d'une wilaya à l'un des deux canaux résulte d'un **double limiteur** :

- **Limiteur 1 – physique/temporel.** Si le temps de trajet aller t dépasse $T_{\max} = 4$ heures, le retrait est jugé *physiquement infaisable* (déplacement aller-retour excédant une journée) ; le client est alors servi par dépannage dès lors que celui-ci reste soutenable ($P_{\text{dep}} \leq V_{\text{drop}}$) ;
- **Limiteur 2 – économique.** En deçà de 4 heures, le dépannage n'est offert que tant que son prix reste sous le plafond de liquidité V_{drop} défini en équation (3.10).

Rayon maximal de dépannage. La distance au-delà de laquelle le prix du dépannage excède le plafond de consentement à payer s'obtient en résolvant $P_{\text{dep}}(d) = V_{\text{drop}}$:

$$d_{\text{max}}^{\text{dep}} = \frac{V_{\text{drop}} - b}{m} = \frac{9\,756 - 5\,313,6}{71,52} \approx \mathbf{62\ km} \quad (3.13)$$

La figure 3.4 synthétise cette logique : elle superpose les deux fonctions de coût et le plafond V_{drop} , et délimite la **zone de dépannage** soutenable ($d \leq 62$ km, sous le plafond) au-delà de laquelle seul le retrait demeure pertinent.

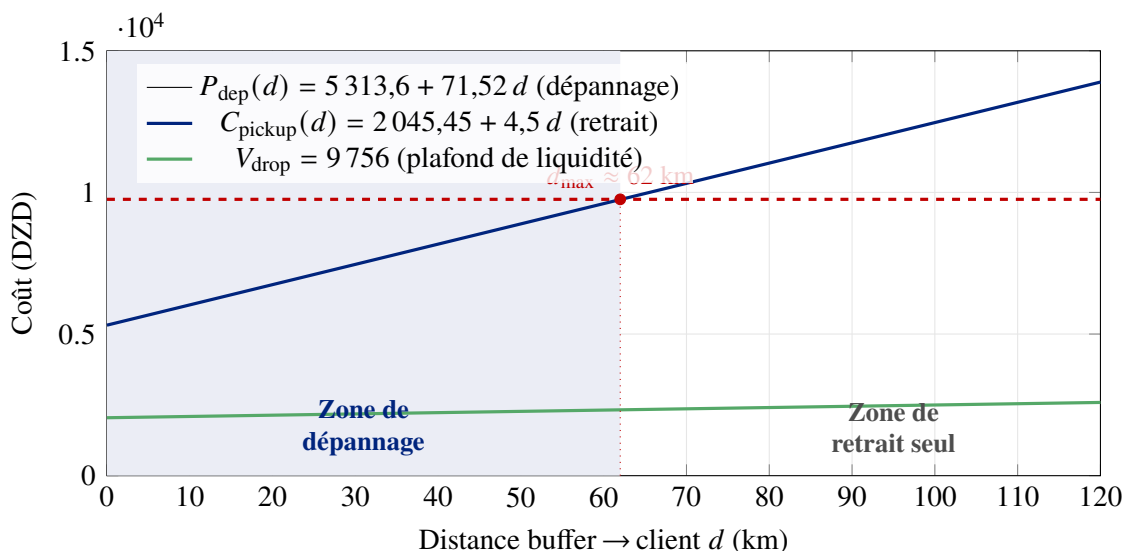


FIGURE 3.4 – Modèle de décision retrait vs dépannage : coûts comparés en fonction de la distance et plafond de liquidité V_{drop} . Le dépannage n'est soutenable que pour $d \leq 62$ km ; au-delà, son prix dépasse le consentement à payer et le retrait s'impose.

L'application de ce double limiteur à la matrice routière réelle OSRM, combinée aux facteurs de distorsion anisotropes, produit les cartes opérationnelles de la figure 3.5. Pour chaque scénario, la zone de **retrait client** (orange, atteignable en moins de 4 heures) et la zone de **dépannage** budgétairement soutenable ($\leq 9\,756$ DZD) sont projetées autour de chaque buffer. On observe que la multiplication des buffers densifie la couverture des zones de retrait, mais que les zones de dépannage restent circonscrites au voisinage immédiat de chaque centre.

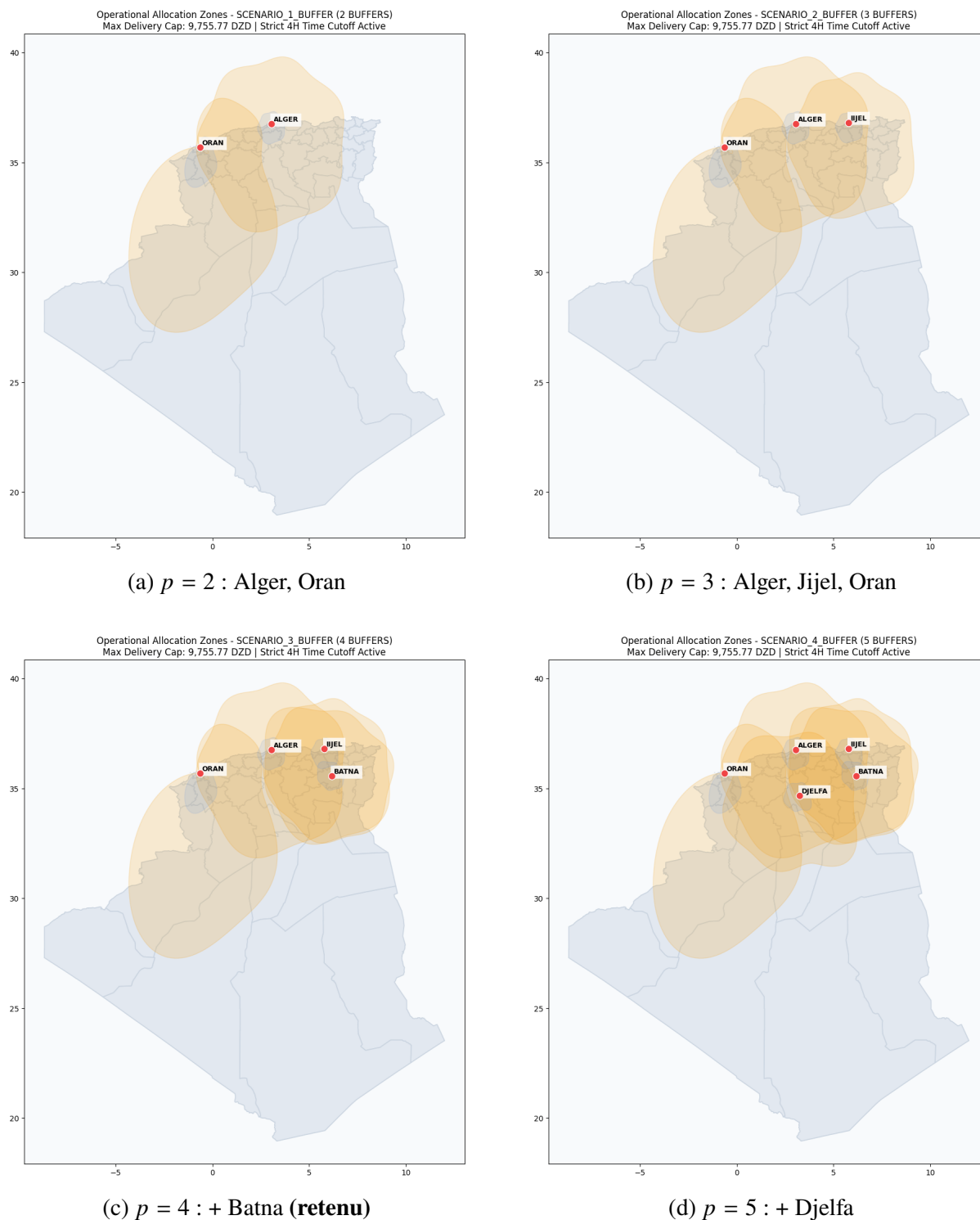
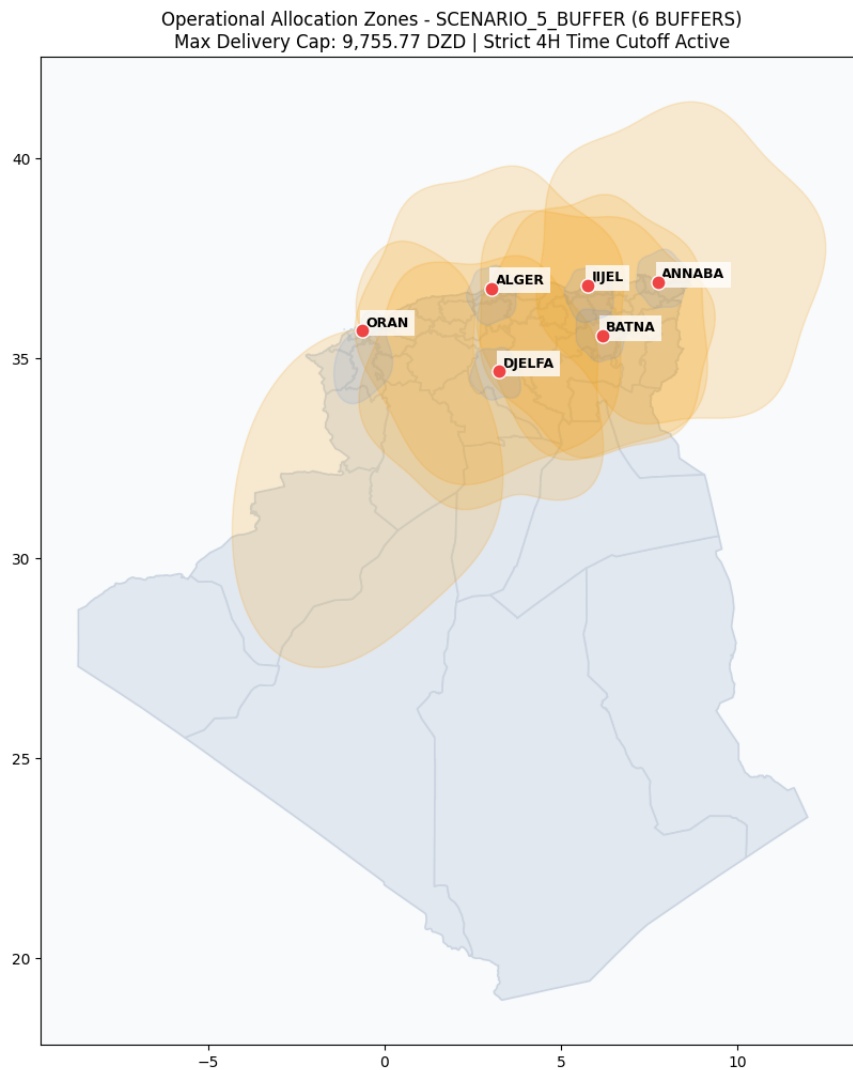


FIGURE 3.5 – Zones opérationnelles de retrait (orange, ≤ 4 h) et de dépannage ($\leq 9\,756$ DZD) par scénario – scénarios $p = 2$ à $p = 5$



(e) $p = 6$: + Annaba

FIGURE 3.5 – Zones opérationnelles de retrait (orange, ≤ 4 h) et de dépannage ($\leq 9\,756$ DZD) par scénario, projetées sur le réseau routier réel OSRM (*suite*)

La lecture de ces cartes éclaire, du point de vue de la **couverture**, le choix du nombre de buffers :

- **p = 2** – les deux centres (Alger, Oran) laissent une large part de l'**Est**, pourtant fortement demandeur, en dehors des zones de service de proximité. Ce déficit de couverture de la région à forte demande motive son **élimination** ;
- **p = 3** – l'ajout de **Jijel** comble le vide de l'Est : la couverture devient **continue** sur tout le Nord densément peuplé. Les clients situés *entre deux buffers* (zones de recouvrement) peuvent en outre être rattachés indifféremment à l'un ou à l'autre, ce qui ajoute de la **souplesse** d'affectation ;
- **p = 5** (ajout de **Djelfa**) – ce buffer vise explicitement à **couvrir le Sud algérien**, jusque-là desservi uniquement à très longue distance depuis les centres du Nord ;
- **p = 6** (ajout d'**Annaba**, aux côtés de Batna et Jijel) – **Annaba** ne couvre qu'une petite zone mais se situe à la frontière : elle ouvre une porte vers la **Tunisie**, atout pour les échanges transfrontaliers compte tenu de la demande dense de l'extrême Est. Dans cette même région, **Batna couvre mieux que Jijel** : la large emprise de Jijel s'étend en grande partie *sur la mer* (couverture « perdue »), alors que Batna rayonne sur un arrière-pays densément peuplé ; Batna est en outre **moins coûteuse** que Jijel et mieux positionnée pour le **GPL**, à proximité du prestataire de kits gaz **Ghazal**. **Jijel** conserve néanmoins une valeur **stratégique** pour l'**import/export futur** : son buffer constitue une infrastructure « prête à l'emploi » en cas d'ouverture maritime.

Ces considérations de couverture et de positionnement stratégique, qualitatives, complètent les critères quantitatifs et seront réintégrées dans la synthèse finale (section 3.8).

3.3.4 Calibrage du ratio livraison/retrait

Le modèle microéconomique délimite *où* la livraison est possible ; il reste à estimer *quelle part* des clients y recourt effectivement. En l'absence de données micro-transactionnelles historiques sur le réseau, ce ratio est calibré par une analyse de **benchmark macro-structurel** positionnant le projet Stellantis sur un spectre validé à l'échelle internationale, documenté notamment par l'ICDP (*International Car Distribution Programme*) et les pratiques automobiles de Capgemini et McKinsey.

Ce spectre situe la part de la **livraison à domicile** (dépannage) dans une fourchette **5 % – 15 %**, les **85 à 95 %** restants relevant du retrait :

- le **plancher de 5 %** caractérise les **marchés traditionnels à forte friction** : les démarches administratives (immatriculation, assurance, financement) sont **centralisées et lourdes**, le risque de transport est supporté par le client, et la confiance dans la livraison est faible. Dans ces contextes *bureaucratiques*, la quasi-totalité des clients se déplacent eux-mêmes et seuls ~5 % recourent à la livraison ;
- le **plafond de 15 %** caractérise les **écosystèmes matures et digitalisés** : **démarches administratives simples** (signature dématérialisée), assurance transporteur intégrée et logistique de confiance. La livraison y est facilitée, mais reste **bridée à 15 %** par la préférence durable d'environ 85 % des clients pour la *prise de possession immédiate* de leur véhicule.

Le positionnement du cas Stellantis Algérie résulte d'un arbitrage entre ces deux pôles. Le tableau 3.7 l'établit selon quatre **vecteurs structurels** : chaque vecteur pousse le ratio vers le haut (↑, davantage de livraison) ou vers le bas (↓, davantage de retrait).

TABLE 3.7 – Grille d'évaluation du positionnement sur le spectre livraison/retrait

Vecteur structurel	Configuration Stellantis Algérie	Effet sur le ratio
Traitement administratif	Finalisé par un agent de proximité près du domicile, avant libération du véhicule	↑
Accessibilité des buffers	Buffers urbains intégrés, accessibles en taxi à faible coût	↓
Risque et responsabilité transport	« Stellantis Protection Guarantee » : prise en charge intégrale des dommages de transport	↑
Environnement de remise	Zone de vérification dédiée, propre et structurée	ancrer

Ces vecteurs sont **antagonistes** : la décharge administrative (agents de proximité) et la garantie OEM « Protection Guarantee » tirent le ratio *vers le haut*, tandis que l'accessibilité urbaine des buffers (retrait facile en taxi) le tire *vers le bas*. Leur résultante place le cas Stellantis Algérie **au milieu du spectre**, à équidistance du plancher et du plafond :

Ratio de répartition retenu
10 % Dépannage (livraison) / 90 % Retrait client

Ce ratio de **10 %** sert de cible structurelle pour le dimensionnement de la flotte de dépannage, à maintenir jusqu'à l'accumulation d'au moins 12 mois de données transactionnelles réelles permettant de basculer d'un calibrage synthétique vers un suivi empirique.

3.3.5 Dimensionnement de la flotte de dépannage

Une fois la part de dépannage fixée à 10 %, il reste à dimensionner la **flotte dédiée** de plateaux nécessaires pour absorber ces livraisons à domicile. Le principe est de cumuler, pour chaque buffer, le **temps de mobilisation** qu'imposent toutes les livraisons de sa zone, puis de le convertir en nombre de camions.

Charge de travail d'un buffer. La charge H_{buffer} (en heures-camion) est la somme, sur l'ensemble des livraisons i rattachées au buffer et réalisables en moins de 4 heures, de la **durée aller-retour** mobilisée par chacune :

$$H_{\text{buffer}} = \sum_{i | t_i \leq T_{\text{max}}} 2 t_i \quad (3.14)$$

où :

- i : une **livraison** (un véhicule à livrer) de la zone du buffer ; la somme parcourt toutes les livraisons, de sorte que le **volume** de la zone est pris en compte par le *nombre de termes* (et non par un facteur de demande explicite) ;
- t_i : temps de trajet *aller* (heures) du buffer vers le client de la livraison i ; $2 t_i$ est donc l'aller-retour ;
- $T_{\text{max}} = 4$ h : seuil de faisabilité d'une mission de dépannage (au-delà, la livraison sort du périmètre journalier).

Conversion en nombre de camions. En appliquant la cible de **10 %** de livraison et une durée de **poste** de 8 heures par camion et par jour, le nombre de porte-voitures de dépannage requis par buffer s'écrit :

$$N_{\text{camions}} = \left\lceil \frac{0,10 \times H_{\text{buffer}}}{8} \right\rceil \quad (3.15)$$

où 0,10 est la part de dépannage (section 3.3.4), 8 la durée d'un poste (h/jour/camion), $\lceil \cdot \rceil$ l'arrondi à l'entier supérieur (un buffer actif requiert au minimum un camion), et N_{camions} la flotte de dépannage du buffer.

Le tableau 3.9 présente le résultat de ce calcul **pour tous les scénarios**, buffer par buffer, ainsi que la flotte totale requise par scénario.

TABLE 3.9 – Dimensionnement de la flotte de dépannage par scénario (cible 10 %)

p	Buffer	Charge totale (h)	Charge 10 % (h)	Camions
2	Alger	202,6	20,3	3
	Oran	39,5	4,0	1
	Total	242,1	24,2	4
	Alger	110,1	11,0	2
	Jijel	139,2	13,9	2
	Oran	39,5	4,0	1
	Total	288,8	28,9	5
	Alger	102,1	10,2	2

Table 3.9 (suite)

p	Buffer	Charge totale (h)	Charge 10 % (h)	Camions
	Batna	101,5	10,2	2
	Jijel	30,2	3,0	1
	Oran	39,5	4,0	1
	Total	273,3	27,3	6
5	Alger	86,6	8,7	2
	Batna	93,9	9,4	2
	Djelfa	6,8	0,7	1
	Jijel	30,2	3,0	1
	Oran	39,5	4,0	1
	Total	257,0	25,7	7
6	Alger	86,6	8,7	2
	Annaba	6,2	0,6	1
	Batna	93,9	9,4	2
	Djelfa	6,8	0,7	1
	Jijel	11,9	1,2	1
	Oran	39,5	4,0	1
	Total	244,9	24,5	8

La lecture par scénario fait apparaître un **paradoxe de la fragmentation** : alors que la charge de travail *totale* décroît légèrement avec p (de 242 h à $p = 2$ jusqu'à 245 h à $p = 6$, car les buffers additionnels raccourcissent les trajets), le **nombre de camions augmente** (de 4 à 8). En effet, l'arrondi de l'équation (3.15) impose au minimum **un camion de service** par buffer, même pour une charge marginale. La frontière de l'efficacité se situe à $p = 4$: jusqu'à ce niveau, **chaque camion reste correctement chargé** – à $p = 4$, Alger et Batna mobilisent 2 camions chacun pour des charges substantielles (10,2 h), Jijel et Oran 1 camion (3 à 4 h). Au-delà, l'ajout de **Djelfa** (0,7 h de charge à $p = 5$) puis d'**Annaba** (0,6 h à $p = 6$) mobilise des camions entiers pour des buffers **quasi inactifs** : ces scénarios $p \geq 5$ **gaspillent** un à trois camions. Le critère de flotte plaide donc pour un réseau **ni trop centralisé** ($p=2$, déjà écarté) **ni trop fragmenté** ($p \geq 5$), c'est-à-dire $p = 3$ ou $p = 4$.

Le code d'implémentation du modèle d'affectation des canaux (contrainte de liquidité, double limiteur, cartographie des zones de service et dimensionnement de la flotte) est fourni en annexe B.

Conclusion – Canaux de distribution

La distribution aval s'articule autour de deux canaux : le **retrait client** (90 %) et le **dépannage** (10 %). Un modèle de **contrainte de liquidité élastique au revenu** fixe le plafond de consentement à payer la livraison à **9756 DZD**, délimitant une zone de dépannage de rayon ≈ 62 km autour de chaque buffer. Le ratio **10/90**, calibré sur les références ICDP et Capgemini, conduit à une flotte de dépannage croissant avec le nombre de buffers : **4 camions** pour $p = 2$, **5** pour $p = 3$, puis **6, 7 et 8** pour $p = 4$ à 6. La fragmentation des flux pénalise les réseaux étendus, qui mobilisent des camions entiers sur des buffers quasi inactifs.

3.4 Analyse des stocks et planification de capacité par scénario

Une fois le réseau de buffers localisé (section 3.2) et les canaux de distribution définis (section 3.3), il reste à **dimensionner la capacité de stockage** de chaque buffer. Un buffer sous-dimensionné sature et refoule les flux ; un buffer sur-dimensionné immobilise inutilement du foncier et du capital. Cette section reconstitue, à partir des flux réels, la dynamique du stock journalier dans chaque buffer pour chacun des scénarios, puis en déduit la capacité requise et sa projection à l'horizon 2028.

3.4.1 Méthodologie de planification de capacité

Pour chaque buffer d'un scénario donné, la série du **stock journalier** est reconstituée par bilan cumulé des entrées (véhicules arrivant de l'usine) et des sorties (chargements expédiés vers les agents). La capacité locative C est ensuite déterminée par deux critères complémentaires :

- **Couverture de 90 % des jours** : la capacité doit couvrir le stock observé au moins 90 % du temps, soit le quantile à 90 % de la série, P_{90} ;
- **Plafond de débordement de 20 %** : le pic absolu de stock $S_{\max}$ ne doit pas excéder la capacité de plus de 20 %, soit $C \geq S_{\max}/1,20$.

La capacité retenue est le maximum de ces deux contraintes :

$$C = \max\left(P_{90}, \frac{S_{\max}}{1,20}\right) \quad (3.16)$$

où :

- C : capacité locative retenue (nombre de places) ;
- P_{90} : **quantile à 90 %** de la série du stock journalier (niveau couvert 90 % du temps) ;

- $S_{\max}$: **pic absolu** de stock observé sur la période ; le facteur 1,20 autorise un dépassement de la capacité de 20 % au plus au moment de la pointe.

À ce dimensionnement s'ajoutent trois indicateurs de pilotage : la **tendance** mensuelle du stock (pente d'une régression linéaire $S(t) = at + b$, avec son coefficient de détermination R^2), le **nombre de jours de débordement** (*overflow*, où le stock dépasse C) et leur **part** sur la période. Le code correspondant (*BLOCK H*) est fourni en annexe C.

Construction et lecture des graphiques par scénario. Pour chaque scénario, un graphique (figure 3.6) superpose, **buffer par buffer** : (i) la **courbe du stock journalier** sur toute la période d'observation (juin 2024–mars 2026) ; (ii) sa **droite de tendance** linéaire (trait mixte) ; et (iii) la **bande de capacité** retenue C (trait horizontal en tireté). La légende indique, pour chaque buffer, la pente de tendance (en véh/mois, avec R^2) et le niveau de capacité. La lecture est directe : une courbe qui reste *majoritairement sous* sa bande traduit un dimensionnement **sain** ; les pointes qui la franchissent sont les **jours de débordement** ; une tendance **ascendante** signale une accumulation structurelle (le buffer se remplit plus vite qu'il ne se vide), tandis qu'une tendance **descendante** traduit un désengorgement. L'écartement des courbes entre elles illustre enfin la **répartition des flux** entre les buffers d'un même scénario.

3.4.2 Résultats par scénario

Le tableau 3.10 synthétise, pour chaque scénario, la capacité totale requise et le taux de débordement maximal observé parmi les buffers. Le scénario 1 correspond à la situation **centralisée actuelle** (Oran seul) ; les scénarios suivants ajoutent progressivement des buffers conformément aux résultats du modèle p-médian.

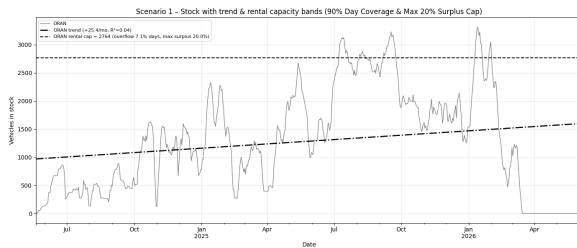
TABLE 3.10 – Capacité de stockage requise et débordement par scénario

Scénario	Buffers	Capacité totale (places)	Débordement max. (%)
1	Oran	2 764	7,1 %
2	Oran, Alger	3 366	2,5 %
3	Oran, Alger, Jijel	3 448	2,5 %
4	Oran, Alger, Batna, Jijel	3 496	2,5 %
5	Oran, Alger, Batna, Djelfa, Jijel	3 540	2,5 %
6	Oran, Alger, Annaba, Batna, Djelfa, Jijel	3 554	2,5 %

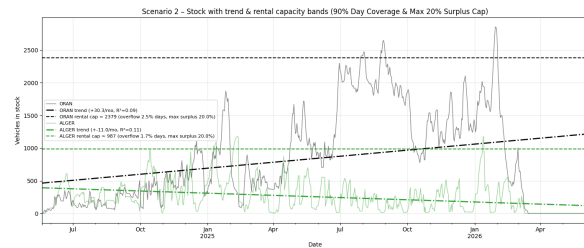
Deux enseignements se dégagent. D'une part, le passage de la configuration centralisée (scénario 1) à toute configuration décentralisée **divise par près de trois le taux de débordement** du

nœud principal (de 7,1 % à 2,5 %) : la répartition des flux soulage la pression sur Oran. D'autre part, la capacité totale **croît légèrement** avec le nombre de buffers (de 2 764 à 3 554 places) : la fragmentation des flux réduit l'effet de mutualisation du stock, chaque buffer devant conserver une réserve propre. Ce surcoût marginal de capacité est le prix de la décentralisation – largement compensé par la réduction des distances (section 3.2) et du risque de saturation.

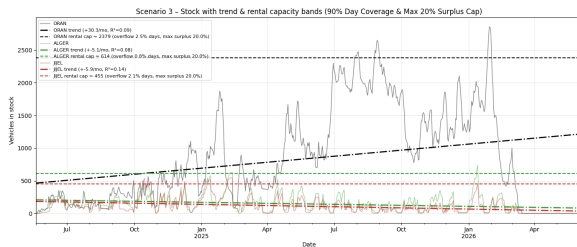
Les courbes de la figure 3.6 présentent, pour chaque scénario, l'évolution du stock journalier de chaque buffer, sa tendance et la bande de capacité locale retenue.



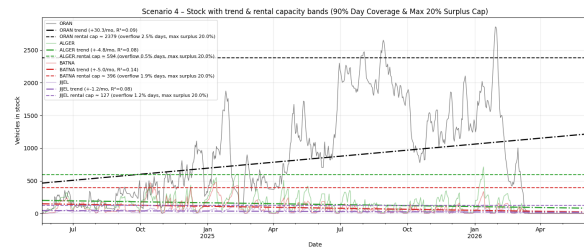
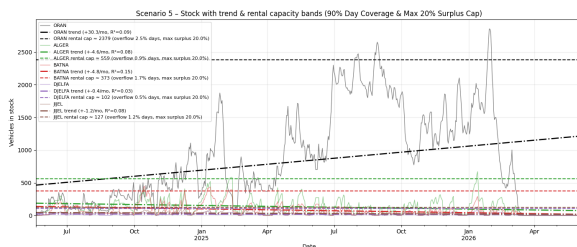
(a) Scénario 1 : Oran (centralisé)



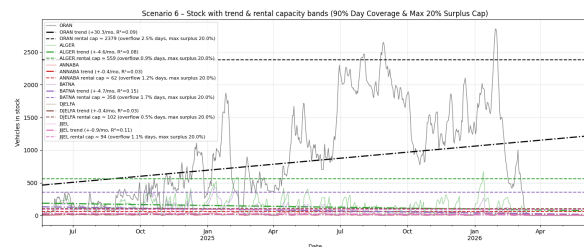
(b) Scénario 2 : Oran, Alger



(c) Scénario 3 : Oran, Alger, Jijel

(d) Scénario 4 : + Batna (**retenu**)

(e) Scénario 5 : + Djelfa



(f) Scénario 6 : + Annaba

FIGURE 3.6 – Évolution du stock journalier, tendance et bande de capacité locale par buffer, pour chaque scénario

3.4.3 Dimensionnement détaillé par scénario

Le tableau 3.12 applique la règle (3.16) à **chaque buffer de chaque scénario** : capacité retenue, pic absolu $S_{\max}$, quantile P_{90} , tendance mensuelle et taux de débordement.

TABLE 3.12 – Dimensionnement de capacité par buffer et par scénario

p	Buffer	Cap. retenue	Pic	P_{90}	Tend. (véh/mois)	Déb. (%)
1	Oran	2 764	3 317	2 660	+25,4	7,1
2	Oran	2 379	2 855	1 959	+30,3	2,5
	Alger	987	1 184	572	-11,0	1,7
	Oran	2 379	2 855	1 959	+30,3	2,5
	Alger	614	737	313	-5,1	0,8
	Jijel	455	546	260	-5,9	2,1
4	Oran	2 379	2 855	1 959	+30,3	2,5
	Alger	594	713	304	-4,8	0,5
	Batna	396	475	198	-5,1	1,9
	Jijel	127	152	70	-1,2	1,2
5	Oran	2 379	2 855	1 958	+30,3	2,5
	Alger	559	671	280	-4,6	0,9
	Batna	373	448	182	-4,8	1,7
	Djelfa	102	123	42	-0,4	0,5
	Jijel	127	152	70	-1,2	1,2
6	Oran	2 379	2 855	1 958	+30,3	2,5
	Alger	559	671	280	-4,6	0,9
	Annaba	62	75	40	-0,4	1,2
	Batna	358	430	176	-4,7	1,7
	Djelfa	102	123	42	-0,4	0,5
	Jijel	94	113	39	-0,9	1,1

Trois constats transversaux ressortent. **(1)** La capacité de chaque buffer est presque toujours dictée par le **pic absolu** ($C = S_{\max}/1,20$) plutôt que par le P_{90} , signe d'une demande **irrégulière** à forte pointe. **(2)** Le buffer d'**Oran** conserve dans tous les scénarios une tendance **positive** (+30 véh/mois) et un débordement de 2,5 % : en tant qu'origine des véhicules, il accumule structurellement du stock. **(3)** À l'inverse, tous les buffers du Nord affichent des tendances **négatives** (de -5 à -11 véh/mois), preuve que la décentralisation *désengorge* progressivement ces nœuds. Le scénario centralisé ($p = 1$) reste le plus exposé avec **7,1 %** de jours de débordement, contre au plus 2,5 % dès qu'un second buffer est ouvert.

3.4.4 Projection à l'horizon 2028 (montée en cadence)

La montée en cadence vers **135 000 véhicules/an** impose d'anticiper l'extension des buffers. La méthode de prévision (*BLOCK K*, annexe C) décompose le besoin additionnel en deux couches : une **croissance standard** (hausse organique des flux RESEAU et hors-RESEAU) et une **surcouche LPG** (*surcharge* liée à la montée du modèle GPL, appliquée aux seules parts concernées). Le tableau 3.13 présente le résultat **pour tous les scénarios**.

TABLE 3.13 – Projection de la capacité à l'horizon 2028, par scénario

<i>p</i>	Buffer	Cap. 2026	Std	LPG	Cap. 2028	Croiss.
1	Oran	2 764	+0	+0	2 764	+0,0 %
2	Oran	2 379	+354	+12	2 745	+15,4 %
	Alger	987	+125	+49	1 161	+17,6 %
	Oran	2 379	+354	+12	2 745	+15,4 %
	Alger	614	+126	+49	789	+28,5 %
	Jijel	455	+76	+0	531	+16,6 %
4	Oran	2 379	+354	+12	2 745	+15,4 %
	Alger	594	+110	+26	730	+22,8 %
	Batna	396	+35	+23	454	+14,6 %
	Jijel	127	+72	+0	199	+56,9 %
5	Oran	2 379	+354	+12	2 745	+15,4 %
	Alger	559	+110	+29	698	+24,9 %
	Batna	373	+35	+23	431	+15,6 %
	Djelfa	102	+12	+0	114	+12,1 %
	Jijel	127	+72	+0	199	+56,9 %
6	Oran	2 379	+354	+12	2 745	+15,4 %
	Alger	559	+110	+29	698	+24,9 %
	Annaba	62	+20	+0	82	+32,8 %
	Batna	358	+35	+23	417	+16,3 %
	Djelfa	102	+12	+0	114	+12,1 %
	Jijel	94	+54	+0	148	+57,3 %

La figure 3.7 visualise cet empilement additif (capacité de base 2026, croissance standard 2028, surcouche LPG) pour l'ensemble des scénarios et de leurs buffers.

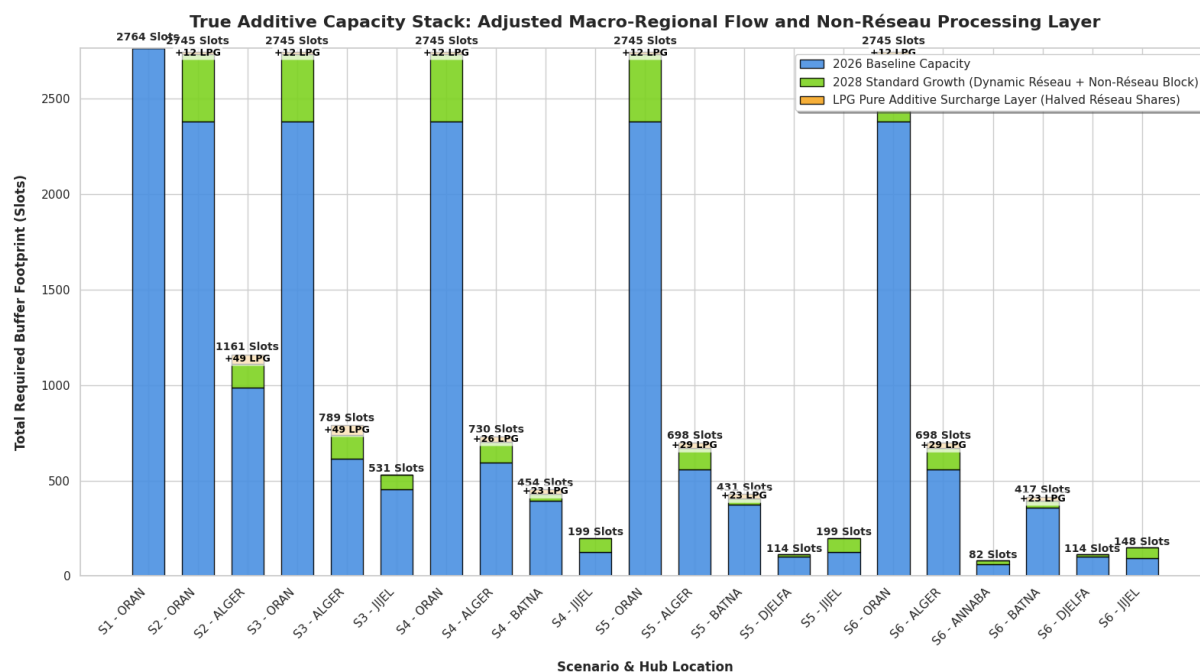


FIGURE 3.7 – Empilement additif des besoins de capacité à l’horizon 2028 : base 2026, croissance standard et surcouche LPG, par scénario et par buffer

Logique de flux et lecture des barres. La projection se comprend à la lumière du **parcours réel d’un véhicule** : à sa sortie de l’usine, il séjourne d’abord **≈2 jours dans le parc d’Oran** pour les contrôles (*checking*) avant tout acheminement ; c’est pourquoi **Oran reste systématiquement utilisé** et conserve la plus grande capacité, quel que soit le scénario. Le véhicule est ensuite **transféré vers son buffer** de rattachement, où il **attend la facturation** ; après facturation, il patiente encore **≈1 jour**, le temps que le client opte pour le **dépannage** ou le **retrait**. Chaque barre du graphique empile ainsi : en **bleu**, la capacité **de base 2026** (dimensionnée sur la production *actuelle*, soit **≈2 300 places** pour Oran) ; en **vert**, le supplément de **croissance standard 2028** ; et la **surcouche LPG**. Autrement dit, la capacité de base correspond déjà aux besoins *actuels* : c’est la **montée en cadence à l’horizon 2028** qui viendra *consommer* les places supplémentaires projetées.

Quel que soit le scénario, le buffer d’**Oran** absorbe le plus grand volume *absolu* de places supplémentaires (+366) mais une croissance *relative* modérée (+15,4 %), tandis que les buffers du Centre (Alger) exigent les croissances relatives les plus fortes (jusqu’à +28,5 %), du fait de la concentration de la demande et d’une part LPG élevée. Les petits buffers des scénarios étendus subissent en proportion les hausses les plus spectaculaires (Jijel +56,9 % à $p = 4$, +57,3 % à $p = 6$; Annaba +32,8 %), mais sur des bases si faibles que leur extension reste marginale en valeur absolue – nouvel indice de la fragilité des configurations à nombreux buffers.

Conclusion – Analyse des stocks

Le dimensionnement de la capacité, fondé sur une règle de **couverture à 90 %** plafonnée à **20 % de débordement** (équation (3.16)), montre que toute décentralisation ($p \geq 2$) **divise par près de trois** le taux de saturation du nœud principal (7,1 % à $p = 1$ contre 2,5 % ensuite), au prix d'une légère hausse de la capacité totale (de 2 764 à 3 554 places selon p). Le réseau à trois buffers requiert **2 379/614/455 places** (3 448 au total) et, à l'horizon 2028, une extension d'environ **+20 %** ($\rightarrow 2\,745/789/531$). Ces résultats, croisés avec la distance et la flotte, fondent le choix arrêté en section 3.8.

3.5 Évaluation de l'empreinte carbone des scénarios

Au-delà des coûts et de la qualité de service, la reconfiguration du réseau de distribution doit être évaluée à l'aune de son **empreinte carbone**, en cohérence avec la stratégie ESG *Dare Forward 2030* du groupe Stellantis. Cette section quantifie les émissions de CO₂ de chaque scénario afin d'intégrer la dimension environnementale dans le choix final du réseau.

3.5.1 Méthodologie : modèle d'émissions sensible à la charge

Le calcul s'appuie sur le référentiel européen **EU VECTO**, qui rapporte les émissions à la masse transportée et à la distance parcourue, via un **facteur d'émission** :

$$EF = 55 \text{ gCO}_2/(\text{t} \cdot \text{km}) \quad (3.17)$$

Les émissions d'un trajet dépendent de la masse mobilisée. Pour un trajet de distance d transportant une charge utile P avec un véhicule de masse à vide W , elles s'écrivent :

$$E = EF \times (2W + P) \times d \quad (3.18)$$

où :

- E : émissions du trajet (gCO₂) ;
- $EF = 55 \text{ gCO}_2/(\text{t} \cdot \text{km})$: facteur d'émission EU VECTO ;
- W : masse à vide du porteur (t) – 14 t pour un porte-voitures, 4,5 t pour un plateau de dépannage ;
- P : charge utile transportée (t), somme des masses des véhicules embarqués ;
- d : distance *aller* du trajet (km).

Le terme $2W$ traduit le trajet **aller-retour à vide** du porteur (la masse propre du camion parcourt l'aller chargé puis le retour à vide), tandis que la charge utile P n'est comptée qu'à l'aller. Les paramètres massiques retenus sont résumés dans le tableau 3.14.

L'empreinte **totale** d'un scénario s'obtient en sommant l'équation (3.18) sur **tous les trajets** : les rotations primaires (camions consolidés Oran → buffer, remplis par slots) et les missions de dépannage (un plateau par véhicule, sur la part de 10 %), puis en convertissant des grammes en tonnes :

$$E_{\text{scénario}} = \frac{1}{10^6} \left(\sum_{\text{rotations}} E_{\text{primaire}} + \sum_{\text{dépannages}} E_{\text{last-mile}} \right) [\text{t CO}_2/\text{an}] \quad (3.19)$$

TABLE 3.14 – Paramètres massiques du modèle d'émissions (EU VECTO)

Élément	Masse à vide	Part d'un camion
Porte-voitures (line-haul)	14,0 t	–
Plateau de dépannage	4,5 t	1 véhicule
Véhicule Fiat 500 (F500)	0,5 t	1/8 (12,5 %)
Véhicule standard (Doblo)	1,5 t	1/7 (14,3 %)

Le réseau est décomposé en **deux niveaux** (*tiers*) :

- **Tier 1 – transport primaire (line-haul)** : acheminement des véhicules depuis l'origine **Oran** vers chaque buffer, par porte-voitures consolidés (remplissage par « slots » jusqu'à un camion complet) ;
- **Tier 2 – dépannage last-mile** : livraison à domicile depuis le buffer, par plateau transportant un seul véhicule, appliquée à la part de **10 %** de livraison établie en section 3.3.

Le scénario de référence ($p = 1$) reconstitue la **distribution directe historique** depuis Oran (missions réelles consolidées par camion), sans buffer intermédiaire. Le code d'implémentation complet est fourni en annexe D.

3.5.2 Résultats par scénario

L'empreinte totale de chaque scénario combine les deux niveaux : le transport primaire (Tier 1, line-haul Oran → buffers) et le dépannage last-mile (Tier 2, 10 % de livraisons à domicile). Le tableau 3.16 en détaille la décomposition et la figure 3.8 la visualise.

TABLE 3.16 – Empreinte carbone annuelle par scénario

Scénario	CO ₂ primaire (t)	CO ₂ last-mile (t)	Total (t/an)	Δ vs réf.
Référence (direct)	8 804	–	8 804	–
$p = 2$	5 731	1 046	6 777	–23 %
p = 3 (optimum)	6 048	1 024	7 071	–20 %
p = 4 (retenu)	6 056	1 023	7 079	–20 %
$p = 5$	6 210	1 046	7 257	–18 %

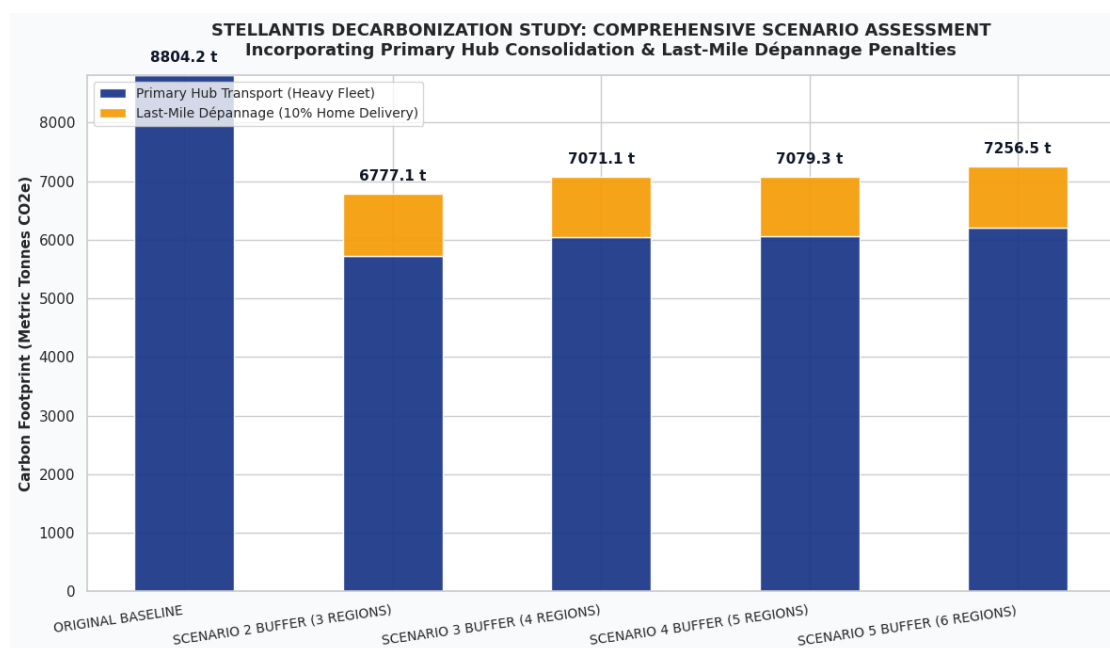


FIGURE 3.8 – Empreinte carbone totale par scénario : transport primaire (bleu) et dépannage last-mile (orange)

Lecture du graphique. Chaque barre empile deux contributions : en **bleu**, le **transport primaire par camion** (line-haul Oran → buffers); en **orange**, les émissions générées par les **livraisons de dépannage** (last-mile). La barre de **référence** ne comporte pas d'orange : la distribution directe historique n'a pas de niveau dépannage buffer → client. Un point essentiel explique la baisse par rapport à la référence : la **région d'Oran n'est pas desservie par camion** de line-haul, puisqu'elle constitue l'*origine* des véhicules; ses clients ne sont servis que par **dépannage** (s'ils le souhaitent) ou par retrait sur place. Cette absence de leg primaire pour toute la zone d'Oran allège mécaniquement l'empreinte des réseaux à buffers face à la distribution directe, où chaque véhicule partait d'Oran sur une longue distance.

3.5.3 Interprétation : la décentralisation réduit l’empreinte carbone

Trois constats se dégagent :

1. **Tout réseau décentralisé émet moins que la situation actuelle.** La distribution directe (référence) est la **plus émettrice** (8 804 t/an); le réseau $p = 3$ (optimum quantitatif) abaisse l’empreinte totale à **7 071 t/an**, soit **–20 %**. La consolidation des flux sur l’axe primaire l’emporte largement sur le surcoût du dépannage last-mile ;
2. **Parmi les réseaux décentralisés, l’empreinte croît légèrement avec p .** Le total passe de 6 777 t ($p = 2$) à 7 257 t ($p = 5$) : chaque buffer additionnel reroute des flux vers des hubs plus éloignés (Oran → Jijel $\approx 1\,000$ km) et augmente les tonnes-kilomètres du primaire. Le gain marginal de distance *last-mile* ne compense pas ce surcoût *primaire* ;
3. **Le transport primaire domine.** Il représente **85 %** de l’empreinte du réseau $p = 3$ (6 048 t sur 7 071), le dépannage last-mile ne pesant que **15 %** ($\approx 1\,024$ t) malgré son caractère individuel, grâce à la limitation à 10 % des livraisons et à de courtes distances (≤ 62 km).

Ce résultat conforte le choix de la décentralisation : elle améliore simultanément la distance last-mile, le taux de remplissage, la résilience des stocks **et** l’empreinte carbone par rapport à la situation actuelle. Le levier de réduction supplémentaire réside dans le **transport primaire**, qui concentre 85 % des émissions et repose exclusivement sur le mode **routier**. Le recours au **ferroviaire** pour le line-haul vers les buffers de l’Est (Jijel) et du Centre (Alger) – le rail émettant de 3 à 4 fois moins de CO₂ par tonne-kilomètre que la route – permettrait d’amplifier nettement le gain. Cette piste multimodale, déjà identifiée dans le diagnostic (chapitre 1), constitue le prolongement naturel de la présente étude.

Conclusion – Empreinte carbone

Contrairement à une idée reçue, la décentralisation **réduit** l’empreinte carbone : la distribution directe actuelle émet **8 804 t/an**, contre **7 071 t/an** pour le réseau $p = 3$ (optimum quantitatif) (**–20 %**), grâce à la consolidation des flux sur l’axe primaire. Ce dernier concentre 85 % des émissions et reste routier : une **transition multimodale** (ferroviaire Oran → buffers) permettrait d’amplifier le gain, en cohérence avec les objectifs ESG *Dare Forward 2030*.

3.6 Analyse économique des coûts logistiques

La dernière dimension d’évaluation est **financière** : il s’agit de chiffrer le coût d’exploitation (OPEX) annuel de chaque scénario et de vérifier que la reconfiguration retenue est économiquement soutenable. Le budget logistique se décompose en deux postes : le **transport** (acheminement des véhicules) et l’**entreposage** (location des sites et immobilisation des véhicules en stock).

3.6.1 Méthodologie et hypothèses de coûts

Coût de transport. Chaque trajet de porte-voitures est facturé selon une **grille tarifaire** fonction de la destination (prix d'une rotation Oran → wilaya), s'échelonnant de **2 125 DA** (Aïn Témouchent, proche) à **21 750 DA** (Adrar, Grand Sud), avec par exemple 7 050 DA pour Alger, 11 425 DA pour Sétif et 12 250 DA pour Jijel. Dans le scénario de référence, chaque mission réelle est facturée au tarif de sa destination la plus éloignée ; dans les scénarios à buffers, les véhicules sont consolidés en camions complets (remplissage par « slots ») acheminés au tarif Oran → buffer.

Coût d'entreposage. Il agrège le **loyer mensuel** des sites loués et un coût **variable d'immobilisation** de **190 DA par véhicule et par jour** de stockage. Les loyers retenus sont de **11,3 MDA/mois** pour Alger, **8,95 MDA/mois** pour Mostaganem et **8,95 MDA/mois** pour Jijel. La situation actuelle loue **Alger + Mostaganem** ; le réseau cible loue **Alger + Jijel**. Dans les buffers, l'immobilisation des véhicules sur les sites principaux (Alger, Jijel) est couverte par le loyer forfaitaire, tandis que les buffers secondaires (Batna, Djelfa, Annaba) supportent le coût variable d'entreposage. L'horizon d'observation est d'environ **22 mois**.

Budget total. Le budget OPEX d'un scénario est la somme des deux postes :

$$B = \underbrace{\sum_{k \in \text{trajets}} \tau(\text{dest}_k)}_{\text{transport}} + \underbrace{\left(\sum_{s \in \text{sites}} L_s \right) N_m + c_j \sum_{v \in \text{stockage}} n_v}_{\text{entreposage}} \quad (3.20)$$

où :

- B : budget logistique total (DZD) ;
- $\tau(\text{dest}_k)$: tarif de la grille pour la destination du trajet k (DZD) ;
- L_s : loyer mensuel du site s (DZD/mois) ;
- $N_m \approx 22$: nombre de mois de la période ;
- $c_j = 190$ DZD : coût d'immobilisation par véhicule et par jour ; n_v : nombre de jours de stockage du véhicule v (compté pour les buffers secondaires uniquement).

Le code complet figure en annexe E.

3.6.2 Résultats par scénario

Le tableau 3.18 présente, pour chaque scénario, le nombre de trajets, les coûts de transport et d'entreposage et le budget total.

TABLE 3.18 – Budget logistique (OPEX) par scénario

Scénario	Trajets	Transport (MDA)	Entrepos. (MDA)	Total (MDA)
Référence (direct)	6 142	56,9	499,3	556,3
$p = 2$	4 876	44,1	465,4	509,5
$p = 3$ (optimum)	4 877	45,8	465,4	511,3
$p = 4$ (retenu)	4 893	46,4	467,1	513,6
$p = 5$	4 893	47,6	467,1	514,7

La figure 3.9 visualise la décomposition du budget par poste.

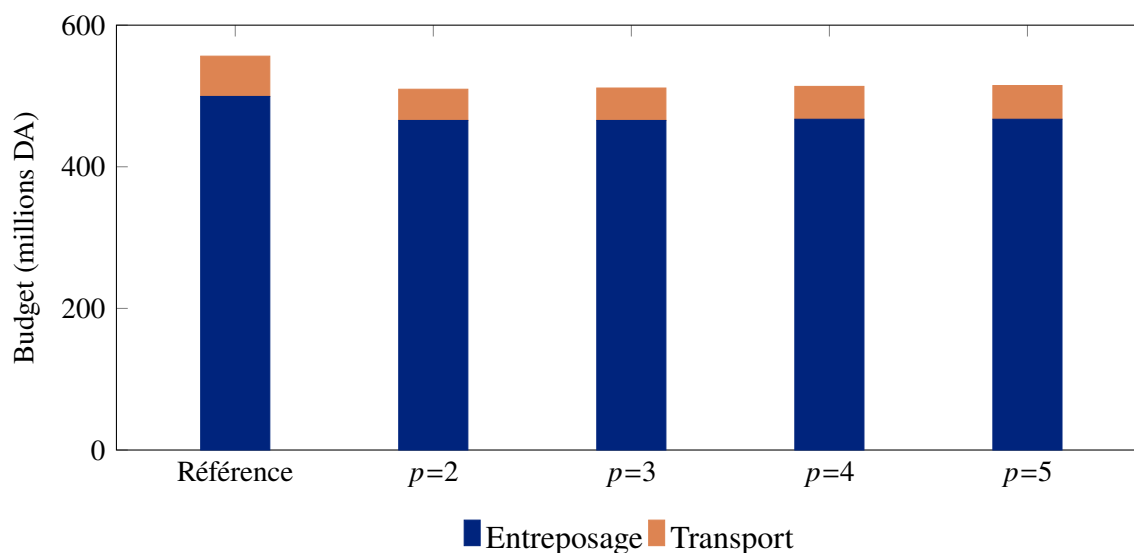


FIGURE 3.9 – Décomposition du budget logistique annuel (entreposage et transport) par scénario

3.6.3 Interprétation : la décentralisation réduit le coût

Trois constats se dégagent :

1. **Tout réseau à buffers est moins coûteux que la situation actuelle.** Le budget passe de **556,3 MDA** (distribution directe) à **511,3 MDA** pour le réseau retenu $p = 3$, soit une économie de **−45 MDA/an** (−8 %). La consolidation des flux réduit à la fois le nombre de trajets (de 6 142 à $\approx 4\,880$) et l'immobilisation des véhicules ;
2. **Le coût de transport chute fortement.** Il passe de **56,9 MDA** (référence) à **45,8 MDA** ($p = 3$), soit −19 % : la consolidation en camions complets remplace les rotations directes partiellement remplies ;

3. **L'entreposage domine le budget** ($\approx 91\%$). Il diminue également (de 499,3 à 465,4 MDA) car la décentralisation réduit l'immobilisation variable des véhicules, à loyer de sites équivalent.

Comme pour le carbone, le coût **croît légèrement** avec le nombre de buffers au-delà de $p = 3$ (511,3 MDA à $p = 3$ contre 514,7 MDA à $p = 5$), chaque buffer secondaire ajoutant un loyer et des trajets pour un flux marginal. Le scénario $p = 2$ est nominalement le moins cher (509,5 MDA), mais son écart avec $p = 3$ est négligeable (1,8 MDA, soit 0,35 %) et ne compense pas son insuffisance de couverture.

Conclusion – Coûts logistiques

La reconfiguration en réseau de buffers **réduit l'OPEX** logistique : de **556,3 MDA/an** (distribution directe actuelle) à **511,3 MDA/an** pour le réseau $p = 3$ (optimum quantitatif), soit **-8 %** (-45 MDA/an). Le gain provient de la baisse conjointe du transport (-19 %, consolidation) et de l'entreposage variable. L'entreposage représente $\approx 91\%$ du budget, ce qui désigne l'optimisation du stockage comme principal gisement d'économies futures.

3.7 Analyse de la flotte de transport en mission

Le dimensionnement de la flotte de dépannage (section 3.3) ne couvre que le *dernier kilomètre*. Il reste à évaluer la sollicitation de la **flotte primaire de porte-voitures** assurant le line-haul Oran $\rightarrow$ buffers, c'est-à-dire le **nombre de camions simultanément en mission** jour après jour. Cette trajectoire temporelle est déterminante : son **pic** fixe la taille minimale de flotte permettant d'honorer tous les départs sans rupture, à confronter au parc national estimé à **120 porte-voitures** (chapitre 1).

3.7.1 Méthodologie : jours d'occupation et consolidation dynamique

Chaque rotation immobilise un camion pendant un nombre entier de **jours d'occupation**, fonction du temps de trajet aller-retour :

$$J = \left\lceil \frac{H_{\text{conduite}}}{9} \right\rceil, \quad H_{\text{conduite}} = \frac{2t}{1} (+ 0,75 \text{ h si } H_{\text{conduite}} > 4,5 \text{ h}) \quad (3.21)$$

où t est le temps de trajet *aller* (h), $H_{\text{conduite}} = 2t$ la durée aller-retour (une pause réglementaire de 0,75 h est ajoutée au-delà de 4,5 h de conduite), 9 la durée d'un poste journalier (h) et $J \geq 1$ le nombre de jours pendant lesquels le camion est mobilisé.

La trajectoire est ensuite reconstruite par **consolidation dynamique** : les véhicules arrivant à Oran sont mis en file par buffer et regroupés en camions de **7 places** (ou **8** en présence d'un modèle Fiat 500); dès qu'un camion est plein, il est expédié 2 jours après la dernière arrivée du lot (délai de contrôle au parc d'Oran) et occupe la flotte pendant J jours. En cumulant ces

occupations jour par jour, on obtient le nombre de **camions actifs** à chaque date, pour chaque scénario. Le code (cellule 1) est fourni en annexe F.

3.7.2 Résultats : trajectoire de la flotte en mission

La figure 3.10 présente l'évolution journalière du nombre de porte-voitures en mission, pour les cinq scénarios, sur toute la période d'observation.

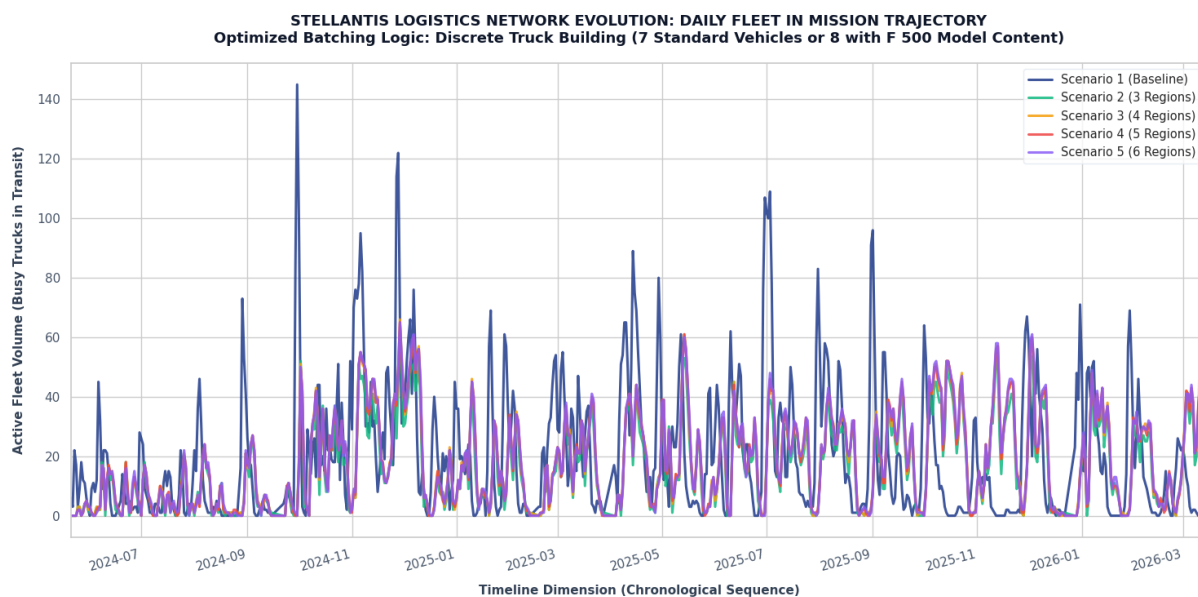


FIGURE 3.10 – Trajectoire journalière de la flotte de porte-voitures en mission (camions en transit) par scénario, selon une logique de consolidation dynamique (7 véhicules, ou 8 avec un modèle Fiat 500)

Le profil est fortement **irrégulier** : la flotte sollicitée varie d'un jour à l'autre au gré des pics de production et de facturation, avec des **pointes marquées** et des creux. Deux enseignements se dégagent. D'une part, la consolidation par buffer **lisse et abaisse** l'enveloppe par rapport à la distribution directe : en regroupant les véhicules par destination avant expédition, les scénarios à buffers réduisent le nombre de camions mobilisés simultanément. D'autre part, les **pics** demeurent le facteur dimensionnant : c'est leur amplitude – et non la moyenne – qui détermine la taille de flotte nécessaire pour ne pas reporter de départs. Cette lecture confirme la tension capacitaire identifiée au diagnostic (parc de 120 unités) et plaide pour le **lissage** des départs et la **mutualisation** qu'apporte un réseau de buffers.

3.8 Synthèse comparative et choix du scénario retenu

Les six analyses précédentes – localisation p-médian (section 3.2), canaux de distribution et flotte de dépannage (section 3.3), planification des stocks (section 3.4), empreinte carbone (section 3.5), coûts logistiques (section 3.6) et flotte en mission (section 3.7) – ont été conduites

pour l'ensemble des scénarios. Cette section les consolide dans un **tableau comparatif** afin d'arrêter le choix final du nombre de buffers, en confrontant chaque scénario sur les différents critères évalués.

Le scénario $p = 1$ (Oran seul) constitue la **situation centralisée actuelle**, utilisée comme référence ; le scénario $p = 2$ a été **écarté** pour insuffisance de couverture territoriale (section 3.2.5). Le choix se joue donc entre les configurations $p = 3$ à 6, confrontées dans le tableau 3.20 selon six critères.

TABLE 3.20 – Synthèse comparative des scénarios

p	Dist. (km)	Cap. (pl.)	Flotte	CO ₂ (t/an)	Coût (MDA)	Appréciation
1	–	2 764	–	8 804	556	Référence : distance/couverture rédhitoires
2	197	3 366	4	6 777	510	Écarté : couverture Est insuffisante
3	131	3 448	5	7 071	511	Optimum quantitatif (coût, carbone)
4	105	3 496	6	7 079	514	Retenu : + Batna (couverture Est, GPL)
5	95	3 540	7	7 257	515	Buffer Djelfa sous-utilisé
6	86	3 554	8	n.d.	n.d.	Fragmentation excessive

n.d. : critères non évalués pour $p = 6$, le scénario étant déjà écarté sur les autres dimensions.

Lecture quantitative. L'arbitrage oppose deux familles de critères. La **distance last-mile** décroît avec p et favoriserait les réseaux étendus ; à l'inverse, les **coûts de structure** (capacité, flotte, remplissage), l'**empreinte carbone** et le **coût OPEX** croissent avec p au-delà d'un certain seuil. Sur ces seuls chiffres, le **point optimal est $p = 3$** : il offre le coût (511 MDA) et l'empreinte (7 071 t) les plus bas parmi les configurations couvrantes, avec la flotte la plus réduite (5 camions). Mais les écarts avec $p = 4$ sont **marginiaux** : +3 MDA/an (+0,6 %), +8 t CO₂/an (+0,1 %) et un seul camion de plus.

Lecture qualitative et stratégique. Ces écarts négligeables sont **largement compensés** par les gains de couverture et de positionnement qu'apporte le quatrième buffer, **Batna** :

- **Couverture de l'Est plus efficace** : la zone de Jijel s'étend en grande partie *sur la mer* (couverture « perdue »), alors que **Batna** rayonne sur un arrière-pays (Aurès, Hauts-Plateaux Est) **densément peuplé** ;

- **Coût et logistique** : Batna est **moins coûteuse** à desservir que Jijel et mieux placée pour absorber la demande dense de l'Est ;
- **Atout GPL** : Batna est **mieux positionnée pour les véhicules GPL**, à proximité du prestataire de kits gaz **Ghazal** – un avantage stratégique au vu de la montée du modèle GPL ;
- **Valeur stratégique préservée** : le réseau $p = 4$ **conserve Jijel**, dont le buffer demeure une infrastructure « prête à l'emploi » pour l'**import/export futur** en cas d'ouverture maritime.

Le réseau $p = 4$ capte ainsi *simultanément* la valeur opérationnelle de Batna et la valeur stratégique de Jijel. Au-delà, les scénarios $p = 5$ (ajout de Djelfa) et $p = 6$ (ajout d'Annaba) sont **écartés** : leurs buffers additionnels sont **quasi inactifs** (0,6 à 0,7 h de charge de dépannage) et mobilisent des camions entiers pour un flux marginal, sans bénéfice proportionné – Djelfa (Sud) et Annaba (frontière tunisienne) restant des *options d'extension future*.

Décision – Scénario retenu

Le scénario **p = 4**, avec les quatre buffers **Oran** (Ouest), **Alger** (Centre), **Batna** (Est/Aurès) et **Jijel** (Est/stratégique), est **retenu** comme architecture cible du réseau de distribution aval. Quantitativement quasi équivalent à l'optimum $p = 3$ (+3 MDA/an, +8 t CO₂/an, +1 camion), il s'en distingue par des **avantages décisifs** : une couverture de l'Est plus efficace via **Batna** (Jijel rayonnant en partie sur la mer), un coût de desserte moindre, un meilleur ancrage **GPL** (proximité de Ghazal), tout en **conservant Jijel** pour sa valeur stratégique d'import/export futur. Par rapport à la situation actuelle, $p = 4$ réduit la distance (−47 %), l'empreinte carbone (−20 %) et le coût logistique (−8 %), pour un surcoût marginal face à $p = 3$ pleinement justifié par ces gains stratégiques.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a déployé, brique par brique, la solution de reconfiguration de la distribution aval. Le modèle p-médian a fixé la localisation optimale des buffers ; l'affectation des canaux (retrait/dépannage) et le dimensionnement de la flotte, de la capacité de stockage, de l'empreinte carbone et des coûts ont été établis *pour l'ensemble des scénarios*. La synthèse comparative a conduit à retenir le **réseau à quatre buffers (Oran, Alger, Batna, Jijel)**, qui réduit distance, empreinte carbone et coût par rapport à la situation actuelle, tout en assurant une couverture territoriale complète et une valeur stratégique. La conclusion générale revient sur la portée de ces résultats et sur les perspectives qu'ils ouvrent.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études avait pour objectif de répondre à une question centrale : comment reconfigurer la chaîne logistique aval de distribution des véhicules de Stellantis El Djazaïr pour réduire les distances, les coûts et l'empreinte carbone, tout en fiabilisant le service face à une montée en cadence rapide ? La démarche adoptée a combiné un diagnostic terrain approfondi, un socle théorique solide et une modélisation quantitative complète, articulés en trois chapitres complémentaires.

Chapitre 1 – État des lieux et diagnostic. Le premier chapitre a situé Stellantis El Djazaïr dans son contexte : une usine de Tafraoui (Oran) dont la production est passée de 18 000 véhicules en 2024 à plus de 80 000 unités cumulées en mars 2026, avec un objectif de 135 000 véhicules/an à l'horizon 2028. Le diagnostic du département Supply Chain a révélé plusieurs dysfonctionnements structurels : un schéma de distribution 100 % centralisé depuis Oran, une flotte de porte-voitures insuffisante (sous-dimensionnée de 12 camions par rapport au besoin réel), des taux de remplissage faibles (48 % en moyenne), des distances excessives vers l'Est et le Sud du pays (jusqu'à 2 314 km), et une absence d'indicateurs de pilotage. L'analyse stratégique (PES-TEL, cinq forces de Porter, SWOT/TOWS) a confirmé la vulnérabilité du modèle actuel et la nécessité d'une décentralisation de la distribution via des centres de regroupement intermédiaires (*buffers*).

Chapitre 2 – État de l'art. Le deuxième chapitre a établi le cadre théorique et méthodologique mobilisé pour construire la solution. Il a d'abord présenté les fondements du **réseau de distribution** et l'arbitrage coût-service, puis formalisé le **modèle p-médian** – programme linéaire en nombres entiers minimisant la somme des distances pondérées par la demande – ainsi que les algorithmes de calcul d'itinéraires (Dijkstra, Contraction Hierarchies, OSRM). La **consolidation des chargements** par bin packing (heuristique First Fit Decreasing) et la **logistique du dernier kilomètre** avec un modèle microéconomique de choix discret (retrait vs dépannage) ont été détaillés. Enfin, les outils de gestion des stocks par niveau de service (formule de stock de sécurité, newsvendor), d'évaluation de l'empreinte carbone (GHG Protocol, référentiel EU VECTO) et d'analyse des coûts logistiques totaux (CTL) ont été présentés et justifiés.

Chapitre 3 – Solutions proposées. Le troisième chapitre a déployé la solution brique par brique, en évaluant cinq scénarios $p \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ de configuration du réseau de buffers.

La démarche a procédé en cascade. Nous avons d'abord **localisé les buffers** grâce au modèle p-médian, en imposant l'ouverture d'Oran (origine des véhicules) et d'Alger (principal pôle de demande) et une séparation minimale entre centres. Le modèle a montré qu'avec trois buffers (Alger, Jijel, Oran) la distance moyenne parcourue par véhicule chutait déjà de 34 %, et qu'avec

un quatrième centre à Batna elle diminuait de 47 % par rapport à la distribution centralisée actuelle.

Nous avons ensuite déterminé, pour chaque wilaya, **comment le véhicule parvient au client final** : soit le client se déplace au buffer (retrait), soit il est livré à domicile (dépannage). Un modèle économique comparant le coût de livraison au consentement à payer du client a établi qu'environ 90 % des véhicules relèvent du retrait et 10 % du dépannage, ce qui a permis de dimensionner une flotte de dépannage adaptée à chaque scénario. Nous avons en parallèle **calculé la capacité de stock** nécessaire dans chaque buffer pour absorber les pics de demande, à un niveau de service de 90 %, en projetant les besoins jusqu'à l'horizon 2028.

Chaque scénario a enfin été évalué sous l'angle **environnemental et économique**. Le calcul de l'empreinte carbone, fondé sur le référentiel européen VECTO, a montré que le réseau à quatre buffers réduit les émissions de transport de 20 %, principalement par le raccourcissement des distances et le meilleur remplissage des porte-voitures. L'analyse des coûts logistiques (transport, entreposage et immobilisation du capital) a établi que ce même réseau abaisse le coût total de 8 %, malgré les charges fixes des nouveaux centres. Enfin, la reconstitution jour par jour de l'activité de la flotte a confirmé que le scénario reste réalisable avec les moyens de transport disponibles.

Le scénario retenu : quatre buffers à Oran, Alger, Batna et Jijel. Au terme de cette comparaison multicritère, c'est la configuration à **quatre buffers (Oran, Alger, Batna et Jijel)** qui s'impose. Par rapport à la distribution centralisée actuelle depuis Oran, elle **réduit la distance moyenne par véhicule de 47 %**, diminue l'**empreinte carbone de 20 %** et abaisse le **coût logistique total de 8 %**, tout en assurant une **couverture complète des 48 wilayas**. Elle offre en outre deux atouts stratégiques : Batna, bien placée pour les véhicules GPL grâce à la proximité du prestataire Ghazal, et Jijel, dont le port en eau profonde constitue une porte d'entrée précieuse pour un éventuel import/export maritime futur.

Au-delà de ses résultats chiffrés, ce travail illustre la capacité à mobiliser un ensemble cohérent d'outils de recherche opérationnelle et de *supply chain management* au service d'un cas industriel réel et peu documenté : la distribution automobile en Algérie.

Perspectives. Plusieurs axes prolongent naturellement cette étude :

- l'**optimisation fine des tournées** de livraison buffer → agents par un modèle de type *CVRP*, au-delà de la consolidation par capacité retenue ici ;
- le déploiement d'un **schéma multimodal**, en particulier le recours au **ferroviaire** sur le segment primaire Oran → buffers, qui concentre l'essentiel de l'empreinte carbone et constitue le principal levier de décarbonation (facteur d'émission 13 fois inférieur à la route) ;
- la **recalibration du modèle** sur des données transactionnelles réelles (part effective dépannage/retrait, durées de séjour) une fois le réseau déployé et exploité ;
- l'intégration d'un **outil de pilotage** (TMS, KPIs) pour industrialiser la planification et le suivi des opérations.

Annexes

Annexe A

Code d'implémentation du modèle p-médian

Cette annexe reproduit le code Python utilisé pour la localisation des buffers par le modèle p-médian (section 3.2). Il couvre le chargement et le nettoyage des données, la construction de la matrice de distances, le solveur p-médian (avec sites obligatoires et contrainte de séparation), l'exécution des scénarios et l'analyse de capacité des buffers, ainsi que la génération des indicateurs et du graphique de comparaison (*elbow*).

Listing A.1 – Modèle p-médian de localisation des buffers (PuLP / CBC)

```
1 # =====
2 # BLOCK 0 -- MOUNT DRIVE AND INSTALL PACKAGES
3 # =====
4 from google.colab import drive
5 import os
6 import shutil
7
8 # Clean the mount point if needed
9 if os.path.exists('/content/drive'):
10     try:
11         if os.listdir('/content/drive'):
12             shutil.rmtree('/content/drive')
13     except:
14         pass
15
16 drive.mount('/content/drive', force_remount=True)
17
18 !pip install pulp -q
19
20 import pandas as pd
21 import numpy as np
22 import math
23 import pulp
24 import matplotlib.pyplot as plt
25 import os
26
27 # =====
28 # BLOCK 1 -- PARAMETERS
29 # =====
30 DRIVE_DIR = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/"
31 OUTPUT_DIR = DRIVE_DIR + "buffer_scenarios_results/"
32 TRUCK_CAP = 7
33 TRUCK_CAP_F500 = 8
34 MAX_TRUCKS = 80
35 ORAN = "ORAN"
36 ALGER = "ALGER"
37 SCENARIOS = [2, 3, 4, 5, 6]
```

```

38 PMAX          = 6
39
40 # =====
41 # BLOCK 2 -- LOAD INPUT FILES
42 # =====
43 import os
44 os.makedirs(OUTPUT_DIR, exist_ok=True)
45 print(f"[OK] Output folder ready: {OUTPUT_DIR}")
46 df_deliveries = pd.read_csv(
47     f"{DRIVE_DIR}Suivie stock production locale 15 03 26.xlsx - Flux.csv",
48     low_memory=False
49 )
50
51 try:
52     df_localisation = pd.read_csv(
53         f"{DRIVE_DIR}localisation_agent.csv",
54         sep=";", encoding="latin1"
55     )
56     if "Agent" not in df_localisation.columns:
57         raise ValueError
58 except:
59     df_localisation = pd.read_csv(
60         f"{DRIVE_DIR}localisation_agent.csv",
61         sep=";", encoding="latin1"
62     )
63
64 df_osrm = pd.read_csv(DRIVE_DIR + "distance_matrix_capitals.csv", index_col=0)
65 df_candidates = pd.read_csv(DRIVE_DIR + "candidate_centers.csv")
66
67 print(f"[OK] Flux loaded          : {len(df_deliveries)} rows")
68 print(f"[OK] Localisation loaded   : {len(df_localisation)} rows")
69 print(f"[OK] Distance matrix loaded : {df_osrm.shape}")
70 print(f"[OK] Candidate centers loaded: {df_candidates.shape}")
71
72 # =====
73 # BLOCK 3 -- CLEAN AND STANDARDIZE DATA
74 # =====
75 df_localisation.columns = df_localisation.columns.str.strip()
76
77 # Build agent -> wilaya map from localisation file
78 loc_map = (
79     df_localisation[["Agent", "Ville"]]
80     .drop_duplicates()
81     .assign(
82         Agent=lambda x: x["Agent"].astype(str).str.strip(),
83         Ville=lambda x: x["Ville"].astype(str).str.upper().str.strip()
84     )
85 )
86
87 # Standardize distance matrix labels
88 df_osrm.index = df_osrm.index.astype(str).str.upper().str.strip()
89 df_osrm.columns = df_osrm.columns.astype(str).str.upper().str.strip()
90 df_osrm = df_osrm[~df_osrm.index.duplicated(keep="first")]
91 df_osrm = df_osrm.loc[:, ~df_osrm.columns.duplicated(keep="first")]
92
93 # Standardize candidates
94 df_candidates.columns = df_candidates.columns.str.strip()
95 df_candidates["candidate_id"] = df_candidates["candidate_id"].astype(str).str.strip()
96 df_candidates["from_wilaya"] = df_candidates["from_wilaya"].astype(str).str.upper().str.strip()
97
98 # Parse billing date
99 df_deliveries["date_fact"] = pd.to_datetime(
100     df_deliveries["Date de facturation"],
101     dayfirst=True, errors="coerce"
102 )
103 df_deliveries = df_deliveries.dropna(subset=["date_fact"]).copy()
104 df_deliveries["date_fact_day"] = df_deliveries["date_fact"].dt.normalize()
105
106 # Merge wilaya from localisation
107 df_deliveries["agent_key"] = df_deliveries["agent_de_facturation"].astype(str).str.strip()
108 df_deliveries = df_deliveries.merge(
109     loc_map.rename(columns={"Agent": "agent_key", "Ville": "Ville"}),

```

```

110     on="agent_key", how="left"
111 )
112 df_deliveries["Ville"] = (
113     df_deliveries["Ville"].fillna("ALGER").astype(str).str.upper().str.strip()
114 )
115
116 # Standardize designation and model
117 df_deliveries["designation_clean"] = (
118     df_deliveries["Designation"].astype(str).str.upper().str.strip()
119 )
120 df_deliveries["modele_clean"] = (
121     df_deliveries["Modele"].astype(str)
122     .str.upper().str.strip()
123     .str.replace(r"\s+", "", regex=True) # remove all spaces -> F500
124 )
125
126 # Keep only RESEAU
127 df_reseau = df_deliveries[df_deliveries["designation_clean"] == "RESEAU"].copy()
128
129 # Flag F500
130 df_reseau["is_F500"] = df_reseau["modele_clean"].str.contains("F500", na=False)
131
132 # Truck capacity per row
133 df_reseau["truck_cap"] = df_reseau["is_F500"].map({True: TRUCK_CAP_F500, False: TRUCK_CAP})
134
135 print(f"\n[OK] Valid billing date rows : {len(df_deliveries)}")
136 print(f"[OK] RESEAU rows : {len(df_reseau)}")
137 print(f"[OK] RESEAU F500 : {df_reseau['is_F500'].sum()}")
138 print(f"[OK] RESEAU non-F500 : {(~df_reseau['is_F500']).sum()}")
139 print(f"[OK] Unique agents in RESEAU : {df_reseau['agent_key'].nunique()}")
140 print(f"[OK] Unique wilayas in RESEAU : {df_reseau['Ville'].nunique()}")
141 print(f"[OK] Date range : {df_reseau['date_fact_day'].min().date() -> {df_reseau['date_fact_day'].max().date()})")
142
143 # =====
144 # BLOCK 4 -- BUILD DISTANCE MATRIX (Oran -> buffer only)
145 # =====
146 # The route is simply: Oran -> buffer city.
147 # Agents are commercial only -- vehicles are stored at the buffer,
148 # not at the agent. So the relevant distance is Oran -> buffer.
149
150 wilayas = df_osrm.index.tolist()
151 candidate_ids = df_candidates["candidate_id"].tolist()
152 n_i = len(wilayas)
153 n_j = len(df_candidates)
154
155 C = np.zeros((n_i, n_j))
156
157 for i, wi in enumerate(wilayas):
158     for q_idx, row in df_candidates.iterrows():
159         candidate_w = str(row["from_wilaya"]).upper().strip()
160
161         if row["type"] == "capital":
162             dist = df_osrm.loc[wi, candidate_w] if (wi in df_osrm.index and candidate_w in df_osrm.columns)
163         else 9999:
164             parent = candidate_w
165             d_road = float(row["d_road_est_km"])
166             parent_dist = df_osrm.loc[wi, parent] if (wi in df_osrm.index and parent in df_osrm.columns)
167         else 9999:
168             dist = parent_dist + d_road
169
170         C[i, q_idx] = dist
171
172 df_C = pd.DataFrame(C, index=wilayas, columns=candidate_ids)
173 df_C.to_csv(DRIVE_DIR + "distance_matrix_pmedian.csv")
174
175 print(f"[OK] Distance matrix built : {n_i} x {n_j}")
176 print(f"Min : {C[C>0].min():.1f} km")
177 print(f"Mean : {C[C>0].mean():.1f} km")
178 print(f"Max : {C.max():.1f} km")

```

```

179 # =====
180 # BLOCK 5 -- DEMAND VECTOR (wilaya level, for p-median only)
181 # =====
182 last_date = df_reseau["date_fact_day"].max()
183 first_date = df_reseau["date_fact_day"].min()
184
185 active_horizon = (
186     df_reseau.groupby("Ville")["date_fact_day"]
187     .min()
188     .reset_index(name="first_seen")
189 )
190 active_horizon["active_days"] = (
191     (last_date - active_horizon["first_seen"].dt.normalize()).dt.days + 1
192 )
193
194 total_by_wilaya = (
195     df_reseau.groupby("Ville")
196     .size()
197     .reset_index(name="total_vehicles")
198 )
199
200 df_demand = total_by_wilaya.merge(
201     active_horizon[["Ville", "active_days"]], on="Ville", how="left"
202 )
203 df_demand["avg_daily_demand"] = df_demand["total_vehicles"] / df_demand["active_days"]
204 df_demand = df_demand.sort_values("avg_daily_demand", ascending=False)
205 df_demand.to_csv(DRIVE_DIR + "daily_demand_per_wilaya.csv", index=False)
206
207 demand_dict = df_demand.set_index("Ville")["avg_daily_demand"].to_dict()
208 d = np.array([demand_dict.get(w.upper(), 0.0) for w in wilayas])
209
210 print(f"[OK] Demand vector: {len(wilayas)} wilayas")
211 print(f"    Total avg vehicles/day : {d.sum():.1f}")
212 print(f"    Approx trucks/day       : {math.ceil(d.sum()/TRUCK_CAP)}")
213 print(f"\n-- Top 10 wilayas -----")
214 print(df_demand.head(10).to_string(index=False))
215
216 # =====
217 # BLOCK 6 -- P-MEDIAN SOLVER (Alger + Oran mandatory) + 200 km separation
218 # =====
219 def get_candidate_index(target_wilaya, candidate_ids, df_candidates):
220     """Return index of the capital candidate matching target_wilaya."""
221     mask = (
222         (df_candidates["from_wilaya"].str.upper().str.strip() == target_wilaya.upper().strip()) &
223         (df_candidates["type"] == "capital")
224     )
225     rows = df_candidates[mask]
226     if rows.empty:
227         return None
228     return candidate_ids.index(str(rows.iloc[0]["candidate_id"]))
229
230
231 def get_candidate_parent_wilaya(cid, df_candidates):
232     row = df_candidates[df_candidates["candidate_id"].astype(str) == str(cid)]
233     if row.empty:
234         return None
235     return str(row.iloc[0]["from_wilaya"]).upper().strip()
236
237
238 def solve_pmedian_mandatory(C, d, p, candidate_ids, wilayas, mandatory_wilayas, min_separation_km=200):
239     n_i, n_j = C.shape
240     prob = pulp.LpProblem(f"pmedian_p{p}", pulp.LpMinimize)
241
242     x = pulp.LpVariable.dicts(
243         "x", [(i, j) for i in range(n_i) for j in range(n_j)], cat="Binary"
244     )
245     y = pulp.LpVariable.dicts("y", range(n_j), cat="Binary")
246
247     prob += pulp.lpSum(
248         d[i] * C[i, j] * x[(i, j)]
249         for i in range(n_i) for j in range(n_j)
250     )

```

```

251 for i in range(n_i):
252     prob += pulp.lpSum(x[(i, j)] for j in range(n_j)) == 1
253
254
255 for i in range(n_i):
256     for j in range(n_j):
257         prob += x[(i, j)] <= y[j]
258
259 prob += pulp.lpSum(y[j] for j in range(n_j)) == p
260
261 mandatory_idx = []
262 for mw in mandatory_wilayas:
263     idx = get_candidate_index(mw, candidate_ids, df_candidates)
264     if idx is not None:
265         prob += y[idx] == 1
266         mandatory_idx.append(idx)
267     else:
268         print(f"[!] Mandatory center not found in candidates: {mw}")
269
270 # Minimum separation between open buffers
271 for j1 in range(n_j):
272     for j2 in range(j1 + 1, n_j):
273         w1 = get_candidate_parent_wilaya(candidate_ids[j1], df_candidates)
274         w2 = get_candidate_parent_wilaya(candidate_ids[j2], df_candidates)
275
276         if w1 is None or w2 is None:
277             continue
278
279         if w1 in df_osrm.index and w2 in df_osrm.columns:
280             sep = float(df_osrm.loc[w1, w2])
281             if sep < min_separation_km:
282                 prob += y[j1] + y[j2] <= 1
283
284 prob.solve(pulp.PULP_CBC_CMD(msg=0))
285 status = pulp.LpStatus[prob.status]
286
287 open_centers = [
288     candidate_ids[j]
289     for j in range(n_j)
290     if pulp.value(y[j]) is not None and pulp.value(y[j]) > 0.5
291 ]
292
293 assignments = {
294     wilayas[i]: candidate_ids[j]
295     for i in range(n_i)
296     for j in range(n_j)
297     if pulp.value(x[(i, j)]) is not None and pulp.value(x[(i, j)]) > 0.5
298 }
299
300 total_dist = pulp.value(prob.objective) or 0
301 return status, total_dist, open_centers, assignments
302
303 # =====
304 # BLOCK 7 -- RUN SCENARIOS + BUFFER CAPACITY ANALYSIS
305 # =====
306 full_date_range = pd.date_range(
307     df_reseau["date_fact_day"].min(),
308     df_reseau["date_fact_day"].max(),
309     freq="D"
310 )
311
312 buffer_city_map = (
313     df_candidates[["candidate_id", "from_wilaya"]]
314     .drop_duplicates()
315     .assign(from_wilaya=lambda x: x["from_wilaya"].astype(str).str.upper().str.strip())
316     .set_index("candidate_id")["from_wilaya"]
317     .to_dict()
318 )
319
320 BUFFER_CAPACITY_GENERAL = {
321     'default': 50,
322     'ALGER': 120,

```

```

323     'ORAN': 80,
324 }
325
326 BUFFER_CAPACITY_F500 = {
327     'default': 30,
328     'ALGER': 70,
329     'ORAN': 50,
330 }
331
332 results = []
333 agent_rows = []
334 agent_col = "agent_key"
335
336 for p in range(2, PMAX + 1):
337     print(f"\n-- Scenario p={p} -----")
338
339     mandatory = [ALGER, ORAN]
340     if p >= 3 and "JIJEL" in df_osrm.index:
341         mandatory.append("JIJEL")
342
343     status, total_dist, centers, assignments = solve_pmedian_mandatory(
344         C, d, p, candidate_ids, wilayas,
345         mandatory_wilayas=mandatory,
346         min_separation_km=200
347     )
348
349     if status != "Optimal":
350         print(f"[!] Solver status: {status}")
351         if status == "Infeasible":
352             print("    Try reducing the separation limit to 180 or 150 km.")
353             print("    For now, keeping the raw solver result may be unsafe.")
354             continue
355
356     avg_dist = total_dist / d.sum() if d.sum() > 0 else 0
357
358     wilaya_to_buffer_city = {
359         wi: buffer_city_map.get(cid, cid)
360         for wi, cid in assignments.items()
361     }
362
363     df_sim = df_reseau.copy()
364     df_sim["buffer_city"] = df_sim["Ville"].map(wilaya_to_buffer_city).fillna(ALGER)
365
366     center_stats = []
367
368     for center_id in centers:
369         buf_city = buffer_city_map.get(center_id, center_id)
370         df_buf = df_sim[df_sim["buffer_city"] == buf_city].copy()
371
372         daily_series = (
373             df_buf.groupby("date_fact_day")
374             .size()
375             .reindex(full_date_range, fill_value=0)
376         )
377
378         avg_daily = daily_series.mean()
379         avg_weekly = daily_series.resample("W").sum().mean()
380         peak_daily = daily_series.quantile(0.95)
381
382         df_buf_gen = df_buf[~df_buf["is_F500"]]
383         daily_gen = (
384             df_buf_gen.groupby("date_fact_day")
385             .size()
386             .reindex(full_date_range, fill_value=0)
387         )
388         avg_daily_gen = daily_gen.mean()
389         peak_gen = daily_gen.quantile(0.95)
390         fill_time_gen = TRUCK_CAP / avg_daily_gen if avg_daily_gen > 0 else np.nan
391
392         df_buf_f500 = df_buf[df_buf["is_F500"]]
393         daily_f500 = (
394             df_buf_f500.groupby("date_fact_day")

```

```

395         .size()
396         .reindex(full_date_range, fill_value=0)
397     )
398     avg_daily_f500 = daily_f500.mean()
399     peak_f500 = daily_f500.quantile(0.95)
400     fill_time_f500 = TRUCK_CAP_F500 / avg_daily_f500 if avg_daily_f500 > 0 else np.nan
401
402     assigned_wilayas = [wi for wi, cid in assignments.items() if cid == center_id]
403     n_agents = df_buf[agent_col].nunique()
404
405     dists = []
406     for wi in assigned_wilayas:
407         cid = assignments.get(wi)
408         info = df_candidates[df_candidates["candidate_id"].astype(str) == str(cid)]
409         if info.empty:
410             continue
411         info = info.iloc[0]
412         cw = str(info["from_wilaya"]).upper().strip()
413
414         if info["type"] == "capital":
415             if wi in df_osrm.index and cw in df_osrm.columns:
416                 dists.append(float(df_osrm.loc[wi, cw]))
417         else:
418             if wi in df_osrm.index and cw in df_osrm.columns:
419                 dists.append(float(df_osrm.loc[wi, cw]) + float(info["d_road_est_km"]))
420
421     avg_distance_assigned = float(np.mean(dists)) if dists else np.nan
422     max_distance_assigned = float(np.max(dists)) if dists else np.nan
423
424     cap_general = BUFFER_CAPACITY_GENERAL.get(buf_city, BUFFER_CAPACITY_GENERAL['default'])
425     cap_f500 = BUFFER_CAPACITY_F500.get(buf_city, BUFFER_CAPACITY_F500['default'])
426
427     safety_stock_gen = peak_gen * 1.2
428     safety_stock_f500 = peak_f500 * 1.2
429
430     util_gen = (avg_daily_gen / cap_general * 100) if cap_general > 0 else 0
431     util_peak_gen = (peak_gen / cap_general * 100) if cap_general > 0 else 0
432     util_f500 = (avg_daily_f500 / cap_f500 * 100) if cap_f500 > 0 else 0
433
434     recommended_cap_gen = max(cap_general, int(peak_gen * 1.5))
435     recommended_cap_f500 = max(cap_f500, int(peak_f500 * 1.5))
436
437     center_stats.append({
438         "center_id": center_id,
439         "buffer_city": buf_city,
440         "assigned_wilayas": assigned_wilayas,
441         "n_agents": n_agents,
442         "total_vehicles": len(df_buf),
443         "avg_daily_demand": round(avg_daily, 2),
444         "avg_weekly_demand": round(avg_weekly, 1),
445         "peak_daily_demand": round(peak_daily, 2),
446         "avg_daily_gen": round(avg_daily_gen, 2),
447         "peak_daily_gen": round(peak_gen, 2),
448         "avg_daily_f500": round(avg_daily_f500, 2),
449         "peak_daily_f500": round(peak_f500, 2),
450         "fill_time_gen_days": round(fill_time_gen, 2) if pd.notna(fill_time_gen) else None,
451         "fill_time_f500_days": round(fill_time_f500, 2) if pd.notna(fill_time_f500) else None,
452         "avg_distance_assigned_km": round(avg_distance_assigned, 2) if pd.notna(avg_distance_assigned)
453     else None,
454         "max_distance_assigned_km": round(max_distance_assigned, 2) if pd.notna(max_distance_assigned)
455     else None,
456         "capacity_general": cap_general,
457         "capacity_f500": cap_f500,
458         "utilization_gen_avg_pct": round(util_gen, 1),
459         "utilization_gen_peak_pct": round(util_peak_gen, 1),
460         "utilization_f500_avg_pct": round(util_f500, 1),
461         "recommended_capacity_general": recommended_cap_gen,
462         "recommended_capacity_f500": recommended_cap_f500,
463         "safety_stock_gen": round(safety_stock_gen, 2),
464         "safety_stock_f500": round(safety_stock_f500, 2),
465     })

```

```

465     print(
466         f" {buf_city:15s} "
467         f"wilayas={len(assigned_wilayas):2d} "
468         f"agents={n_agents:3d} "
469         f"avg_daily={avg_daily:6.2f} "
470         f"peak={peak_daily:5.1f} "
471         f"cap_gen={cap_general:3d} "
472         f"util_peak={util_peak_gen:4.0f}% "
473         f"avg_dist={avg_distance_assigned:.1f}"
474     )
475
476     results.append({
477         "p": p,
478         "status": status,
479         "total_distance_km": round(total_dist, 2),
480         "avg_dist_per_vehicle": round(avg_dist, 2),
481         "centers": centers,
482         "assignments": assignments,
483         "wilaya_to_buffer_city": wilaya_to_buffer_city,
484         "center_stats": center_stats,
485     })
486
487     for _, row in df_reseau[[agent_col, "Ville"]].drop_duplicates(subset=[agent_col]).iterrows():
488         agent_rows.append({
489             "agent": row[agent_col],
490             "current_wilaya": row["Ville"],
491             "scenario": p,
492             "buffer_wilaya": wilaya_to_buffer_city.get(row["Ville"], ALGER),
493         })
494
495     print("\n[OK] All scenarios solved")
496
497     # =====
498     # BLOCK 8 -- FINAL AGENT-SCENARIO CSV
499     # =====
500     df_agent_rows = pd.DataFrame(agent_rows)
501
502     df_agent_pivot = df_agent_rows.pivot_table(
503         index=["agent", "current_wilaya"],
504         columns="scenario",
505         values="buffer_wilaya",
506         aggfunc="first"
507     ).reset_index()
508
509     rename_map = {p: f'scenario_{p-1}_buffer ({p} buffers)' for p in range(2, PMAX + 1)}
510     df_agent_pivot.rename(columns=rename_map, inplace=True)
511     df_agent_pivot.columns.name = None
512
513     df_agent_pivot.to_csv(OUTPUT_DIR + "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv", index=False)
514
515     print(f"[OK] agent_buffer_assignment_by_scenario.csv saved -> {len(df_agent_pivot)} agents")
516     print(df_agent_pivot.head(15).to_string(index=False))
517
518     # =====
519     # BLOCK 9 -- SCENARIO KPI + DETAIL CSV
520     # =====
521     kpi_rows = []
522     detail_rows = []
523
524     for r in results:
525         for s in r["center_stats"]:
526             kpi_rows.append({
527                 "scenario_p": r["p"],
528                 "status": r["status"],
529                 "buffer_city": s["buffer_city"],
530                 "assigned_wilayas": " ".join(s["assigned_wilayas"]),
531                 "n_agents": s["n_agents"],
532                 "total_vehicles": s["total_vehicles"],
533                 "avg_daily_demand": s["avg_daily_demand"],
534                 "avg_weekly_demand": s["avg_weekly_demand"],
535                 "avg_daily_general": s["avg_daily_gen"],
536                 "avg_daily_f500": s["avg_daily_f500"],

```

```

537     "fill_time_gen_days": s["fill_time_gen_days"],
538     "fill_time_f500_days": s["fill_time_f500_days"],
539     "avg_distance_assigned_km": s["avg_distance_assigned_km"],
540     "max_distance_assigned_km": s["max_distance_assigned_km"],
541     "total_distance_km": r["total_distance_km"],
542     "avg_dist_per_vehicle": r["avg_dist_per_vehicle"],
543 })
544
545 detail_rows.append({
546     "scenario_p": r["p"],
547     "buffer_city": s["buffer_city"],
548     "assigned_wilayas": ", ".join(s["assigned_wilayas"]),
549     "n_agents": s["n_agents"],
550     "total_vehicles": s["total_vehicles"],
551     "avg_daily_demand": s["avg_daily_demand"],
552     "avg_weekly_demand": s["avg_weekly_demand"],
553     "avg_daily_general": s["avg_daily_gen"],
554     "avg_daily_f500": s["avg_daily_f500"],
555     "fill_time_gen_days": s["fill_time_gen_days"],
556     "fill_time_f500_days": s["fill_time_f500_days"],
557     "avg_distance_assigned_km": s["avg_distance_assigned_km"],
558     "max_distance_assigned_km": s["max_distance_assigned_km"],
559 })
560
561 df_kpi = pd.DataFrame(kpi_rows)
562 df_detail = pd.DataFrame(detail_rows)
563
564 df_kpi.to_csv(OUTPUT_DIR + "scenario_buffer_kpi.csv", index=False)
565 df_detail.to_csv(OUTPUT_DIR + "scenario_buffer_detail.csv", index=False)
566
567 print(f"[OK] scenario_buffer_kpi.csv saved -> {len(df_kpi)} rows")
568 print(f"[OK] scenario_buffer_detail.csv saved -> {len(df_detail)} rows")
569
570 # =====
571 # BLOCK 10 -- ELBOW PLOT
572 # =====
573 ps = [r["p"] for r in results]
574 avg_dists = [r["avg_dist_per_vehicle"] for r in results]
575 avg_daily = [
576     np.mean([s["avg_daily_demand"] for s in r["center_stats"]])
577     for r in results
578 ]
579 fill_gen = [
580     np.nanmean([s["fill_time_gen_days"] for s in r["center_stats"] if s["fill_time_gen_days"]])
581     for r in results
582 ]
583
584 fig, axes = plt.subplots(1, 3, figsize=(16, 5))
585
586 axes[0].plot(ps, avg_dists, "o-", color="steelblue", linewidth=2.5, markersize=8)
587 for p, v in zip(ps, avg_dists):
588     axes[0].annotate(f"{v:.0f}", (p, v), textcoords="offset points", xytext=(6, 5), fontsize=9)
589 axes[0].set_title("Elbow -- Avg Distance per Vehicle")
590 axes[0].set_xlabel("p (number of buffers)")
591 axes[0].set_ylabel("km")
592 axes[0].set_xticks(ps)
593 axes[0].grid(True, linestyle="--", alpha=0.5)
594
595 axes[1].bar(ps, avg_daily, color="seagreen", alpha=0.8)
596 axes[1].set_title("Avg Daily Demand per Buffer")
597 axes[1].set_xlabel("p (number of buffers)")
598 axes[1].set_ylabel("vehicles/day")
599 axes[1].set_xticks(ps)
600 axes[1].grid(True, linestyle="--", alpha=0.4)
601
602 axes[2].plot(ps, fill_gen, "s-", color="tomato", linewidth=2.5, markersize=8)
603 for p, v in zip(ps, fill_gen):
604     axes[2].annotate(f"{v:.1f}d", (p, v), textcoords="offset points", xytext=(6, 5), fontsize=9)
605 axes[2].set_title("Avg Fill Time -- General Vehicles")
606 axes[2].set_xlabel("p (number of buffers)")
607 axes[2].set_ylabel("days to fill 1 truck")
608 axes[2].set_xticks(ps)

```

```

609 axes[2].grid(True, linestyle="--", alpha=0.5)
610
611 plt.suptitle("Stellantis Buffer Network -- Scenario Comparison", fontsize=13, fontweight="bold")
612 plt.tight_layout()
613 plt.savefig(OUTPUT_DIR + "scenario_elbow_full.png", dpi=150)
614 plt.show()
615
616 print("[OK] scenario_elbow_full.png saved")
617
618
619 # =====
620 # BLOCK 11 -- FILL TIME DETAIL CSV
621 # =====
622 fill_rows = []
623
624 for r in results:
625     for s in r["center_stats"]:
626         fill_rows.append({
627             "scenario_p": r["p"],
628             "buffer_city": s["buffer_city"],
629             "avg_daily_general": s["avg_daily_gen"],
630             "avg_daily_f500": s["avg_daily_f500"],
631             "truck_cap_general": TRUCK_CAP,
632             "truck_cap_f500": TRUCK_CAP_F500,
633             "fill_time_gen_days": s["fill_time_gen_days"],
634             "fill_time_f500_days": s["fill_time_f500_days"],
635             "fill_time_gen_hours": round(s["fill_time_gen_days"] * 24, 1) if s["fill_time_gen_days"] is not
None else None,
636             "fill_time_f500_hours": round(s["fill_time_f500_days"] * 24, 1) if s["fill_time_f500_days"] is
not None else None,
637         })
638
639 df_fill = pd.DataFrame(fill_rows)
640 df_fill.to_csv(OUTPUT_DIR + "fill_time_per_buffer_per_scenario.csv", index=False)
641
642 print("[OK] fill_time_per_buffer_per_scenario.csv saved")
643
644 # =====
645 # BLOCK X -- FULL ALGERIA MAPS WITH AUTOMATIC GEOJSON DOWNLOAD
646 # =====
647 import os
648 import re
649 import unicodedata
650 import warnings
651 import requests
652 import pandas as pd
653 import geopandas as gpd
654 import matplotlib.pyplot as plt
655 import matplotlib.patches as mpatches
656 from matplotlib.colors import to_hex
657
658 BASE_DIR = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/buffer_scenarios_results/"
659 ALT_DIR = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/"
660 MAP_DIR = os.path.join(BASE_DIR, "scenario_maps.png")
661 os.makedirs(MAP_DIR, exist_ok=True)
662
663 def find_file(*paths):
664     for p in paths:
665         if os.path.exists(p):
666             return p
667     return None
668
669 # -----
670 # AUTOMATIC GEOJSON RESTORATION
671 # -----
672 geojson_target_path = os.path.join(BASE_DIR, "all_wilayas.geojson")
673
674 # Check if file exists anywhere; if not, download it
675 existing_geojson = find_file(
676     geojson_target_path,
677     os.path.join(ALT_DIR, "all_wilayas.geojson")
678 )

```

```

679
680 if existing_geojson is None:
681     print("[!] 'all_wilayas.geojson' not found. Fetching public Algeria boundaries...")
682     # Public URL hosting verified clean coordinates for Algerian Wilayas
683     url = "https://raw.githubusercontent.com/balsamiq/historical-geojson/master/geojson/algeria-provinces.
        geojson"
684     try:
685         response = requests.get(url, timeout=15)
686         response.raise_for_status()
687
688         # Ensure the destination directory exists
689         os.makedirs(os.path.dirname(geojson_target_path), exist_ok=True)
690
691         with open(geojson_target_path, "wb") as f:
692             f.write(response.content)
693         print(f"[OK] Successfully downloaded and restored map to: {geojson_target_path}")
694     except Exception as e:
695         print(f"[ERR] Failed to download map data: {e}")
696         print("Please manually upload 'all_wilayas.geojson' or check internet connection.")
697
698 # -----
699 # PATH ASSIGNMENTS & VERIFICATION
700 # -----
701 assignment_path = find_file(
702     os.path.join(BASE_DIR, "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv"),
703     os.path.join(ALT_DIR, "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv")
704 )
705 kpi_path = find_file(
706     os.path.join(BASE_DIR, "scenario_buffer_kpi.csv"),
707     os.path.join(ALT_DIR, "scenario_buffer_kpi.csv")
708 )
709 geojson_path = find_file(
710     geojson_target_path,
711     os.path.join(ALT_DIR, "all_wilayas.geojson")
712 )
713
714 if assignment_path is None:
715     raise FileNotFoundError("agent_buffer_assignment_by_scenario.csv not found.")
716 if kpi_path is None:
717     raise FileNotFoundError("scenario_buffer_kpi.csv not found.")
718 if geojson_path is None:
719     raise FileNotFoundError("all_wilayas.geojson not found.")
720
721 # -----
722 # DATA LOADING & CLEANING
723 # -----
724 df_assign = pd.read_csv(assignment_path)
725 df_kpi_map = pd.read_csv(kpi_path)
726
727 with warnings.catch_warnings():
728     warnings.simplefilter("ignore")
729     gdf = gpd.read_file(geojson_path)
730
731 def norm_name(s):
732     s = "" if pd.isna(s) else str(s)
733     s = unicodedata.normalize("NFKD", s).encode("ascii", "ignore").decode("ascii")
734     s = s.upper().strip()
735     s = re.sub(r"^[^A-Z0-9]+", " ", s)
736     s = re.sub(r"\s+", " ", s).strip()
737     return s
738
739 # Crucial lookup mapping to solve the Algiers/Alger mismatch
740 ALIASES = {
741     "ALGIERS": "ALGER",
742     "ALGER": "ALGER",
743     "NAAMA": "NAAMA",
744     "NAMA": "NAAMA",
745     "M SILA": "M'SILA",
746     "MSILA": "M'SILA",
747     "M'SILA": "M'SILA",
748     "AIN TEMOUCHENT": "AIN TEMOUCHENT",
749     "AIN DEFLA": "AIN DEFLA",

```

```

750 "OUM EL BOUAGHI": "OUM EL BOUAGHI",
751 "SOUK AHRAS": "SOUK AHRAS",
752 "BORDJ BOU ARRERIDJ": "BORDJ BOU ARRERIDJ",
753 "EL OUED": "EL OUED",
754 "TEBESSA": "TEBESSA",
755 "BEJAIA": "BEJAIA",
756 "TIZI OUZOU": "TIZI OUZOU",
757 "OUARGLA": "OUARGLA",
758 }
759
760 # Safely identify the name column fallback in the downloaded GeoJSON
761 name_col = 'name' if 'name' in gdf.columns else (gdf.select_dtypes(include=['object']).columns[0] if len(gdf
    .columns) > 0 else 'name')
762
763 gdf["wilaya_key"] = gdf[name_col].apply(norm_name)
764 gdf["wilaya_key"] = gdf["wilaya_key"].replace(ALIASES)
765 gdf = gdf.to_crs(epsg=4326)
766
767 cent = gdf.copy()
768 cent["geometry"] = cent.geometry.representative_point()
769 cent["lon"] = cent.geometry.x
770 cent["lat"] = cent.geometry.y
771 centroid_lookup = cent.set_index("wilaya_key")[["lon", "lat"]].to_dict("index")
772
773 def build_color_map(buffers):
774     cmap = plt.cm.get_cmap("tab20", max(len(buffers), 1))
775     return {b: to_hex(cmap(i % cmap.N)) for i, b in enumerate(buffers)}
776
777 scenario_cols = [c for c in df_assign.columns if c.startswith("scenario_") and "buffer" in c]
778
779 # -----
780 # MAP GENERATION LOOP
781 # -----
782 for scen_col in scenario_cols:
783     scen_num = int(scen_col.split("_")[1]) + 1
784     scen_rows = df_kpi_map[df_kpi_map["scenario_p"] == scen_num].copy()
785     if scen_rows.empty:
786         continue
787
788     tmp = df_assign[["current_wilaya", scen_col]].copy()
789     tmp.columns = ["wilaya", "buffer"]
790     tmp["wilaya"] = tmp["wilaya"].apply(norm_name).replace(ALIASES)
791     tmp["buffer"] = tmp["buffer"].apply(norm_name).replace(ALIASES)
792
793     buf_demand = scen_rows.groupby("buffer_city", as_index=False)["avg_daily_demand"].mean()
794     buf_demand["buffer_city"] = buf_demand["buffer_city"].apply(norm_name).replace(ALIASES)
795
796     buffers = buf_demand["buffer_city"].tolist()
797     color_map = build_color_map(buffers)
798     max_buffer_demand = max(buf_demand["avg_daily_demand"].max(), 1e-9)
799     buffer_demand_map = buf_demand.set_index("buffer_city")["avg_daily_demand"].to_dict()
800
801     map_df = gdf[["wilaya_key", "geometry"]].copy().merge(tmp, left_on="wilaya_key", right_on="wilaya", how=
        "left")
802     map_df["buffer"] = map_df["buffer"].fillna("UNASSIGNED")
803
804     fig, ax = plt.subplots(1, 1, figsize=(15, 15))
805
806     gdf.plot(ax=ax, color="#F2F2F2", edgecolor="#CFCFCF", linewidth=0.6)
807
808     for buf in buffers:
809         sub = map_df[map_df["buffer"] == buf]
810         if sub.empty:
811             continue
812         sub.plot(ax=ax, color=color_map[buf], edgecolor="white", linewidth=0.7, alpha=0.65)
813
814     # small dots on all agent wilayas
815     agent_wilayas = tmp["wilaya"].dropna().unique().tolist()
816     for w in agent_wilayas:
817         coord = centroid_lookup.get(w)
818         if coord is None:
819             continue

```

```

820     buf = tmp.loc[tmp["wilaya"] == w, "buffer"].iloc[0]
821     ax.scatter(coord["lon"], coord["lat"], s=14, color=color_map.get(buf, "#333333"), edgecolors="black"
, linewidths=0.4, zorder=6)
822
823     # large buffer dots on buffer wilayas
824     for buf in buffers:
825         coord = centroid_lookup.get(buf)
826         if coord is None:
827             continue
828         demand = buffer_demand_map.get(buf, 0.0)
829         size = 130 + 900 * (demand / max_buffer_demand)
830         ax.scatter(coord["lon"], coord["lat"], s=size, color=color_map[buf], edgecolors="black", linewidths
=1.2, alpha=0.9, zorder=7)
831         ax.text(coord["lon"], coord["lat"], buf, fontsize=9, ha="center", va="bottom", zorder=8)
832
833     legend_handles = [mpatches.Patch(color=color_map[b], label=b) for b in buffers]
834     if legend_handles:
835         ax.legend(handles=legend_handles, loc="lower left", fontsize=8, frameon=True, title="Buffers")
836
837     ax.set_title(f"Scenario Map -- {scen_col}", fontsize=14, fontweight="bold")
838     ax.set_axis_off()
839
840     png_path = os.path.join(MAP_DIR, f"{scen_col}.png")
841     plt.savefig(png_path, dpi=300, bbox_inches="tight")
842     plt.close(fig)
843     print(f"[OK] saved {os.path.basename(png_path)}")
844
845     print(f"[OK] PNG maps saved in: {MAP_DIR}")

```

Annexe B

Code d'affectation des canaux de distribution (retrait / dépannage)

Cette annexe reproduit le code Python utilisé pour l'affectation des canaux de distribution aval (section 3.3) : contrainte de liquidité élastique au revenu, double limiteur temporel et économique, cartographie des zones de service (retrait / dépannage) par distorsion anisotrope, et dimensionnement de la flotte de dépannage sur la cible de 10 % de livraison.

Listing B.1 – Affectation des canaux retrait/dépannage et dimensionnement de la flotte

```
1 import os
2 import re
3 import numpy as np
4 import pandas as pd
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import geopandas as gpd
7 from scipy.interpolate import CubicSpline
8
9 # =====
10 # 1. EMPIRICAL PARAMETERS & ONS AVERAGE SALARY ANCHORS
11 # =====
12 TAXI_PER_KM = 4.5
13 DEP_ACTIVATION = 5313.597411
14 DEP_PER_KM = 71.5165452
15 MAX_ONE_WAY_HOURS = 4.0 # Non-negotiable physical travel limiter
16
17 # --- ONS AVERAGE SALARY & ASSET VALUES FROM METHODOLOGICAL REPORT ---
18 ONS_AVERAGE_SALARY = 45000.0 # Net average monthly salary in Algeria (ONS Enquete)
19 VEHICLE_PRICE_DZD = 2350000 # Fiat Grande Panda retail base
20 ALPHA_BASE = 0.03 # Nominal global transaction friction ceiling
21
22 # 1. Uncompromised economic sacrifice of a full day of missed work (22 working days/month)
23 DAILY_WAGE_LOSS = ONS_AVERAGE_SALARY / 22.0 # Evaluates strictly to ~2,045.45 DZD
24
25 # 2. Income-Elastic maximum willingness-to-pay threshold (Cobb-Douglas/Engel)
26 ALPHA_BLENDED = ALPHA_BASE * np.sqrt(ONS_AVERAGE_SALARY / VEHICLE_PRICE_DZD)
27 V_DROP_CEILING = VEHICLE_PRICE_DZD * ALPHA_BLENDED # Evaluates strictly to 9,755.76 DZD
28
29 # Exact mathematical delivery boundary limit derived directly from budget cap
30 TRUE_DELIVERY_MAX_KM = (V_DROP_CEILING - DEP_ACTIVATION) / DEP_PER_KM # Exactly 62.11 km
31
32 WILAYA_COORDS = {
33     'Adrar': (27.87, -0.29), 'Chlef': (36.16, 1.33), 'Laghouat': (33.80, 2.87), 'Oum El Bouaghi': (35.87,
34     7.11),
35     'Batna': (35.56, 6.17), 'Bejaia': (36.75, 5.08), 'Biskra': (34.85, 5.73), 'Bechar': (31.62, -2.22),
36     'Blida': (36.47, 2.83), 'Bouira': (36.37, 3.90), 'Tamanrasset': (22.79, 5.52), 'Tebessa': (35.40, 8.12),
37     'Tlemcen': (34.88, -1.32), 'Tiaret': (35.37, 1.32), 'Tizi Ouzou': (36.71, 4.05), 'Algiers': (36.75,
38     3.05),
```

```

37 'Djelfa': (34.67, 3.25), 'Jijel': (36.82, 5.77), 'Setif': (36.19, 5.41), 'Saida': (34.83, 0.15),
38 'Skikda': (36.88, 6.90), 'Sidi Bel Abbes': (35.20, -0.63), 'Annaba': (36.90, 7.76), 'Guelma': (36.46,
39 7.43),
40 'Constantine': (36.36, 6.61), 'Medea': (36.26, 2.75), 'Mostaganem': (35.93, 0.09), 'M\'Sila': (35.70,
41 4.54),
42 'Mascara': (35.40, 0.14), 'Ouargla': (31.95, 5.32), 'Oran': (35.69, -0.63), 'El Bayadh': (33.68, 1.02),
43 'Illizi': (26.48, 8.48), 'Bordj Bou Arreridj': (36.07, 4.76), 'Boumerdes': (36.76, 3.47), 'El Tarf':
44 (36.77, 8.31),
45 'Tindouf': (27.67, -8.13), 'Tissemsilt': (35.60, 1.81), 'El Oued': (33.36, 6.85), 'Khenchela': (35.43,
46 7.14),
47 'Souk Ahras': (36.29, 7.95), 'Tipaza': (36.59, 2.44), 'Mila': (36.45, 6.26), 'Ain Defla': (36.26, 2.02),
48 'Naama': (33.27, -0.32), 'Ain Temouchent': (35.30, -1.14), 'Ghardaia': (32.49, 3.67), 'Relizane':
49 (35.74, 0.55),
50 'Timimoun': (29.26, 0.23), 'Bordj Badji Mokhtar': (21.33, 0.95), 'Ouled Djellal': (34.43, 5.07), 'Beni
51 Abbes': (30.13, -2.17),
52 'In Salah': (27.19, 2.46), 'In Guezzam': (19.57, 5.77), 'Touggourt': (33.10, 6.06), 'Djanet': (24.55,
53 9.48),
54 'El M\'Ghair': (33.95, 5.92), 'El Meniaa': (30.58, 2.88)
55 }
56
57 def clean_text(text):
58     t = str(text).lower()
59     t = t.replace('e', 'e').replace('e', 'e').replace('i', 'i').replace('a', 'a')
60     return re.sub(r'^[a-z]', '', t)
61
62 WILAYA_MAP = {clean_text(k): v for k, v in WILAYA_COORDS.items()}
63 WILAYA_MAP['alger'] = (36.75, 3.05)
64
65 def get_coords(wilaya_name):
66     c_name = clean_text(wilaya_name)
67     if c_name in WILAYA_MAP: return WILAYA_MAP[c_name]
68     for k, v in WILAYA_MAP.items():
69         if k in c_name or c_name in k: return v
70     return (36.75, 3.05)
71
72 def load_and_melt_matrix(file_path, value_name):
73     if not os.path.exists(file_path):
74         raise FileNotFoundError(f"[ERR] Missing required network file: '{file_path}'.")
75     df = pd.read_csv(file_path, index_col=0)
76     df = df.reset_index().rename(columns={'index': 'origin_wilaya'})
77     return df.melt(id_vars='origin_wilaya', var_name='dest_wilaya', value_name=value_name)
78
79 # =====
80 # 2. DATA UNIFICATION VIA REAL OSRM MATRIX
81 # =====
82 drive_base_path = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/"
83
84 if os.path.exists(drive_base_path):
85     base_path = drive_base_path
86     scenarios_path = os.path.join(base_path, "buffer_scenarios_results", "
87     agent_buffer_assignment_by_scenario.csv")
88     if not os.path.exists(scenarios_path):
89         scenarios_path = os.path.join(base_path, "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv")
90 else:
91     base_path = "."
92     scenarios_path = "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv"
93
94 distance_matrix_path = os.path.join(base_path, "distance_matrix_capitals.csv")
95 duration_matrix_path = os.path.join(base_path, "duration_matrix_ville_osrm_min -
96     duration_matrix_ville_osrm_min.csv")
97 distortion_path = os.path.join(base_path, "distortion_factors.csv")
98 shapefile_path = os.path.join(base_path, "gadm41_DZA_1.shp")
99
100 dist_melted = load_and_melt_matrix(distance_matrix_path, 'distance_km')
101 dur_melted = load_and_melt_matrix(duration_matrix_path, 'duration_minutes')
102 network_matrix = pd.merge(dist_melted, dur_melted, on=['origin_wilaya', 'dest_wilaya'])
103
104 # Convert true OSRM matrix values directly to decimal hours
105 network_matrix['duration_hours'] = network_matrix['duration_minutes'] / 60.0
106
107 scenarios_df = pd.read_csv(scenarios_path)
108 distortion_df = pd.read_csv(distortion_path)

```

```

100
101 try:
102     algeria_map = gpd.read_file(shapefile_path)
103 except Exception:
104     algeria_map = None
105
106 # =====
107 # 3. SPATIAL GEOMETRIC SPLINE DISTORTION
108 # =====
109 def get_smooth_splash_polygon(buffer_name, target_radius_km, distortion_df, resolution=300):
110     lat_b, lon_b = get_coords(buffer_name)
111     km_per_degree = 111.0
112     b_clean = clean_text(buffer_name)
113     matched_df = pd.DataFrame()
114
115     for w in distortion_df['wilaya'].unique():
116         if clean_text(w) in b_clean or b_clean in clean_text(w):
117             matched_df = distortion_df[distortion_df['wilaya'] == w].copy()
118             break
119
120     buffer_data = matched_df
121     angles = np.linspace(0, 2 * np.pi, resolution)
122
123     if buffer_data.empty:
124         alphas = np.ones(resolution) * 1.15
125     else:
126         buffer_data['math_rad'] = np.radians((90 - buffer_data['bearing_deg']) % 360)
127         buffer_data = buffer_data.sort_values(by='math_rad')
128         rad_inputs = np.append(buffer_data['math_rad'].values, buffer_data['math_rad'].values[0] + 2*np.pi)
129         alpha_inputs = np.append(buffer_data['alpha'].values, buffer_data['alpha'].values[0])
130         cs = CubicSpline(rad_inputs, alpha_inputs, bc_type='periodic')
131         alphas = cs(angles)
132
133     organic_noise = 1.0 + 0.05 * np.sin(6 * angles)
134     final_alphas = alphas * organic_noise
135     return lon_b + (target_radius_km / km_per_degree) * final_alphas * np.cos(angles), lat_b + (
136         target_radius_km / km_per_degree) * final_alphas * np.sin(angles)
137
138 # =====
139 # 4. EXECUTING STRICT DUAL-LIMITER ALLOCATIONS
140 # =====
141 def run_distribution_allocation():
142     scenario_columns = [col for col in scenarios_df.columns if "scenario_" in col.lower()]
143     allocation_report = []
144
145     print(f"[$] Hard Income Budget Cap (V_drop): {V_DROP_CEILING:,.2f} DZD")
146     print(f"[w] Locked Daily Opportunity Wage Loss: {DAILY_WAGE_LOSS:,.2f} DZD")
147     print("[t] System Running Exclusively on Real OSRM Duration Matrices.\n")
148
149     for sc_col in scenario_columns:
150         active_hubs = [h for h in scenarios_df[sc_col].unique() if pd.notna(h)]
151
152         for wilaya in WILAYA_COORDS.keys():
153             w_clean = clean_text(wilaya)
154
155             is_covered_by_any_self_pickup = False
156             hub_evaluations = {}
157
158             for hub in active_hubs:
159                 h_clean = clean_text(hub)
160                 lane = network_matrix[
161                     (network_matrix['origin_wilaya'].apply(clean_text) == h_clean) &
162                     (network_matrix['dest_wilaya'].apply(clean_text) == w_clean)
163                 ]
164
165                 if lane.empty:
166                     continue
167
168                 dist_km = lane['distance_km'].values[0]
169                 dur_hr = lane['duration_hours'].values[0]
170
171                 p_dep = DEP_ACTIVATION + (DEP_PER_KM * dist_km)

```

```

171     c_pickup = (TAXI_PER_KM * dist_km) + DAILY_WAGE_LOSS
172
173     # --- LIMITER 1: Physical/Temporal Constraint ---
174     if dur_hr > MAX_ONE_WAY_HOURS:
175         # Self-pickup is physically impossible. They must use delivery if it fits their budget.
176         if p_dep <= V_DROP_CEILING:
177             hub_evaluations[hub] = ('VALID_DEPANNAGE', dist_km)
178         else:
179             hub_evaluations[hub] = ('BREACHED_BUDGET_CAP', dist_km)
180
181     # --- LIMITER 2: Economic Utility Constraint ---
182     else:
183         if c_pickup <= p_dep:
184             # Self-pickup is economically superior and time-feasible
185             is_covered_by_any_self_pickup = True
186             hub_evaluations[hub] = ('SELF_PICKUP', dist_km)
187         elif p_dep < c_pickup and p_dep <= V_DROP_CEILING:
188             # Travel time is under 4h, but flatbed is cheaper than losing a full day's work wage
189             + taxi
190             hub_evaluations[hub] = ('VALID_DEPANNAGE', dist_km)
191         else:
192             # Flatbed breaks their cash threshold and they can't/won't pick up
193             hub_evaluations[hub] = ('BREACHED_BUDGET_CAP', dist_km)
194
195     # Strip entirely from the final Depannage register if self-pickup handles it
196     if is_covered_by_any_self_pickup:
197         continue
198
199     for hub in active_hubs:
200         if hub in hub_evaluations:
201             status, valid_dist = hub_evaluations[hub]
202             if status == 'VALID_DEPANNAGE':
203                 allocation_report.append({
204                     'Scenario': sc_col,
205                     'Hub-Origin': hub.upper(),
206                     'Wilaya-Destination': wilaya,
207                     'Network-Distance_KM': round(valid_dist, 2)
208                 })
209
210 if allocation_report:
211     alloc_df = pd.DataFrame(allocation_report)
212     overlap_counts = alloc_df.groupby(['Scenario', 'Wilaya-Destination'])['Hub-Origin'].transform('count')
213
214     alloc_df['Pro_Rata_Weight'] = 1.0 / overlap_counts
215     alloc_df['Allocation_Ratio'] = alloc_df.apply(
216         lambda r: f"1/{int(1/r['Pro_Rata_Weight'])}" if r['Pro_Rata_Weight'] > 0 else "0", axis=1
217     )
218
219     print("[chart] RECONCILED OSRM-TIME & INCOME CONTROLLING DEPANNAGE ALLOCATIONS:")
220     print(alloc_df.to_string(index=False))
221
222     csv_save_path = os.path.join(base_path, "clean_depannage_allocations_only.csv")
223     alloc_df.to_csv(csv_save_path, index=False)
224     print(f"[save] SUCCESS: Filtered table exported to: '{csv_save_path}'")
225 else:
226     print("[!] Zero regional destinations fall into the strict Depannage window under this framework.")
227
228 print("-" * 80)
229
230 # --- MAP RENDER LOOP ---
231 for sc_col in scenario_columns:
232     active_buffers = scenarios_df[sc_col].dropna().unique()
233     print(f"[map] Rendering Maps for Active Configuration: '{sc_col}'")
234
235     fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 12))
236     ax.set_facecolor('#f8fafc')
237
238     if algeria_map is not None:
239         algeria_map.plot(ax=ax, color='#e2e8f0', edgecolor='#cbd5e1', linewidth=1.2, zorder=1)
240
241     for buffer in active_buffers:
242         buffer_str = str(buffer).strip()

```

```

241     if buffer_str == "" or "agent" in buffer_str.lower(): continue
242
243     b_clean = clean_text(buffer_str)
244     lanes = network_matrix[network_matrix['origin_wilaya'].apply(lambda x: b_clean in clean_text(x)
or clean_text(x) in b_clean)]
245
246     d1_thresholds = []
247     if not lanes.empty:
248         for _, lane in lanes.iterrows():
249             d, t = lane['distance_km'], lane['duration_hours']
250
251             p_dep = DEP_ACTIVATION + (DEP_PER_KM * d)
252             c_pickup = (TAXI_PER_KM * d) + DAILY_WAGE_LOSS
253
254             # Orange zone boundaries: Real OSRM time <= 4h AND cheaper than delivery
255             if t <= MAX_ONE_WAY_HOURS and c_pickup <= p_dep:
256                 d1_thresholds.append(d)
257
258     d1_r = np.max(d1_thresholds) if d1_thresholds else 25.0
259     d2_r = TRUE_DELIVERY_MAX_KM # Bounded strictly by the direct budget cap line (~62.11 km)
260     lat_b, lon_b = get_coords(buffer_str)
261
262     # Map the exact visual anisotropic projections using localized distortion factors
263     x1, y1 = get_smooth_splash_polygon(buffer_str, d1_r, distortion_df)
264     ax.fill(x1, y1, color='#f59e0b', alpha=0.18, label='Self-Pickup' if 'Self-Pickup' not in ax.
get_legend_handles_labels()[1] else "", zorder=2)
265
266     x2, y2 = get_smooth_splash_polygon(buffer_str, d2_r, distortion_df)
267     ax.fill(x2, y2, color='#3b82f6', alpha=0.10, label='Depannage' if 'Depannage' not in ax.
get_legend_handles_labels()[1] else "", zorder=3)
268
269     ax.scatter(lon_b, lat_b, color='#ef4444', s=90, edgecolors='white', zorder=5)
270     ax.text(lon_b + 0.1, lat_b + 0.1, buffer_str.upper(), weight='bold', fontsize=9,
bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8, edgecolor='none'))
271
272     plt.title(f"Operational Allocation Zones - {sc_col.upper()}\nMax Delivery Cap: {V_DROP_CEILING:,.2f}
DZD | Strict 4H Time Cutoff Active")
273
274     plt.show()
275
276 # Run pure econometric script
277 run_distribution_allocation()
278
279 import os
280 import re
281 import io
282 import numpy as np
283 import pandas as pd
284
285 # =====
286 # 1. PARAMETERS & LOGISTICAL MODEL CONSTRAINTS
287 # =====
288 MAX_ONE_WAY_HOURS = 4.0 # Strict maximum operating limit for a trip
289 SHIFT_HOURS = 8.0 # Standard delivery shift length per truck
290 DELIVERY_TARGET = 0.10 # 10% home delivery share (90% self-pickup)
291
292 # Local hardcoded assignment data from your file snippet (Starting at p=3)
293 csv_data = """agent,current_wilaya,scenario_1_buffer (2 buffers),scenario_2_buffer (3 buffers),
scenario_3_buffer (4 buffers),scenario_4_buffer (5 buffers),scenario_5_buffer (6 buffers)
294 BENIA SERVICES AUTO,M'SILA,ALGER,ALGER,BATNA,DJELFA,DJELFA
295 BOUDOUKHANA AUTO BIS,SKIKDA,ALGER,IJEL,IJEL,IJEL,ANNABA
296 CENTER AUTOMOBILE TOUHAMI,OUARGLA,ALGER,IJEL,BATNA,DJELFA,DJELFA
297 EURL ACADEMIE AUTOMOBILES PLUS,OUM EL BOUAGHI,ALGER,IJEL,BATNA,BATNA,BATNA
298 EURL AUTOFIS CAR SERVICES,SETIF,ALGER,IJEL,BATNA,BATNA,BATNA
299 EURL AUTOMOVE,TLEMCEN,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN
300 EURL GAMMA AUTO,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN
301 EURL GMS COMPANY,SETIF,ALGER,IJEL,BATNA,BATNA,BATNA
302 EURL GUICHENITI VEHICULES ET SERVIC,BLIDA,ALGER,ALGER,ALGER,ALGER,ALGER
303 EURL HAMMADI AUTO,BECHAR,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN
304 EURL HERENCIA,AIN TEMOUCHENT,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN,ORAN
305 EURL LAHCENE AUTOMOBILES,TEBESSA,ALGER,IJEL,BATNA,BATNA,BATNA
306 EURL OULDLAKHDAR AUTOMOBILES,SOUK AHRAS,ALGER,IJEL,BATNA,BATNA,ANNABA
307 EURL PCDM,ALGER,ALGER,ALGER,ALGER,ALGER,ALGER

```

```

308 EURL SAIDA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
309 EURL UNION AUTO KABOUYA, MOSTAGANEM, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
310 EURL VYK MOTORS EXPRESS, RELIZANE, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
311 EURL EC AUTO, AIN DEFLA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
312 KECHKAR EL HADI, BLIDA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
313 SARL ACC ALGERIAN CARS COMPANY, TIPAZA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
314 SARL AGS AUTOMOBILES, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
315 SARL ATLAS SPEED, CONSTANTINE, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
316 SARL AUTO CITY, NAAMA, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
317 SARL AUTO G, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
318 SARL AUTOLYNA HOUSE, ANNABA, ALGER, JIJEL, JIJEL, JIJEL, ANNABA
319 SARL BARA AUTO CENTER, EL OUED, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
320 SARL BENALIOUA SERVICE, SAIDA, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
321 SARL BENFLIS MOTORS GROUP, BATNA, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
322 SARL BENTOUATI CRAFT AUTO, BORDJ BOU ARRERIDJ, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
323 SARL BOURBIA AUTOMOBILE, CONSTANTINE, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
324 SARL CAR WEST, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
325 SARL CEA HAMMOUCHE FRERES, BEJAIA, ALGER, JIJEL, JIJEL, JIJEL, JIJEL
326 SARL CIRTA CARS, CONSTANTINE, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
327 SARL COMPTOIRE AUTOMOBILE, TLEMCEEN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
328 SARL DOUADI AUTOMOTIVE, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
329 SARL EQUINOX AUTO, OUM EL BOUAGHI, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
330 SARL ETIHAD AUTO, MEDEA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
331 SARL GBM AUTO, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
332 SARL GIMA MOTORS, ADRAR, ORAN, ORAN, ORAN, DJELFA, DJELFA
333 SARL GLOBAL AUTO VISION, CONSTANTINE, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
334 SARL GRANDI AUTO, BOUIRA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
335 SARL GROUPE NAOURI, DJELFA, ALGER, ALGER, ALGER, DJELFA, DJELFA
336 SARL HALIL COMMERCE INDUSTRIE, BLIDA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
337 SARL HALIL COMMERCE ET INDUSTRIE, BLIDA, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
338 SARL KHENIFI AUTO FOPC, MASCARA, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
339 SARL KHERIF AUTO STARS, BISKRA, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
340 SARL MASCUA AUTO, KHENCHELA, ALGER, JIJEL, BATNA, BATNA, BATNA
341 SARL MEDIUM AUTO, TIZI OUZOU, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
342 SARL MOUSSOUS AUTO, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
343 SARL ORLEANS AUTO, CHLEF, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
344 SARL SADAREP, TIZI OUZOU, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
345 SARL SIAD, TIZI OUZOU, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
346 SARL SOVAM AUTO, BOUMERDES, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
347 SARL TALHA AUTO EUCALYPTUS, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
348 SARL TEMMAM DISTRIBUTION, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER, ALGER
349 SARL TRANS LOC MAIN, LAGHOUEAT, ALGER, ALGER, ALGER, DJELFA, DJELFA
350 SARL VOLK AUTO, BEJAIA, ALGER, JIJEL, JIJEL, JIJEL, JIJEL
351 SARL VYK MOTORS EXPRESS, RELIZANE, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN
352 SNC TAHER AUTO PIECES ABDELAZIZ, JIJEL, ALGER, JIJEL, JIJEL, JIJEL, JIJEL
353 SPA ELSECOM AUTOMOBILES, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN, ORAN""
354
355 scenarios_df = pd.read_csv(io.StringIO(csv_data))
356
357 def clean_text(text):
358     t = str(text).lower().strip()
359     t = t.replace('e', 'e').replace('e', 'e').replace('i', 'i').replace('a', 'a')
360     return re.sub(r'^a-z', '', t)
361
362 # Dynamic environment file pathing setup
363 drive_base_path = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/"
364 base_path = drive_base_path if os.path.exists(drive_base_path) else "./"
365
366 # Load the KPI data file using explicit column name "Ville"
367 kpi_df = pd.read_csv(os.path.join(base_path, "kpi_summary_diagnosis.csv"))
368 kpi_df['wilaya_clean'] = kpi_df['Ville'].apply(clean_text)
369
370 # --- AUTOMATIC VOLUME COLUMN DETECTION ---
371 detected_volume_col = None
372 for candidate in ['avg_daily_demand', 'daily_demand', 'demand', 'avg_daily', 'volume']:
373     matched = [c for c in kpi_df.columns if candidate in c.lower()]
374     if matched:
375         detected_volume_col = matched[0]
376         break
377
378 if not detected_volume_col:
379     num_cols = kpi_df.select_dtypes(include=[np.number]).columns

```

```

380     num_cols = [c for c in num_cols if 'id' not in c.lower()]
381     if num_cols:
382         detected_volume_col = num_cols[0]
383     else:
384         raise KeyError("Could not identify the demand column in kpi_summary_diagnosis.csv.")
385
386     # Load underlying physical routing OSRM matrix
387     df_dist = pd.read_csv(os.path.join(base_path, "distance_matrix_capitals.csv"), index_col=0).reset_index().
        rename(columns={'index': 'origin_wilaya'})
388     dist_melted = df_dist.melt(id_vars='origin_wilaya', var_name='dest_wilaya', value_name='distance_km')
389
390     df_dur = pd.read_csv(os.path.join(base_path, "duration_matrix_ville_osrm_min -
        duration_matrix_ville_osrm_min.csv"), index_col=0).reset_index().rename(columns={'index': '
        origin_wilaya'})
391     dur_melted = df_dur.melt(id_vars='origin_wilaya', var_name='dest_wilaya', value_name='duration_minutes')
392
393     network_matrix = pd.merge(dist_melted, dur_melted, on=['origin_wilaya', 'dest_wilaya'])
394     network_matrix['duration_hours'] = network_matrix['duration_minutes'] / 60.0
395     network_matrix['origin_clean'] = network_matrix['origin_wilaya'].apply(clean_text)
396     network_matrix['dest_clean'] = network_matrix['dest_wilaya'].apply(clean_text)
397
398     # Columns mapping starting from 3 buffers up to 6 buffers (Scenario 1 eliminated)
399     column_mapping = {
400         'scenario_2_buffer (3 buffers)': '3',
401         'scenario_3_buffer (4 buffers)': '4',
402         'scenario_4_buffer (5 buffers)': '5',
403         'scenario_5_buffer (6 buffers)': '6'
404     }
405
406     # =====
407     # 2. GRANULAR WORKLOAD AND VEHICLE ANALYSIS LOOPS
408     # =====
409     clean_results = []
410
411     for col_name, sc_digits in column_mapping.items():
412         hub_assignments = {}
413
414         # Isolate assignments per specific active hub
415         for _, row in scenarios_df.iterrows():
416             assigned_hub = str(row[col_name]).strip()
417             agent_wilaya = str(row['current_wilaya']).strip()
418
419             if pd.isna(row[col_name]) or assigned_hub == "" or "nan" in assigned_hub.lower():
420                 continue
421
422             hub_upper = assigned_hub.upper()
423             if hub_upper not in hub_assignments:
424                 hub_assignments[hub_upper] = []
425             hub_assignments[hub_upper].append(agent_wilaya)
426
427         # Process total operational workload durations per hub location
428         for hub_name, assigned_wilayas in hub_assignments.items():
429             total_hub_truck_hours = 0.0
430
431             for wilaya in assigned_wilayas:
432                 h_clean = clean_text(hub_name)
433                 w_clean = clean_text(wilaya)
434
435                 # Extract distinct daily volume metric safely
436                 kpi_match = kpi_df[kpi_df['wilaya_clean'] == w_clean]
437                 if kpi_match.empty:
438                     continue
439                 wilaya_daily_demand = float(kpi_match.iloc[0][detected_volume_col])
440
441                 # SAFE AND RAPID STRING-MATCHING QUERY FOR TRANST TIME
442                 lane = network_matrix[
443                     ((network_matrix['origin_clean'] == h_clean) | (network_matrix['origin_clean'].str.contains(
444                         h_clean, regex=False))) &
445                     ((network_matrix['dest_clean'] == w_clean) | (network_matrix['dest_clean'].str.contains(
446                         w_clean, regex=False)))
447                 ]

```

```

447     if lane.empty:
448         continue
449
450     dur_one_way = lane.iloc[0]['duration_hours']
451
452     # Apply the 4-hour temporal route limit threshold validation
453     if dur_one_way <= MAX_ONE_WAY_HOURS:
454         # 100% Workload hours = Daily Wilaya volume * 2x Round Trip Time
455         total_hub_truck_hours += (wilaya_daily_demand * (2.0 * dur_one_way))
456
457     # Compile final filtered parameters for output dataframe
458     if total_hub_truck_hours > 0:
459         strategic_workload = total_hub_truck_hours * DELIVERY_TARGET
460         trucks_needed = int(np.ceil(strategic_workload / SHIFT_HOURS))
461
462     clean_results.append({
463         'Scenario': f"SCENARIO P={sc_digits}",
464         'Hub Location': hub_name,
465         'Total Load (Hours)': round(total_hub_truck_hours, 2),
466         '10% Workload (Hours)': round(strategic_workload, 2),
467         'Required Trucks': trucks_needed
468     })
469
470 # =====
471 # 3. CONSOLIDATED SUMMARY RENDERING
472 # =====
473 print("\n" + "="*80)
474 print("    [chart] DEPANNAGE WORKLOAD & FLEET REQUIREMENTS SUMMARY (10% TARGET)")
475 print("="*80)
476 print(pd.DataFrame(clean_results).to_string(index=False))
477 print("="*80)

```

Annexe C

Code d'analyse des stocks et de planification de capacité

Cette annexe reproduit le code Python utilisé pour l'analyse des stocks et la planification de capacité par scénario (section 3.4) : calcul des métriques de capacité (*BLOCK H* : quantile P_{90} , pic absolu, plafond de débordement, tendance et taux d'*overflow*) et prévision de la capacité requise à l'horizon 2028 avec décomposition de la surcouche LPG (*BLOCK K*).

Listing C.1 – Métriques de capacité et prévision 2028 des besoins de stockage

```
1 # =====
2 # BLOCK H -- CAPACITY PLANNING METRICS (REPLACES MEAN)
3 # =====
4
5 from scipy.stats import linregress
6 import numpy as np
7 import pandas as pd
8
9 def capacity_metrics(series, window=30, percentile=90):
10     """
11     Computes capacity planning metrics based on new criteria:
12     - Base capacity must cover at least 90% of all days (P90 of raw series).
13     - Hard ceiling: Absolute peak stock cannot exceed capacity by more than 20%.
14     - Chosen capacity is the maximum of these two constraints.
15     """
16     s = series.copy()
17     s.index = pd.to_datetime(s.index)
18
19     # Rolling window metrics (kept for historical trend tracking)
20     rolling_max = s.rolling(window, min_periods=1).max()
21     rolling_p90 = s.rolling(window, min_periods=1).quantile(percentile / 100)
22
23     # Linear trend
24     x = np.arange(len(s))
25     slope, intercept, r, _, _ = linregress(x, s.values)
26     trend = pd.Series(slope * x + intercept, index=s.index)
27
28     # --- NEW CAPACITY LOGIC ---
29     # 1. 90% Days Coverage Requirement
30     p90_coverage = s.quantile(percentile / 100)
31
32     # 2. Max 20% Surplus Requirement (Capacity >= Max Stock / 1.2)
33     max_stock = s.max()
34     surplus_cap_floor = max_stock / 1.20
35
36     # Final suggested capacity satisfies BOTH rules dynamically
37     rental_capacity = max(p90_coverage, surplus_cap_floor)
38     # =====
```

```

39
40 # Days exceeding rental capacity (overflow zone)
41 overflow_days = (s > rental_capacity).sum()
42 overflow_pct = overflow_days / len(s) * 100
43
44 # Calculate actual maximum surplus percentage experienced above capacity
45 max_surplus_pct = ((max_stock - rental_capacity) / rental_capacity * 100) if rental_capacity > 0 else 0
46 max_surplus_pct = max(0, max_surplus_pct) # Clamp to 0% if peak is below capacity
47
48 # Projected value at end of horizon based on trend
49 projected_end = trend.iloc[-1]
50
51 return {
52     "rolling_max":      rolling_max,
53     "rolling_p90":      rolling_p90,
54     "trend":            trend,
55     "rental_capacity":   rental_capacity,
56     "slope_per_day":     slope,
57     "slope_per_month":   slope * 30,
58     "r_squared":         r**2,
59     "overflow_days":     overflow_days,
60     "overflow_pct":      overflow_pct,
61     "max_surplus_pct":   max_surplus_pct,
62     "projected_end":     projected_end,
63     "series_max":        max_stock,
64     "series_p90":        p90_coverage,
65 }
66
67 # =====
68 # BLOCK I -- ENHANCED PLOTS WITH CAPACITY BANDS
69 # =====
70
71 import matplotlib.pyplot as plt
72
73 for s in range(1, 7):
74     fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 6))
75
76     if s == 1:
77         locations = {"ORAN": (stock_oran_s1.reindex(full_horizon, fill_value=0), "black")}
78     else:
79         locations = {}
80         oran_s = stock_series.get((s, "ORAN", "ORAN"))
81         if oran_s is not None:
82             locations["ORAN"] = (oran_s.reindex(full_horizon, fill_value=0), "black")
83         for key in sorted([k for k in stock_series if k[0] == s and k[1] == "BUFFER"], key=lambda x: x[2]):
84             _, _, buf = key
85             i = len(locations)
86             locations[buf] = (stock_series[key].reindex(full_horizon, fill_value=0), f"C{i % 9 + 1}")
87
88     summary_rows = []
89
90     for loc, (series, color) in locations.items():
91         m = capacity_metrics(series)
92
93         # Raw stock
94         series.plot(ax=ax, color=color, alpha=0.5, linewidth=1, label=loc)
95
96         # Trend line
97         m["trend"].plot(ax=ax, color=color, linewidth=2, linestyle="-.",
98                        label=f"{loc} trend (+{m['slope_per_month']:.1f}/mo, R2={m['r_squared']:.2f})")
99
100        # Rental capacity line (Updated label to reflect new constraints)
101        ax.axhline(m["rental_capacity"], color=color, linestyle="--", linewidth=1.5,
102                  label=f"{loc} rental cap ~ {m['rental_capacity']:.0f} "
103                      f"(overflow {m['overflow_pct']:.1f}% days, max surplus {m['max_surplus_pct']:.1f}%)")
104
105        summary_rows.append({
106            "scenario":      s,
107            "location":      loc,
108            "rental_capacity": round(m["rental_capacity"]),
109            "absolute_max":   round(m["series_max"]),

```

```

110         "p90": round(m["series_p90"]),
111         "max_surplus_%": round(m["max_surplus_pct"], 1),
112         "trend_per_month": round(m["slope_per_month"], 2),
113         "r_squared": round(m["r_squared"], 3),
114         "projected_end": round(m["projected_end"]),
115         "overflow_days": m["overflow_days"],
116         "overflow_pct": round(m["overflow_pct"], 1),
117     })
118
119     ax.set_xlim(full_horizon.min(), full_horizon.max())
120     ax.set_title(f"Scenario {s} - Stock with trend & rental capacity bands (90% Day Coverage & Max 20%
121     Surplus Cap)")
122     ax.set_xlabel("Date")
123     ax.set_ylabel("Vehicles in stock")
124     ax.grid(True, alpha=0.3)
125     ax.legend(fontsize=8)
126     plt.tight_layout()
127
128     out_path = OUTPUT_DIR + f"scenario_{s}_capacity_planning.png"
129     plt.savefig(out_path, dpi=150)
130     plt.show()
131     print(f"[OK] Saved {out_path}")
132
133     # Print summary table per scenario
134     df_summary = pd.DataFrame(summary_rows)
135     print(df_summary.to_string(index=False))
136
137     # =====
138     # BLOCK J -- MASTER CAPACITY SUMMARY CSV
139     # =====
140
141     all_rows = []
142     for s in range(1, 7):
143         if s == 1:
144             locations = {"ORAN": stock_oran_s1.reindex(full_horizon, fill_value=0)}
145         else:
146             locations = {}
147             oran_s = stock_series.get((s, "ORAN", "ORAN"))
148             if oran_s is not None:
149                 locations["ORAN"] = oran_s.reindex(full_horizon, fill_value=0)
150                 for key in sorted([k for k in stock_series if k[0] == s and k[1] == "BUFFER"], key=lambda x: x[2]):
151                     _, _, buf = key
152                     locations[buf] = stock_series[key].reindex(full_horizon, fill_value=0)
153
154             for loc, series in locations.items():
155                 m = capacity_metrics(series)
156                 all_rows.append({
157                     "scenario": s,
158                     "location": loc,
159                     "rental_capacity": round(m["rental_capacity"]),
160                     "absolute_max": round(m["series_max"]),
161                     "p90": round(m["series_p90"]),
162                     "max_surplus_%": round(m["max_surplus_pct"], 1),
163                     "trend_per_month": round(m["slope_per_month"], 2),
164                     "r_squared": round(m["r_squared"], 3),
165                     "projected_end": round(m["projected_end"]),
166                     "overflow_days": m["overflow_days"],
167                     "overflow_pct": round(m["overflow_pct"], 1),
168                 })
169
170     df_cap = pd.DataFrame(all_rows)
171     cap_path = OUTPUT_DIR + "capacity_planning_summary.csv"
172     df_cap.to_csv(cap_path, index=False)
173     print(f"\n[OK] Saved capacity_planning_summary.csv")
174     print(df_cap.to_string(index=False))
175
176     import pandas as pd
177     import numpy as np
178     import os
179     import matplotlib.pyplot as plt
180     import seaborn as sns

```

```

181 # =====
182 # BLOCK K -- FINAL 2028 FORECAST (HISTORICAL AVG FOR ALL FLOWS)
183 # =====
184
185 # Define Paths
186 SUMMARY_PATH = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/buffer_scenarios_results/capacity_planning_summary.csv"
187
188 BUFFER_DAYS_PATH = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/buffer_scenarios_results/
189     buffer_days_summary_by_scenario.csv"
190
191 DELIVERIES_PATH = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/reseau_deliveries_summary - percentage.csv"
192
193 OUTPUT_LPG_PATH = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/buffer_scenarios_results/
194     capacity_augmentation_2028_with_true_LPG.csv"
195
196 def normalize_name(name):
197     if not isinstance(name, str): return ""
198     return name.upper().replace("-", "").replace(" ", "").strip()
199
200 # Load Deliveries
201 if os.path.exists(DELIVERIES_PATH):
202     df_shares = pd.read_csv(DELIVERIES_PATH)
203     df_shares.columns = [col.strip() for col in df_shares.columns]
204     df_shares['percentage'] = df_shares['percentage'].astype(str).rstrip('%').astype(float) / 100.0
205     df_shares['Normalized_Ville'] = df_shares['Ville'].apply(normalize_name)
206     shares_dict = dict(zip(df_shares['Normalized_Ville'], df_shares['percentage']))
207 else:
208     raise FileNotFoundError(f"Missing deliveries file: {DELIVERIES_PATH}")
209
210 # Define Constant Macro-Regions to guarantee volume conservation
211 WEST_WILAYAS = ["ORAN", "TLEMCEN", "MOSTAGANEM", "SAIDA", "RELIZANE", "MASCARA", "AIN TEMOUCHENT", "NAAMA",
212     "BECHAR", "LAGHOuat", "ADRAR"]
213 MIDDLE_WILAYAS = ["ALGER", "BLIDA", "BOUMERDES", "TIPAZA", "MEDEA", "TIZI OUZOU", "CHLEF", "AIN DEFLA", "
214     BOUIRA"]
215 EAST_WILAYAS = ["SETIF", "CONSTANTINE", "ANNABA", "BEJAIA", "JIJEL", "SKIKDA", "SOUK AHRAS", "TEBESSA", "
216     BORDJ BOU ARRERIDJ", "BATNA", "MSILA", "BISKRA", "KHENCHELA", "EL OUED"]
217 DJELFA_WILAYAS = ["DJELFA", "LAGHOuat", "BECHAR", "ADRAR", "NAAMA"]
218 ANNABA_WILAYAS = ["ANNABA", "SKIKDA", "SOUK AHRAS", "TEBESSA"]
219
220 SHARE_WEST = sum(shares_dict.get(normalize_name(w), 0.0) for w in WEST_WILAYAS)
221 SHARE_MIDDLE = sum(shares_dict.get(normalize_name(w), 0.0) for w in MIDDLE_WILAYAS)
222 SHARE_EAST = sum(shares_dict.get(normalize_name(w), 0.0) for w in EAST_WILAYAS)
223 SHARE_DJELFA = sum(shares_dict.get(normalize_name(w), 0.0) for w in DJELFA_WILAYAS)
224 SHARE_ANNABA = sum(shares_dict.get(normalize_name(w), 0.0) for w in ANNABA_WILAYAS)
225
226 # Scenario Allocation Map for Standard Vol Growth (Reseau Stream)
227 scenario_allocations = {
228     1: {"ORAN": ["ORAN"]},
229     2: {"ALGER": MIDDLE_WILAYAS, "ORAN": WEST_WILAYAS},
230     3: {"ALGER": MIDDLE_WILAYAS, "JIJEL": ["SETIF", "CONSTANTINE", "ANNABA", "BEJAIA", "JIJEL", "SKIKDA", "
231     SOUK AHRAS", "TEBESSA", "BORDJ BOU ARRERIDJ"], "ORAN": ["ORAN", "TLEMCEN", "MOSTAGANEM", "SAIDA", "
232     RELIZANE", "MASCARA", "AIN TEMOUCHENT"]},
233     4: {"ALGER": ["ALGER", "BLIDA", "BOUMERDES", "TIPAZA", "MEDEA", "TIZI OUZOU"], "BATNA": ["BATNA", "MSILA",
234     "BISKRA", "KHENCHELA", "EL OUED"], "JIJEL": ["SETIF", "CONSTANTINE", "ANNABA", "BEJAIA", "JIJEL", "
235     SKIKDA", "SOUK AHRAS", "TEBESSA", "BORDJ BOU ARRERIDJ"], "ORAN": WEST_WILAYAS},
236     5: {"ALGER": ["ALGER", "BLIDA", "BOUMERDES", "TIPAZA", "MEDEA", "TIZI OUZOU"], "BATNA": ["BATNA", "MSILA",
237     "BISKRA", "KHENCHELA", "EL OUED"], "DJELFA": DJELFA_WILAYAS, "JIJEL": ["SETIF", "CONSTANTINE", "
238     ANNABA", "BEJAIA", "JIJEL", "SKIKDA", "SOUK AHRAS", "TEBESSA", "BORDJ BOU ARRERIDJ"], "ORAN": ["ORAN",
239     "TLEMCEN", "MOSTAGANEM", "SAIDA", "RELIZANE", "MASCARA", "AIN TEMOUCHENT"]},
240     6: {"ALGER": ["ALGER", "BLIDA", "BOUMERDES", "TIPAZA", "MEDEA", "TIZI OUZOU"], "ANNABA": ANNABA_WILAYAS,
241     "BATNA": ["BATNA", "MSILA", "BISKRA", "KHENCHELA", "EL OUED"], "DJELFA": DJELFA_WILAYAS, "JIJEL": ["
242     SETIF", "CONSTANTINE", "BEJAIA", "JIJEL", "BORDJ BOU ARRERIDJ"], "ORAN": ["ORAN", "TLEMCEN", "
243     MOSTAGANEM", "SAIDA", "RELIZANE", "MASCARA", "AIN TEMOUCHENT"]}
244 }
245
246 # Baseline Files
247 df_buffer_days = pd.read_csv(BUFFER_DAYS_PATH)
248 df_buffer_days.columns = [col.strip() for col in df_buffer_days.columns]
249 df_buffer_days['location'] = df_buffer_days['location'].str.upper().str.strip()
250
251 df_summary = pd.read_csv(SUMMARY_PATH)
252 df_summary.columns = [col.strip() for col in df_summary.columns]
253 df_summary['location'] = df_summary['location'].str.upper().str.strip()
254
255

```

```

237 # Volume Streams Split (50% Reseau, 50% Non-Reseau)
238 GLOBAL_DAILY_JUMP = 45000 / 365.25
239 RESEAU_DAILY_JUMP = GLOBAL_DAILY_JUMP * 0.50
240 NON_RESEAU_DAILY_JUMP = GLOBAL_DAILY_JUMP * 0.50
241
242 # LPG Surcharge Layer (15% of total volume, but applies only to the Reseau share of that hub)
243 LPG_DAILY_JUMP = GLOBAL_DAILY_JUMP * 0.15
244 LPG_DWELL_DAYS = 7.0
245
246 lpg_rows = []
247
248 for idx, row in df_summary.iterrows():
249     scn = int(row['scenario'])
250     loc = str(row['location'])
251     historical_capacity = row['rental_capacity']
252
253     # Get historical scenario stay days
254     match = df_buffer_days[(df_buffer_days['scenario'] == scn) & (df_buffer_days['location'] == loc)]
255     avg_days = match['avg_days_in_buffer'].values[0] if not match.empty else 0.0
256
257     # Calculate Reseau Standard Growth (Using halved market share impact)
258     wilayas = scenario_allocations.get(scn, {}).get(loc, [])
259     buffer_share = sum(shares_dict.get(normalize_name(w), 0.0) for w in wilayas)
260
261     if loc == "ORAN":
262         slots_reseau_growth = RESEAU_DAILY_JUMP * (((1.0 - buffer_share) * avg_days) + (buffer_share *
263         avg_days))
264         # Non-Reseau flow drops here using Oran's exact historical avg_days instead of a hardcoded value
265         slots_non_reseau_growth = NON_RESEAU_DAILY_JUMP * avg_days
266     else:
267         slots_reseau_growth = RESEAU_DAILY_JUMP * (buffer_share * avg_days)
268         slots_non_reseau_growth = 0.0
269
270     slots_total_standard_growth = slots_reseau_growth + slots_non_reseau_growth
271
272     # Calculate LPG 15% Surcharge Layer (All shares divided by 2 to reflect Reseau restriction)
273     lpg_share = 0.0
274     if scn == 2:
275         if loc == "ALGER": lpg_share = (SHARE_MIDDLE + SHARE_EAST) * 0.50
276         elif loc == "ORAN": lpg_share = SHARE_WEST * 0.50
277     elif scn == 3:
278         if loc == "ALGER": lpg_share = (SHARE_MIDDLE + SHARE_EAST) * 0.50
279         elif loc == "ORAN": lpg_share = SHARE_WEST * 0.50
280     elif scn == 4:
281         if loc == "ALGER": lpg_share = SHARE_MIDDLE * 0.50
282         elif loc == "BATNA": lpg_share = SHARE_EAST * 0.50
283         elif loc == "ORAN": lpg_share = SHARE_WEST * 0.50
284     elif scn == 5:
285         if loc == "ALGER": lpg_share = (SHARE_MIDDLE + SHARE_DJELFA) * 0.50
286         elif loc == "BATNA": lpg_share = SHARE_EAST * 0.50
287         elif loc == "ORAN": lpg_share = SHARE_WEST * 0.50
288     elif scn == 6:
289         if loc == "ALGER": lpg_share = (SHARE_MIDDLE + SHARE_DJELFA) * 0.50
290         elif loc == "BATNA": lpg_share = SHARE_EAST * 0.50
291         elif loc == "ORAN": lpg_share = SHARE_WEST * 0.50
292
293     slots_lpg_surcharge = LPG_DAILY_JUMP * (lpg_share * LPG_DWELL_DAYS)
294
295     total_slots_to_add = slots_total_standard_growth + slots_lpg_surcharge
296     proj_cap_2028_total = historical_capacity + total_slots_to_add
297     total_growth_pct = (total_slots_to_add / historical_capacity * 100) if historical_capacity > 0 else 0
298
299     lpg_rows.append({
300         "scenario": scn, "location": loc,
301         "capacity_2026_baseline": round(historical_capacity),
302         "slots_standard_growth": round(slots_total_standard_growth),
303         "slots_lpg_surcharge": round(slots_lpg_surcharge),
304         "total_slots_to_add": round(total_slots_to_add),
305         "projected_capacity_2028": round(proj_cap_2028_total),
306         "total_growth_rate_%": round(total_growth_pct, 1)
307     })

```

```

308 df_lpg_summary = pd.DataFrame(lpg_rows)
309
310 print("\n" + "="*95 + "\nFINAL 2028 CAPACITY FORECAST (HISTORICAL STAY DAYS APPLIED ACROSS ALL FLOWS)\n" + "
    ="*95)
311 display_cols = ["scenario", "location", "capacity_2026_baseline", "slots_standard_growth", "
    slots_lpg_surcharge", "total_slots_to_add", "projected_capacity_2028", "total_growth_rate_%"]
312 print(df_lpg_summary[display_cols].to_string(index=False))
313
314 df_lpg_summary.to_csv(OUTPUT_LPG_PATH, index=False)
315
316 # =====
317 # STACKED BAR GRAPH GENERATION
318 # =====
319 plt.figure(figsize=(16, 9))
320 sns.set_theme(style="whitegrid")
321
322 df_lpg_summary['label'] = "S" + df_lpg_summary['scenario'].astype(str) + " - " + df_lpg_summary['location']
323 x = np.arange(len(df_lpg_summary))
324 width = 0.65
325
326 plt.bar(x, df_lpg_summary['capacity_2026_baseline'], width,
327         label='2026 Baseline Capacity', color='#4A90E2', edgecolor='black', alpha=0.9)
328
329 plt.bar(x, df_lpg_summary['slots_standard_growth'], width,
330         bottom=df_lpg_summary['capacity_2026_baseline'],
331         label='2028 Standard Growth (Dynamic Reseau + Non-Reseau Block)', color='#7ED321', edgecolor='black'
332         , alpha=0.9)
333
334 lpg_bottoms = df_lpg_summary['capacity_2026_baseline'] + df_lpg_summary['slots_standard_growth']
335 plt.bar(x, df_lpg_summary['slots_lpg_surcharge'], width,
336         bottom=lpg_bottoms,
337         label='LPG Pure Additive Surcharge Layer (Halved Reseau Shares)', color='#F5A623', edgecolor='black'
338         , alpha=0.9)
339
340 plt.title('True Additive Capacity Stack: Adjusted Macro-Regional Flow and Non-Reseau Processing Layer',
341         fontsize=16, fontweight='bold', pad=20)
342 plt.xlabel('Scenario & Hub Location', fontsize=12, fontweight='bold', labelpad=12)
343 plt.ylabel('Total Required Buffer Footprint (Slots)', fontsize=12, fontweight='bold', labelpad=12)
344 plt.xticks(x, df_lpg_summary['label'], rotation=45, ha='right', fontsize=11)
345 plt.legend(loc='upper right', fontsize=11, frameon=True, shadow=True)
346
347 for i in range(len(df_lpg_summary)):
348     total_val = df_lpg_summary['projected_capacity_2028'].iloc[i]
349     lpg_slots = df_lpg_summary['slots_lpg_surcharge'].iloc[i]
350
351     plt.text(i, total_val + (total_val * 0.01), f"{int(total_val)} Slots", ha='center', va='bottom',
352             fontsize=10, fontweight='bold')
353
354     if lpg_slots > 0:
355         plt.text(i, lpg_bottoms.iloc[i] + (lpg_slots / 2), f"+{int(lpg_slots)} LPG",
356                 ha='center', va='center', fontsize=9, color='black', fontweight='bold',
357                 bbox=dict(boxstyle='round,pad=0.2', fc='white', alpha=0.7, ec='none'))
358
359 plt.tight_layout()
360 graph_output_path = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/buffer_scenarios_results/
    true_additive_lpg_impact_2028.png"
361 plt.savefig(graph_output_path, dpi=300)
362 plt.show()

```

Annexe D

Code d'évaluation de l'empreinte carbone

Cette annexe reproduit le code Python utilisé pour l'évaluation de l'empreinte carbone des scénarios (section 3.5) : modèle d'émissions sensible à la charge (référentiel EU VECTO), calcul du transport primaire (line-haul Oran → buffers) par consolidation des porte-voitures, et du dépannage last-mile (10 % de livraison à domicile), pour chaque scénario.

Listing D.1 – Modèle d'émissions CO₂ à deux niveaux (line-haul et dépannage)

```
1 import os
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import seaborn as sns
6 from google.colab import drive
7
8 # -----
9 # 1. FIXED ENGINE COEFFICIENTS & VEHICLE MASS PARAMETERS (EU VECTO)
10 # -----
11 TRUCK_EMPTY_WEIGHT = 14.0      # W_truck = 14.0 Metric Tonnes
12 WEIGHT_F500 = 0.5             # 500 kg = 0.5 Tonnes
13 WEIGHT_DOBLO = 1.5            # 1500 kg = 1.5 Tonnes
14
15 SLOT_F500 = 1.0 / 8.0          # Takes 12.5% of truck capacity
16 SLOT_DEFAULT = 1.0 / 7.0      # Takes 14.28% of truck capacity
17
18 EU_EMISSION_FACTOR = 55.0      # EF = gCO2 per Tonne-Kilometer (gCO2 / t*km)
19
20 # -----
21 # 2. DATA INGESTION & MATRIX INDEX ALIGNMENT
22 # -----
23 print("[sync] Connecting to Google Cloud storage engine...")
24 drive.mount('/content/drive', force_remount=True)
25
26 DRIVE_DIR = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/"
27
28 print("\n[load] Loading multi-tier supply chain data sheets...")
29
30 # Force explicit index handling to avoid pandas alignment bugs
31 df_matrix = pd.read_csv(os.path.join(DRIVE_DIR, "distance_matrix_capitals.csv"))
32 df_deliveries = pd.read_csv(os.path.join(DRIVE_DIR, "Suivie stock production locale 15 03 26.xlsx - Flux.csv"), low_memory=False)
33
34 scenarios_path = os.path.join(DRIVE_DIR, "buffer_scenarios_results", "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv")
35 if not os.path.exists(scenarios_path):
36     scenarios_path = os.path.join(DRIVE_DIR, "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv")
37 df_allocations = pd.read_csv(scenarios_path)
38
39 # Clean hidden characters, convert everything to uppercase strings immediately
```

```

40 df_matrix.columns = [str(c).upper().strip() for c in df_matrix.columns]
41 first_col = df_matrix.columns[0]
42 df_matrix[first_col] = df_matrix[first_col].astype(str).str.upper().str.strip()
43 df_matrix.set_index(first_col, inplace=True)
44
45 # Ensure square matrix alignment
46 df_matrix.columns = df_matrix.index
47
48 # -----
49 # 3. DIRECT CONFIGURATION & RESEAU FILTERING
50 # -----
51 FLUX_AGENT_COL = "agent_de_facturation"
52 ALLOC_AGENT_COL = "agent"
53 MODEL_COL = "Modele"
54
55 flux_city_col = "Localisation" if "Localisation" in df_deliveries.columns else [c for c in df_deliveries.
56     columns if "ville" in c.lower() or "local" in c.lower()][0]
57 TRUCK_ID_COL = "ndeg de camion ORAN" if "ndeg de camion ORAN" in df_deliveries.columns else [c for c in
58     df_deliveries.columns if "camion" in c.lower() or "truck" in c.lower()][0]
59 desig_col = [c for c in df_deliveries.columns if "design" in c.lower() or "design" in c.lower()][0]
60
61 df_deliveries["designation_clean"] = df_deliveries[desig_col].astype(str).str.upper().str.strip()
62 df_reseau_raw = df_deliveries[df_deliveries["designation_clean"] == "RESEAU"].copy()
63 print(f"[target] Filtered records isolated (RESEAU ONLY): {len(df_reseau_raw)}")
64
65 agent_lookup_dict = {str(row[ALLOC_AGENT_COL]).upper().strip(): row for _, row in df_allocations.iterrows()
66     if pd.notna(row[ALLOC_AGENT_COL])}
67
68 alloc_cols = list(df_allocations.columns)
69 scen_fields_map = {
70     2: alloc_cols[3],
71     3: alloc_cols[4],
72     4: alloc_cols[5],
73     5: alloc_cols[6]
74 }
75
76 matched_records = []
77 for idx, row in df_reseau_raw.iterrows():
78     val_flux = str(row[FLUX_AGENT_COL]).upper().strip()
79     match_found = None
80
81     if val_flux in agent_lookup_dict:
82         match_found = agent_lookup_dict[val_flux]
83     else:
84         for k_ref in agent_lookup_dict:
85             if k_ref in val_flux or val_flux in k_ref:
86                 match_found = agent_lookup_dict[k_ref]
87                 break
88
89     combined = row.to_dict()
90     combined["raw_source_city_drop"] = str(row[flux_city_col]).upper().strip()
91
92     if match_found is not None:
93         for k_col, v_val in match_found.items():
94             if k_col not in combined:
95                 combined[k_col] = v_val
96     else:
97         for s_idx, col_target in scen_fields_map.items():
98             combined[col_target] = str(row[flux_city_col]).upper().strip()
99
100     matched_records.append(combined)
101
102 df_reseau = pd.DataFrame(matched_records)
103 df_reseau["modele_clean"] = df_reseau[MODEL_COL].astype(str).str.upper().str.strip()
104
105 df_reseau["weight_t"] = np.where(df_reseau["modele_clean"].str.contains("F 500", na=False), WEIGHT_F500,
106     WEIGHT_DOBLO)
107 df_reseau["slot_size"] = np.where(df_reseau["modele_clean"].str.contains("F 500", na=False), SLOT_F500,
108     SLOT_DEFAULT)
109 df_reseau[TRUCK_ID_COL] = df_reseau[TRUCK_ID_COL].astype(str).str.strip()
110
111 origin_node = "ORAN" if "ORAN" in df_matrix.index else list(df_matrix.index)[0]

```

```

107 print(f"    -> Dynamic Network Origin established at: '{origin_node}'")
108
109 # BULLETPROOF DISTANCE ENGINE
110 def get_distance(origin, dest):
111     o_clean = str(origin).upper().strip()
112     d_clean = str(dest).upper().strip()
113
114     # Direct Key Check
115     if d_clean in df_matrix.index:
116         return float(df_matrix.loc[o_clean, d_clean])
117
118     # Loose Substring Check
119     for matrix_city in df_matrix.index:
120         if d_clean in matrix_city or matrix_city in d_clean:
121             return float(df_matrix.loc[o_clean, matrix_city])
122
123     # Absolute Fallback
124     try:
125         return float(df_matrix.loc[o_clean].median())
126     except:
127         return 350.0
128
129 # -----
130 # 4. EXECUTING ACCURATE PAYLOAD EMISSIONS EVALUATOR
131 # -----
132 scenarios_summary = []
133
134 for s in range(1, 6):
135     total_co2_g = 0.0
136     total_trips = 0
137
138     # --- SCENARIO 1: HISTORICAL REAL-WORLD BASELINE ---
139     if s == 1:
140         mission_groups = df_reseau.groupby(TRUCK_ID_COL)
141
142         for mission_id, df_trip in mission_groups:
143             if df_trip.empty or str(mission_id) in ["", "nan", "NAN"]: continue
144
145             distances = []
146             for _, car in df_trip.iterrows():
147                 distances.append(get_distance(origin_node, car["raw_source_city_drop"]))
148
149             # Distance will be 0 if the destination is ORAN
150             max_trip_distance = max(distances) if len(distances) > 0 else 0.0
151
152             payload_weight = df_trip["weight_t"].sum()
153             combined_weight_factor = (2.0 * TRUCK_EMPTY_WEIGHT) + payload_weight
154             total_co2_g += (EU_EMISSION_FACTOR * combined_weight_factor * max_trip_distance)
155             total_trips += 1 # Unconditional ID count (even if distance is 0)
156
157             label_name = "ORIGINAL BASELINE"
158
159     # --- SCENARIOS 2 - 5: CONSOLIDATED REGIONAL BUFFER QUEUES ---
160     else:
161         target_col_name = scen_fields_map[s]
162         df_reseau["assigned_buffer"] = df_reseau[target_col_name].astype(str).str.upper().str.strip()
163
164         hub_groups = df_reseau.groupby("assigned_buffer")
165         for hub_node, df_hub in hub_groups:
166             # Completely skip missing hubs AND the ORAN hub to avoid phantom trips
167             if hub_node in ["", "NAN", "NONE"] or "ORAN" in hub_node:
168                 continue
169
170             one_way_distance = get_distance(origin_node, hub_node)
171
172             current_truck_slots = 0.0
173             current_payload_weight = 0.0
174
175             for _, vehicle in df_hub.iterrows():
176                 current_truck_slots += vehicle["slot_size"]
177                 current_payload_weight += vehicle["weight_t"]
178

```

```

179         if current_truck_slots >= 1.0:
180             combined_weight_factor = (2.0 * TRUCK_EMPTY_WEIGHT) + current_payload_weight
181             total_co2_g += (EU_EMISSION_FACTOR * combined_weight_factor * one_way_distance)
182             total_trips += 1
183
184             current_truck_slots = 0.0
185             current_payload_weight = 0.0
186
187         if current_truck_slots > 0:
188             combined_weight_factor = (2.0 * TRUCK_EMPTY_WEIGHT) + current_payload_weight
189             total_co2_g += (EU_EMISSION_FACTOR * combined_weight_factor * one_way_distance)
190             total_trips += 1
191
192         label_name = f"SCENARIO {s} BUFFER ({s+1} REGIONS)"
193
194         total_tonnes = total_co2_g / 1000000.0
195
196         scenarios_summary.append({
197             "Scenario Structure": label_name,
198             "Dispatched Fleet Trips": total_trips,
199             "Total Network CO2 (Tonnes)": round(total_tonnes, 2)
200         })
201
202         # -----
203         # 5. DIAGNOSTICS DISPLAY & VISUAL CHART REPORTING
204         # -----
205         df_report = pd.DataFrame(scenarios_summary)
206         baseline_val = df_report.iloc[0]["Total Network CO2 (Tonnes)"]
207         df_report["Carbon Delta (vs Baseline)"] = df_report["Total Network CO2 (Tonnes)"].apply(lambda x: f"{round(x
208             - baseline_val, 2)} t")
209
210         print("\n" + "="*95)
211         print("[graph] STELLANTIS ALGERIA PFE: FINAL VALIDATED LOGISTICS MATRIX")
212         print("="*95)
213         print(df_report.to_string(index=False))
214         print("="*95)
215
216         # --- Visualization Plot ---
217         sns.set_theme(style="whitegrid")
218         fig, ax = plt.subplots(figsize=(11, 6))
219         fig.patch.set_facecolor('#f8f9fc')
220         ax.set_facecolor('#ffffff')
221
222         bars = ax.bar(df_report['Scenario Structure'], df_report['Total Network CO2 (Tonnes)'], width=0.48, color=
223             '#1e3a8a', alpha=0.95)
224
225         for bar in bars:
226             yval = bar.get_height()
227             ax.text(bar.get_x() + bar.get_width()/2.0, yval + (max(df_report['Total Network CO2 (Tonnes)']) * 0.02
228                 if max(df_report['Total Network CO2 (Tonnes)']) > 0 else 1.0), f"{round(yval, 1)} t", ha='center', va='
229                 bottom', weight='bold', color='#0f172a')
230
231         ax.set_title("STELLANTIS DECARBONIZATION STUDY: COMPREHENSIVE SCENARIO ASSESSMENT\nPayload-Sensitive EU
232             Emission Framework (Euro 5/6 Fleet Averages)", fontsize=12, pad=15, weight='bold')
233         ax.set_ylabel("Carbon Footprint (Metric Tonnes CO2e)", fontsize=10, weight='bold')
234         plt.xticks(rotation=8, ha='right')
235         plt.tight_layout()
236         plt.show()
237
238         # -----
239         # 4. EXECUTING ACCURATE PAYLOAD EMISSIONS EVALUATOR (WITH LAST-MILE DEPANNAGE)
240         # -----
241         DEPANNAGE_EMPTY_WEIGHT = 4.5 # Standard flatbed tow truck (4.5 Tonnes)
242
243         scenarios_summary = []
244
245         for s in range(1, 6):
246             total_heavy_truck_co2_g = 0.0
247             total_depannage_co2_g = 0.0
248             total_trips = 0
249
250         # --- SCENARIO 1: HISTORICAL REAL-WORLD BASELINE ---

```

```

246 if s == 1:
247     mission_groups = df_reseau.groupby(TRUCK_ID_COL)
248
249     for mission_id, df_trip in mission_groups:
250         if df_trip.empty or str(mission_id) in ["", "nan", "NAN"]: continue
251
252         distances = []
253         for _, car in df_trip.iterrows():
254             distances.append(get_distance(origin_node, car["raw_source_city_drop"]))
255
256         max_trip_distance = max(distances) if len(distances) > 0 else 0.0
257
258         payload_weight = df_trip["weight_t"].sum()
259         combined_weight_factor = (2.0 * TRUCK_EMPTY_WEIGHT) + payload_weight
260         total_heavy_truck_co2_g += (EU_EMISSION_FACTOR * combined_weight_factor * max_trip_distance)
261         total_trips += 1
262
263         label_name = "ORIGINAL BASELINE"
264
265 # --- SCENARIOS 2 - 5: CONSOLIDATED REGIONAL BUFFER QUEUES ---
266 else:
267     target_col_name = scen_fields_map[s]
268     df_reseau["assigned_buffer"] = df_reseau[target_col_name].astype(str).str.upper().str.strip()
269
270     hub_groups = df_reseau.groupby("assigned_buffer")
271     for hub_node, df_hub in hub_groups:
272         # Completely skip missing hubs AND the ORAN hub to avoid phantom trips & emissions
273         if hub_node in ["", "NAN", "NONE"] or "ORAN" in hub_node:
274             continue
275
276         # A. Heavy Transport to the Hub
277         one_way_distance = get_distance(origin_node, hub_node)
278
279         current_truck_slots = 0.0
280         current_payload_weight = 0.0
281
282         for _, vehicle in df_hub.iterrows():
283             # --- Heavy Truck Queueing ---
284             current_truck_slots += vehicle["slot_size"]
285             current_payload_weight += vehicle["weight_t"]
286
287             if current_truck_slots >= 1.0:
288                 combined_weight_factor = (2.0 * TRUCK_EMPTY_WEIGHT) + current_payload_weight
289                 total_heavy_truck_co2_g += (EU_EMISSION_FACTOR * combined_weight_factor *
one_way_distance)
290                 total_trips += 1
291
292                 current_truck_slots = 0.0
293                 current_payload_weight = 0.0
294
295             # --- Last-Mile Depannage (Buffer to Client) ---
296             client_dest = vehicle["raw_source_city_drop"]
297             buffer_to_client_dist = get_distance(hub_node, client_dest)
298
299             # Tow truck carrying exactly 1 vehicle
300             depannage_weight_factor = (2.0 * DEPANNAGE_EMPTY_WEIGHT) + vehicle["weight_t"]
301
302             # Calculate 100% of the buffer-to-client CO2
303             car_depannage_co2 = (EU_EMISSION_FACTOR * depannage_weight_factor * buffer_to_client_dist)
304
305             # We only execute 10% of these as home deliveries
306             total_depannage_co2_g += (car_depannage_co2 * 0.10)
307
308             if current_truck_slots > 0:
309                 combined_weight_factor = (2.0 * TRUCK_EMPTY_WEIGHT) + current_payload_weight
310                 total_heavy_truck_co2_g += (EU_EMISSION_FACTOR * combined_weight_factor * one_way_distance)
311                 total_trips += 1
312
313             label_name = f"SCENARIO {s} BUFFER ({s+1} REGIONS)"
314
315 # Convert everything to Tonnes
316 heavy_truck_tonnes = total_heavy_truck_co2_g / 1000000.0

```

```

317     depannage_tonnes = total_depannage_co2_g / 1000000.0
318     total_network_tonnes = heavy_truck_tonnes + depannage_tonnes
319
320     scenarios_summary.append({
321         "Scenario Structure": label_name,
322         "Heavy Fleet Trips": total_trips,
323         "Primary Hub CO2 (t)": round(heavy_truck_tonnes, 2),
324         "Last-Mile Depannage CO2 (t)": round(depannage_tonnes, 2),
325         "Total Network CO2 (Tonnes)": round(total_network_tonnes, 2)
326     })
327
328     # -----
329     # 5. DIAGNOSTICS DISPLAY & VISUAL CHART REPORTING
330     # -----
331     df_report = pd.DataFrame(scenarios_summary)
332     baseline_val = df_report.iloc[0]["Total Network CO2 (Tonnes)"]
333     df_report["Carbon Delta (vs Baseline)"] = df_report["Total Network CO2 (Tonnes)"].apply(lambda x: f"{round(x
        - baseline_val, 2)} t")
334
335     print("\n" + "="*115)
336     print("[graph] STELLANTIS ALGERIA PFE: FINAL VALIDATED LOGISTICS MATRIX (WITH LAST-MILE DEPANNAGE)")
337     print("="*115)
338     print(df_report.to_string(index=False))
339     print("="*115)
340
341     # --- Stacked Bar Chart Visualization ---
342     sns.set_theme(style="whitegrid")
343     fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 7))
344     fig.patch.set_facecolor('#f8f9fc')
345     ax.set_facecolor('#ffffff')
346
347     # Bottom Bar: Primary Heavy Trucks
348     bars_heavy = ax.bar(df_report['Scenario Structure'], df_report['Primary Hub CO2 (t)'],
349                        width=0.48, color='#1e3a8a', label='Primary Hub Transport (Heavy Fleet)', alpha=0.95)
350
351     # Top Bar: Last-Mile Depannage
352     bars_lastmile = ax.bar(df_report['Scenario Structure'], df_report['Last-Mile Depannage CO2 (t)'],
353                          width=0.48, bottom=df_report['Primary Hub CO2 (t)'],
354                          color='#f59e0b', label='Last-Mile Depannage (10% Home Delivery)', alpha=0.95)
355
356     # Add Total Value Labels on top of the stacked bars
357     for i, (b1, b2) in enumerate(zip(bars_heavy, bars_lastmile)):
358         total_val = b1.get_height() + b2.get_height()
359         # Formatting total text
360         ax.text(b1.get_x() + b1.get_width()/2.0, total_val + (max(df_report['Total Network CO2 (Tonnes)']) *
361            0.02 if max(df_report['Total Network CO2 (Tonnes)']) > 0 else 1.0),
362                f"{round(total_val, 1)} t", ha='center', va='bottom', weight='bold', color='#0f172a', fontsize
363                =11)
364
365     ax.set_title("STELLANTIS DECARBONIZATION STUDY: COMPREHENSIVE SCENARIO ASSESSMENT\nIncorporating Primary Hub
366     Consolidation & Last-Mile Depannage Penalties", fontsize=13, pad=15, weight='bold')
367     ax.set_ylabel("Carbon Footprint (Metric Tonnes CO2e)", fontsize=11, weight='bold')
368     plt.xticks(rotation=8, ha='right', fontsize=10)
369     ax.legend(loc='upper left', frameon=True, fontsize=10)
370     plt.tight_layout()
371     plt.show()

```

Annexe E

Code d'analyse des coûts logistiques

Cette annexe reproduit le code Python utilisé pour l'analyse économique des coûts logistiques (section 3.6) : grille tarifaire de transport par destination, coûts d'entreposage (loyers des sites et immobilisation variable à 190 DA/véhicule/jour), et calcul du budget OPEX total pour chaque scénario.

Listing E.1 – Matrice financière OPEX (transport et entreposage) par scénario

```
1 import os
2 import re
3 import numpy as np
4 import pandas as pd
5 from google.colab import drive
6
7 # =====
8 # 1. SETUP & MOUNT
9 # =====
10 print("[sync] Connecting to Google Cloud storage engine...")
11 drive.mount('/content/drive', force_remount=True)
12 DRIVE_DIR = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/"
13
14 # =====
15 # 2. DATA INGESTION & SYNCHRONIZED MAPPING
16 # =====
17 print("[load] Loading operational master files...")
18 df_deliveries = pd.read_csv(os.path.join(DRIVE_DIR, "Suivie stock production locale 15 03 26.xlsx - Flux.csv"), low_memory=False)
19 df_allocations = pd.read_csv(os.path.join(DRIVE_DIR, "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv"))
20
21 FLUX_AGENT_COL = "agent_de_facturation"
22 ALLOC_AGENT_COL = "agent"
23
24 # Isolate Scenario 1 Baseline Mapping Column
25 scen1_col = "current_wilaya" if "current_wilaya" in df_allocations.columns else [c for c in df_allocations.columns if "current" in c.lower()][0]
26 scen1_map = {str(row[ALLOC_AGENT_COL]).upper().strip(): row[scen1_col] for _, row in df_allocations.iterrows() if pd.notna(row[ALLOC_AGENT_COL])}
27
28 # Filter to RESEAU only
29 desig_col = [c for c in df_deliveries.columns if "design" in c.lower() or "design" in c.lower()][0]
30 df_deliveries["designation_clean"] = df_deliveries[desig_col].astype(str).str.upper().str.strip()
31 df_reseau_raw = df_deliveries[df_deliveries["designation_clean"] == "RESEAU"].copy()
32
33 flux_city_col = "Localisation" if "Localisation" in df_deliveries.columns else [c for c in df_deliveries.columns if "ville" in c.lower() or "local" in c.lower()][0]
34 TRUCK_ID_COL = "ndeg de camion ORAN" if "ndeg de camion ORAN" in df_deliveries.columns else [c for c in df_deliveries.columns if "camion" in c.lower() or "truck" in c.lower()][0]
```

```

36 agent_lookup_dict = {str(row[ALLOC_AGENT_COL]).upper().strip(): row for _, row in df_allocations.iterrows()
37                       if pd.notna(row[ALLOC_AGENT_COL])}
38
39 alloc_cols = list(df_allocations.columns)
40 scen_fields_map = {
41     2: alloc_cols[3], 3: alloc_cols[4], 4: alloc_cols[5], 5: alloc_cols[6]
42 }
43
44 # Apply Fuzzy Matching to perfectly align with CO2 script volumes
45 matched_records = []
46 for idx, row in df_reseau_raw.iterrows():
47     val_flux = str(row[FLUX_AGENT_COL]).upper().strip()
48     match_found = None
49
50     if val_flux in agent_lookup_dict:
51         match_found = agent_lookup_dict[val_flux]
52     else:
53         for k_ref in agent_lookup_dict:
54             if k_ref in val_flux or val_flux in k_ref:
55                 match_found = agent_lookup_dict[k_ref]
56                 break
57
58     combined = row.to_dict()
59
60     if match_found is not None:
61         for k_col, v_val in match_found.items():
62             if k_col not in combined: combined[k_col] = v_val
63     else:
64         for s_idx, col_target in scen_fields_map.items():
65             combined[col_target] = str(row[flux_city_col]).upper().strip()
66
67     matched_records.append(combined)
68
69 df_reseau = pd.DataFrame(matched_records)
70
71 # Model check & slot generation perfectly synced
72 MODEL_COL = "Modele" if "Modele" in df_reseau.columns else [c for c in df_reseau.columns if "model" in c.
73                   lower() or "modele" in c.lower()][0]
74 df_reseau["modele_clean"] = df_reseau[MODEL_COL].astype(str).str.upper().str.strip()
75 df_reseau["slot_size"] = np.where(df_reseau["modele_clean"].str.contains("F 500", na=False), 1.0 / 8.0, 1.0
76 / 7.0)
77 df_reseau[TRUCK_ID_COL] = df_reseau[TRUCK_ID_COL].astype(str).str.strip()
78
79 # Warehousing Date Parsers
80 df_reseau['date_entry_oran_parsed'] = pd.to_datetime(df_reseau['Date entree ZL ORAN'], errors='coerce')
81 df_reseau['date_invoice_parsed'] = pd.to_datetime(df_reseau['Date de facturation'], errors='coerce')
82 df_reseau['storage_days'] = np.maximum(0, (df_reseau['date_invoice_parsed'] - df_reseau['
83     date_entry_oran_parsed']).dt.days)
84 df_reseau['storage_days'] = df_reseau['storage_days'].fillna(0)
85
86 valid_dates = df_reseau['date_entry_oran_parsed'].dropna()
87 simulated_months = max(1, round((valid_dates.max() - valid_dates.min()).days / 30.41)) if not valid_dates.
88     empty else 22
89
90 # =====
91 # 3. FINANCIAL CONSTANTS
92 # =====
93
94 STANDARD_DAILY_RATE = 190.0
95 ALGER_MONTHLY_RENT = 11_300_000.0
96 MOSTAGANEM_MONTHLY_RENT = 8_950_000.0
97 JIJEL_MONTHLY_RENT = 8_950_000.0
98
99 TRANSPORT_PRICE_GRID = {
100     "RELIZANE": 2500.0, "AIN TEMOUCHENT": 2125.0, "MOSTAGANEM": 2125.0,
101     "MASCARA": 2625.0, "SIDI BEL ABBES": 2125.0, "TLEMCEEN": 3000.0,
102     "SAIDA": 2875.0, "CHLEF": 3637.5, "TIARET": 4375.0,
103     "AIN DEFLA": 4925.0, "MEDEA": 6375.0, "NAAMA": 6875.0,
104     "BLIDA": 6275.0, "TIPAZA": 6362.5, "ALGER": 7050.0,
105     "BOUMERDES": 7812.5, "BOUIRA": 8637.5, "TIZI OUZOU": 8500.0,
106     "LAGHOUAT": 8675.0, "M'SILA": 9800.0, "DJELFA": 9775.0,
107     "BORDJ BOU ARRERIDJ": 10162.5, "BEJAIA": 10625.0, "BECHAR": 11250.0,
108     "SETIF": 11425.0, "GHARDAIA": 12375.0, "JIJEL": 12250.0,

```

```

103 "BISKRA": 12625.0, "MILA": 13037.5, "CONSTANTINE": 13037.5,
104 "BATNA": 13250.0, "OUM EL BOUAGHI": 14212.5, "SKIKDA": 14500.0,
105 "KHENCHELA": 13912.5, "GUELMA": 15050.0, "OUARGLA": 15262.5,
106 "ANNABA": 15125.0, "EL OUED": 15950.0, "EL TAREF": 16275.0,
107 "SOUK AHRAS": 15512.5, "TEBESSA": 16450.0, "ADRAR": 21750.0,
108 }
109
110 def normalize_wilaya(name):
111     if pd.isna(name): return "ORAN"
112     n = str(name).upper().strip()
113     n = n.replace("'", "").replace('"', '')
114     n = re.sub(r"\s+", " ", n)
115     aliases = {"ALGIERS": "ALGER", "M SILA": "M'SILA", "MSILA": "M'SILA"}
116     return aliases.get(n, n)
117
118 # =====
119 # 4. EXECUTE SCENARIO LOGIC
120 # =====
121 cost_summary = []
122
123 for s in range(1, 6):
124     total_transport_cost = 0.0
125     total_warehousing_cost = 0.0
126     total_trips = 0
127
128     # --- SCENARIO 1: HISTORICAL BASELINE ---
129     if s == 1:
130         label_name = "SCENARIO 1: ORIGINAL BASELINE"
131         total_warehousing_cost += (ALGER_MONTHLY_RENT + MOSTAGANEM_MONTHLY_RENT) * simulated_months
132
133         mission_groups = df_reseau.groupby(TRUCK_ID_COL)
134         for mission_id, df_trip in mission_groups:
135             if df_trip.empty or str(mission_id) in ["", "nan", "NAN"]: continue
136
137             prices = [0.0]
138             for _, car in df_trip.iterrows():
139                 # Re-hooked to the baseline dictionary
140                 agent = str(car.get(FLUX_AGENT_COL, "")).upper().strip()
141                 dest_city = normalize_wilaya(car.get(scen1_col, scen1_map.get(agent, "ORAN")))
142
143                 if dest_city in TRANSPORT_PRICE_GRID and "ORAN" not in dest_city:
144                     prices.append(TRANSPORT_PRICE_GRID[dest_city])
145
146             total_transport_cost += max(prices)
147             total_trips += 1
148
149         total_warehousing_cost += (df_reseau['storage_days'].sum() * STANDARD_DAILY_RATE)
150
151     # --- SCENARIOS 2 - 5: BUFFER ROUTING ---
152     else:
153         label_name = f"SCENARIO {s}: BUFFER ROUTING ({s+1} REGIONS)"
154         total_warehousing_cost += (ALGER_MONTHLY_RENT + JIJEL_MONTHLY_RENT) * simulated_months
155
156         target_col_name = scen_fields_map[s]
157         df_reseau["assigned_buffer"] = df_reseau[target_col_name].astype(str).str.upper().str.strip()
158
159         hub_groups = df_reseau.groupby("assigned_buffer")
160         for hub_node, df_hub in hub_groups:
161             clean_hub = normalize_wilaya(hub_node)
162
163             # Skip empty nodes & completely bypass the Oran factory queue
164             if hub_node in ["", "NAN", "NONE"] or "ORAN" in clean_hub:
165                 continue
166
167             hub_price = TRANSPORT_PRICE_GRID.get(clean_hub, 0.0)
168             current_truck_slots = 0.0
169
170             for _, vehicle in df_hub.iterrows():
171                 # Warehousing Penalty (Variable Rate outside primary hubs)
172                 if clean_hub not in ["ALGER", "JIJEL"]:
173                     total_warehousing_cost += vehicle['storage_days'] * STANDARD_DAILY_RATE
174

```

```

175     # Heavy Transport Loading
176     current_truck_slots += vehicle["slot_size"]
177
178     if current_truck_slots >= 1.0:
179         total_transport_cost += hub_price
180         total_trips += 1
181         current_truck_slots = 0.0
182
183     # Flush any partially filled trucks at the end of the simulation
184     if current_truck_slots > 0:
185         total_transport_cost += hub_price
186         total_trips += 1
187
188     cost_summary.append({
189         "Scenario Structure": label_name,
190         "Total Network Trips": int(total_trips),
191         "Transport Cost (DA)": round(total_transport_cost, 2),
192         "Warehousing Cost (DA)": round(total_warehousing_cost, 2),
193         "Total Budget (Million DA)": round((total_transport_cost + total_warehousing_cost) / 1_000_000.0, 2)
194     })
195
196     # =====
197     # 5. OUTPUT
198     # =====
199     df_cost_report = pd.DataFrame(cost_summary)
200     print("\n" + "="*115)
201     print("$] STELLANTIS ALGERIA PFE: LOGISTICS OPEX FINANCIAL MATRIX")
202     print("="*115)
203     print(df_cost_report.to_string(index=False))
204     print("="*115)

```

Annexe F

Code d'analyse de la flotte de transport en mission

Cette annexe reproduit le code Python (cellule 1) utilisé pour reconstituer la trajectoire journalière de la flotte de porte-voitures en mission (section 3.7) : calcul des jours d'occupation par rotation (durée aller-retour, pause réglementaire, poste de 9 heures), consolidation dynamique des chargements par buffer (7 véhicules, ou 8 avec un modèle Fiat 500) et cumul journalier des camions actifs pour chaque scénario.

Listing F.1 – Reconstruction de la flotte journalière en mission par consolidation dynamique

```
1 import os
2 import re
3 import numpy as np
4 import pandas as pd
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import seaborn as sns
7 from datetime import timedelta
8 from google.colab import drive
9
10 # =====
11 # 1. SETUP, MOUNT & FILE INGESTION
12 # =====
13 print("[sync] Connecting to Google Cloud storage engine...")
14 drive.mount('/content/drive', force_remount=True)
15 DRIVE_DIR = "/content/drive/MyDrive/PFE-STELLANTIS/"
16
17 print("[load] Loading operational master files and duration matrix...")
18 df_deliveries = pd.read_csv(os.path.join(DRIVE_DIR, "Suivie stock production locale 15 03 26.xlsx - Flux.csv"),
19                             low_memory=False)
20 df_allocations = pd.read_csv(os.path.join(DRIVE_DIR, "agent_buffer_assignment_by_scenario.csv"))
21 df_matrix_raw = pd.read_csv(os.path.join(DRIVE_DIR, "duration_matrix_ville_osrm_min - duration_matrix_ville_osrm_min.csv"))
22
23 # =====
24 # 2. DURATION MATRIX SYMMETRIC NORMALIZATION
25 # =====
26 def normalize_wilaya(name):
27     if pd.isna(name): return "ORAN"
28     n = str(name).upper().strip()
29     n = n.replace("'", "").replace("-", "")
30     n = re.sub(r"\s+", " ", n)
31     aliases = {"ALGIERS": "ALGER", "M SILA": "M'SILA", "MSILA": "M'SILA"}
32     return aliases.get(n, n)
33
34 first_matrix_col = df_matrix_raw.columns[0]
35 df_matrix_raw[first_matrix_col] = df_matrix_raw[first_matrix_col].astype(str).apply(normalize_wilaya)
36 df_matrix = df_matrix_raw.set_index(first_matrix_col)
```

```

36 df_matrix.columns = [normalize_wilaya(c) for c in df_matrix.columns]
37
38 def get_round_trip_busy_days(origin, destination):
39     orig = normalize_wilaya(origin)
40     dest = normalize_wilaya(destination)
41
42     try:
43         if orig in df_matrix.index and dest in df_matrix.columns:
44             one_way_mins = float(df_matrix.loc[orig, dest])
45         elif dest in df_matrix.columns and "ORAN" in df_matrix.index:
46             one_way_mins = float(df_matrix.loc["ORAN", dest])
47         else:
48             one_way_mins = 180.0
49     except:
50         one_way_mins = 180.0
51
52     H_drive = (2.0 * one_way_mins) / 60.0
53
54     if H_drive > 4.5:
55         H_drive += 0.75
56
57     busy_days = int(np.ceil(H_drive / 9.0))
58     return max(1, busy_days)
59
60 # =====
61 # 3. DATA ALIGNMENT & PRE-PROCESSING
62 # =====
63 FLUX_AGENT_COL = "agent_de_facturation"
64 ALLOC_AGENT_COL = "agent"
65 TRUCK_ID_COL = "ndeg de camion ORAN" if "ndeg de camion ORAN" in df_deliveries.columns else [c for c in
66     df_deliveries.columns if "camion" in c.lower() or "truck" in c.lower()][0]
67
68 scen1_col = "current_wilaya" if "current_wilaya" in df_allocations.columns else [c for c in df_allocations.
69     columns if "current" in c.lower()][0]
70 scen1_map = {str(row[ALLOC_AGENT_COL]).upper().strip(): row[scen1_col] for _, row in df_allocations.iterrows()
71     if pd.notna(row[ALLOC_AGENT_COL])}
72
73 desig_col = [c for c in df_deliveries.columns if "design" in c.lower() or "design" in c.lower()][0]
74 df_deliveries["designation_clean"] = df_deliveries[desig_col].astype(str).str.upper().str.strip()
75 df_reseau_raw = df_deliveries[df_deliveries["designation_clean"] == "RESEAU"].copy()
76
77 agent_lookup_dict = {str(row[ALLOC_AGENT_COL]).upper().strip(): row for _, row in df_allocations.iterrows()
78     if pd.notna(row[ALLOC_AGENT_COL])}
79 alloc_cols = list(df_allocations.columns)
80 scen_fields_map = {2: alloc_cols[3], 3: alloc_cols[4], 4: alloc_cols[5], 5: alloc_cols[6]}
81
82 matched_records = []
83 for idx, row in df_reseau_raw.iterrows():
84     val_flux = str(row[FLUX_AGENT_COL]).upper().strip()
85     match_found = agent_lookup_dict.get(val_flux, None)
86     if match_found is None:
87         for k_ref, data_row in agent_lookup_dict.items():
88             if k_ref in val_flux or val_flux in k_ref:
89                 match_found = data_row
90                 break
91     combined = row.to_dict()
92     if match_found is not None:
93         for k_col, v_val in match_found.items():
94             if k_col not in combined: combined[k_col] = v_val
95     matched_records.append(combined)
96
97 df_reseau = pd.DataFrame(matched_records)
98 MODEL_COL = "Modele" if "Modele" in df_reseau.columns else [c for c in df_reseau.columns if "model" in c.
99     lower() or "modele" in c.lower()][0]
100 df_reseau["modele_clean"] = df_reseau[MODEL_COL].astype(str).str.upper().str.strip()
101 df_reseau[TRUCK_ID_COL] = df_reseau[TRUCK_ID_COL].astype(str).str.strip()
102 df_reseau['date_entry_oran_parsed'] = pd.to_datetime(df_reseau['Date entree ZL ORAN'], errors='coerce')
103
104 # =====
105 # 4. TIME SERIES FLEET UTILIZATION ENGINE (DYNAMIC BATCHING)
106 # =====
107 fleet_usage_tracker = {s: {} for s in range(1, 6)}

```

```

103
104 for s in range(1, 6):
105     # --- SCENARIO 1: HISTORICAL BASELINE ---
106     if s == 1:
107         mission_groups = df_reseau.groupby(TRUCK_ID_COL)
108         for mission_id, df_trip in mission_groups:
109             if df_trip.empty or str(mission_id) in ["", "nan", "NAN"]: continue
110
111             valid_dates = df_trip['date_entry_oran_parsed'].dropna()
112             if valid_dates.empty: continue
113             start_date = valid_dates.min()
114
115             max_busy_days = 1
116             for _, car in df_trip.iterrows():
117                 agent = str(car.get(FLUX_AGENT_COL, "")).upper().strip()
118                 dest_city = normalize_wilaya(car.get(scen1_col, scen1_map.get(agent, "ORAN")))
119                 days = get_round_trip_busy_days("ORAN", dest_city)
120                 if days > max_busy_days:
121                     max_busy_days = days
122
123             for day_offset in range(max_busy_days):
124                 busy_day = (start_date + timedelta(days=day_offset)).date()
125                 fleet_usage_tracker[s][busy_day] = fleet_usage_tracker[s].get(busy_day, 0) + 1
126
127     # --- SCENARIOS 2 - 5: VIRTUAL DYNAMIC CONSOLIDATION ---
128     else:
129         target_col_name = scen_fields_map[s]
130         df_reseau["assigned_buffer"] = df_reseau[target_col_name].astype(str).str.upper().str.strip()
131
132         hub_groups = df_reseau.groupby("assigned_buffer")
133         for hub_node, df_hub in hub_groups:
134             clean_hub = normalize_wilaya(hub_node)
135             if hub_node in ["", "NAN", "NONE"] or "ORAN" in clean_hub:
136                 continue
137
138             busy_days_required = get_round_trip_busy_days("ORAN", clean_hub)
139
140             # Sort chronologically by arrival at ZL ORAN to simulate real queue formation
141             df_hub_sorted = df_hub.sort_values(by='date_entry_oran_parsed').copy()
142
143             current_truck_batch = []
144
145             for _, vehicle in df_hub_sorted.iterrows():
146                 current_truck_batch.append(vehicle)
147
148                 # Check for presence of an F 500 model in the active queue
149                 has_f500 = any("F 500" in str(v["modele_clean"]) for v in current_truck_batch)
150                 target_capacity = 8 if has_f500 else 7
151
152                 # Trigger dispatch the exact moment capacity threshold is crossed
153                 if len(current_truck_batch) >= target_capacity:
154                     batch_dates = [v['date_entry_oran_parsed'] for v in current_truck_batch if pd.notna(v['
date_entry_oran_parsed'])]
155                     if batch_dates:
156                         dispatch_date = max(batch_dates) + timedelta(days=2)
157                         for day_offset in range(busy_days_required):
158                             busy_day = (dispatch_date + timedelta(days=day_offset)).date()
159                             fleet_usage_tracker[s][busy_day] = fleet_usage_tracker[s].get(busy_day, 0) + 1
160
161                         # Reset queue for the next physical truck
162                         current_truck_batch = []
163
164             # Flush any trailing/remaining cars at the end of the timeline as a final run
165             if current_truck_batch:
166                 batch_dates = [v['date_entry_oran_parsed'] for v in current_truck_batch if pd.notna(v['
date_entry_oran_parsed'])]
167                 if batch_dates:
168                     dispatch_date = max(batch_dates) + timedelta(days=2)
169                     for day_offset in range(busy_days_required):
170                         busy_day = (dispatch_date + timedelta(days=day_offset)).date()
171                         fleet_usage_tracker[s][busy_day] = fleet_usage_tracker[s].get(busy_day, 0) + 1
172

```

```

173 # =====
174 # 5. DATA MATRIX COMPILATION & FILE EXPORTS
175 # =====
176 all_recorded_dates = set()
177 for s in range(1, 6):
178     all_recorded_dates.update(fleet_usage_tracker[s].keys())
179
180 sorted_calendar_timeline = sorted(list(all_recorded_dates))
181 usage_matrix_data = []
182
183 for d in sorted_calendar_timeline:
184     usage_matrix_data.append({
185         "Date": d,
186         "Scenario 1 (Baseline)": fleet_usage_tracker[1].get(d, 0),
187         "Scenario 2 (3 Regions)": fleet_usage_tracker[2].get(d, 0),
188         "Scenario 3 (4 Regions)": fleet_usage_tracker[3].get(d, 0),
189         "Scenario 4 (5 Regions)": fleet_usage_tracker[4].get(d, 0),
190         "Scenario 5 (6 Regions)": fleet_usage_tracker[5].get(d, 0),
191     })
192
193 df_fleet_usage_profile = pd.DataFrame(usage_matrix_data)
194 df_fleet_usage_profile['Date'] = pd.to_datetime(df_fleet_usage_profile['Date'])
195 df_fleet_usage_profile = df_fleet_usage_profile.sort_values(by='Date').reset_index(drop=True)
196
197 # Save Matrix to Google Drive
198 OUTPUT_CSV_PATH = os.path.join(DRIVE_DIR, "daily_busy_trucks_by_scenario.csv")
199 df_fleet_usage_profile.to_csv(OUTPUT_CSV_PATH, index=False)
200 print(f"\n[save] SUCCESS: Dynamic-capacity matrix saved to Google Drive at:\n    -> {OUTPUT_CSV_PATH}")
201
202 # =====
203 # 6. HIGH-RESOLUTION LINE GRAPH VISUALIZATION
204 # =====
205 print("\n[graph] Rendering fleet usage trajectory line chart...")
206 plt.figure(figsize=(15, 7.5))
207 sns.set_theme(style="whitegrid")
208
209 scenario_colors = {
210     "Scenario 1 (Baseline)": "#1e3a8a",
211     "Scenario 2 (3 Regions)": "#10b981",
212     "Scenario 3 (4 Regions)": "#f59e0b",
213     "Scenario 4 (5 Regions)": "#ef4444",
214     "Scenario 5 (6 Regions)": "#8b5cf6"
215 }
216
217 for scenario_col, color_hex in scenario_colors.items():
218     plt.plot(
219         df_fleet_usage_profile['Date'],
220         df_fleet_usage_profile[scenario_col],
221         label=scenario_col,
222         color=color_hex,
223         linewidth=2.2,
224         alpha=0.85
225     )
226
227 plt.title(
228     "STELLANTIS LOGISTICS NETWORK EVOLUTION: DAILY FLEET IN MISSION TRAJECTORY\n"
229     "Optimized Batching Logic: Discrete Truck Building (7 Standard Vehicles or 8 with F 500 Model Content)",
230     fontsize=13, pad=18, weight='bold', color='#0f172a'
231 )
232 plt.xlabel("Timeline Dimension (Chronological Sequence)", fontsize=11, weight='bold', color='#334155',
233            labelpad=10)
234 plt.ylabel("Active Fleet Volume (Busy Trucks in Transit)", fontsize=11, weight='bold', color='#334155',
235            labelpad=10)
236
237 plt.legend(loc='upper right', frameon=True, facecolor='ffffff', edgecolor='#e2e8f0', fontsize=10.5)
238 plt.xticks(rotation=15, ha='right', color='#475569')
239 plt.yticks(color='#475569')
240 plt.xlim(df_fleet_usage_profile['Date'].min(), df_fleet_usage_profile['Date'].max())
241 plt.tight_layout()
242
243 # Save Graph to Google Drive
244 OUTPUT_PNG_PATH = os.path.join(DRIVE_DIR, "daily_busy_trucks_trajectory.png")

```

```
243 plt.savefig(OUTPUT_PNG_PATH, dpi=300, facecolor='#ffffff')
244 print(f"[img] SUCCESS: High-res line graph saved to Google Drive at:\n    -> {OUTPUT_PNG_PATH}\n")
245
246 plt.show()
```

Bibliographie

- [1] B. Fleischmann, H. Meyr, and M. Wagner. Advanced planning. In H. Stadtler and C. Kilger, editors, *Supply Chain Management and Advanced Planning*, pages 81–106. Springer, 2008.
- [2] S. Chopra and P. Meindl. *Supply Chain Management : Strategy, Planning, and Operation*. Pearson, 7 edition, 2019.
- [3] R. H. Ballou. *Business Logistics / Supply Chain Management*. Pearson Prentice Hall, 5 edition, 2004.
- [4] A. Golmohammadi, H. Afshari, A. Hasanzadeh, and M. Rahimi. A heuristic approach for designing a distribution network in a supply chain. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 1(2) :221–234, 2010.
- [5] S. L. Hakimi. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3) :450–459, 1964.
- [6] C. S. ReVelle and R. W. Swain. Central facilities location. *Geographical Analysis*, 2(1) :30–42, 1970.
- [7] A. H. Land and A. G. Doig. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, 28(3) :497–520, 1960.
- [8] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1 :269–271, 1959.
- [9] Robert Geisberger, Peter Sanders, Dominik Schultes, and Daniel Delling. Contraction hierarchies : Faster and simpler hierarchical routing in road networks. In *Proceedings of the 7th International Conference on Experimental Algorithms (WEA 2008)*, volume 5038 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 319–333. Springer, 2008.
- [10] Paul H. Zipkin. *Foundations of Inventory Management*. McGraw-Hill, 2000.
- [11] E. A. Silver, D. F. Pyke, and D. J. Thomas. *Inventory and Production Management in Supply Chains*. CRC Press, 4 edition, 2017.
- [12] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. Corporate value chain (scope 3) accounting and reporting standard. Technical report, GHG Protocol, 2011.
- [13] Martin Christopher. *Logistics & Supply Chain Management*. Pearson Education, Harlow, 5 edition, 2016.
- [14] Accio. 2025 global car sales trend – top models, 2026. Marché des ventes de véhicules neufs : 2,75 billions USD en 2025.
- [15] Autokunbo / S&P Global Mobility. Global automotive production volume 2015–2025, 2025. Ventes mondiales 2025 : 89,6 millions d’unités (S&P Global Mobility).
- [16] ACEA. Automotive sector : Direct and indirect employment in the EU. Technical report, European Automobile Manufacturers’ Association, 2024.

-
- [17] ACEA. Economic and market report : Global and EU auto industry – full year 2024. Technical report, European Automobile Manufacturers' Association, 2025.
- [18] Volkswagen Group. Annual report 2024 – research and development, 2025. R&D : 21,0 milliards EUR en 2024, ratio 7,9 % du CA.
- [19] CarExpert / Derek Fung. Global auto sales 2025 : BYD, Geely continue climb up the top 10, 2026. D'après les déclarations financières officielles des constructeurs. Toyota : 11,21M; VW : 8,68M; BYD : 4,60M; Stellantis : 5,48M.
- [20] Continive AI. Top 8 global tier 1 suppliers revolutionizing the automotive industry, 2025.
- [21] Saycan. Understanding CBU/SKD/CKD export models in automotive, 2025.
- [22] Stellantis. Fiat tafroui plant – industrial development and localization strategy, 2024. Transition SKD → CKD en 2025 ; objectif intégration locale >30 %.
- [23] Good Car Bad Car. Worldwide car sales by region & key markets – all years, 2024. Asie-Pacifique : 49 % ; Amérique du Nord : 25 % ; Chine : 22,89M unités en 2024.
- [24] Gasgoo. Top 10 countries by global auto sales in 2025, 2026. Chine : 30,103 millions d'unités vendues en 2025.
- [25] Šaroch et al. Automotive study 2025 – SAVS automotive RWW, 2025. Europe : 15M VP vendus en 2023, part : 23 % du marché mondial.
- [26] Focus2Move. World car markets 2026 – top 50 countries, 2026. USA : 19,5 % du marché mondial ; Inde : 7 % (+4,6 %).
- [27] Mordor Intelligence. SUV market size, share & growth trends 2025–2030, 2025. Marché SUV : 890 Md USD en 2025 ; CAGR 6,66 % jusqu'en 2030.
- [28] MarketsandMarkets. SUV market report 2025–2032, 2025. Asie-Pacifique : >50 % du marché SUV mondial en 2025.
- [29] EV Volumes. Global EV outlook – december 2025 update, 2025. 17,8M EV vendus en 2024 (+25 %) ; part marché : 19,9 % ; prévision 2025 : 23,7M EV et 25,5 % de part de marché.
- [30] Ingenev / S&P Global. 2025 automotive sales data highlights – mixed global trends, 2026. Ventes EV mondiales 2025 : 20,7M (+20 % YoY) ; Europe BEV : 16,9 % de part de marché (YTD nov. 2025).
- [31] EVwire. Global EV sales report H1 2025, 2025. Part BEV mondiale H1 2025 : 15,4 % ; Chine BEV H1 2025 : 30,8 % ; 19 pays dépassent les 20 %.
- [32] TSA Algérie. Des voitures à un milliard : enquête sur le nouveau marché automobile algérien, 2025.
- [33] Focus2Move. Algerian vehicles sales – facts & data 2025, 2026. 2023 : 113 122 unités (+345,3 %) ; 2024 : 179 332 (+58,5 %) ; 2025 : –52,6 % ; Fiat : 71,5 % de part de marché en 2025.
- [34] Ministère du Commerce extérieur – Algérie (Kamel Rezig). Bilan des importations automobiles 2022–2024, 2025. 179 250 véhicules importés entre 2022 et 2024 pour 2,11 Md USD ; importations 2024 : >1 Md USD (vs 564,9 M USD en 2023).
- [35] Maghreb Émergent. Marché automobile en algérie : 2025 s'achève sur la persistance d'une crise structurelle, 2025. Zéro quota importation concessionnaires en 2025 ; flambée des prix ; production locale insuffisante.
- [36] Stellantis El Djazaïr / SEAGADE. Dispositif obligatoire des ports secs en algérie – mise en vigueur juin 2025, 2025. SEAGADE : prestataire dédouanement, transit et conformité réglementaire ; ports secs obligatoires depuis juin 2025.

-
- [37] Infotrafic Algérie. Usine hyundai en algérie : 50 000 véhicules par an dès 2026, 2025. Capacité : 50 000 vhc/an ; gamme : Grand i10, Accent, Creta, 2 utilitaires.
- [38] La Voie d'Algérie. Hyundai lancera sa production automobile en algérie dès la fin 2025, 2025. Investissement : 400 M USD ; site : Sidi Khettab (Relizane) ; ex-usine Sovac ; première voiture made in Algeria : 2026.
- [39] Stellantis N.V. Stellantis formed following completion of merger between PSA group and FCA, 2021. Fusion finalisée le 16 janvier 2021.
- [40] Stellantis N.V. Stellantis reports Q1 2025 net revenues and shipments, 2025. Portefeuille de 16 marques : Abarth, Alfa Romeo, Chrysler, Citroën, Dodge, DS Automobiles, Fiat, Jeep, Lancia, Maserati, Opel, Peugeot, Ram, Vauxhall, Free2move et Leasys.
- [41] PSA Groupe. Histoire du groupe PSA – chronologie des acquisitions, 2020. Création 1966 ; Citroën 1974 ; Chrysler Europe 1978 ; DS 2016 ; Opel/Vauxhall 2017.
- [42] Fiat Chrysler Automobiles. History of FCA – from fiat to FCA, 2020. Fondation Fiat 1899 ; participation Chrysler 2009 ; création FCA 2014 ; scission Ferrari 2015.
- [43] Stellantis N.V. Antonio filosa announces new stellantis leadership team on first day as CEO, 2025. Antonio Filosa nommé CEO le 23 juin 2025 ; réorganisation axée sur la décision produit régionale.
- [44] Stellantis N.V. Stellantis reports full year 2025 financial results, 2026. CA : 153,5 Md EUR (−2 %) ; perte nette : 22,3 Md EUR ; H2 2025 : 2,8M unités expédiées (+11 %) ; CA H2 +10 %.
- [45] Stellantis N.V. Annual report for the year ended december 31, 2025, 2026. 258 668 employés au 31 décembre 2025.
- [46] Algerie Invest. Selon stellantis : 15 000 commandes de FIAT en deux semaines, 2023. 6 modèles ; prix 2,6–4,6 M DZD ; objectif 50 000 véhicules en 2023.
- [47] Stellantis N.V. Stellantis lance la production dans son usine de Taфраoui en algérie, 2023. Investissement : 200 M EUR ; capacité cible : 90 000 vhc/an ; taux intégration locale : >35 % ; 9 modèles, 2 marques, 900 collaborateurs, 65 % du territoire couvert.
- [48] El Watan. Fiat en tête des ventes mondiales du groupe stellantis : 78 % de part de marché en algérie (2023), 2023.
- [49] Stellantis N.V. Lancement de la marque FIAT en algérie, 2023. Objectif MEA : 1 million de vhc d'ici 2030 ; autonomie de production régionale de 70 %.
- [50] Afrik.com. L'algérie et stellantis s'unissent pour transformer l'industrie automobile du maghreb, 2025.
- [51] Stellantis N.V. – Samir Cherfan. Stellantis renforce son engagement pour un écosystème automobile durable et compétitif en algérie, 2025. Déclaration de Samir Cherfan, Directeur des Opérations MEA ; stratégie « produire dans la région pour la région ».
- [52] Stellantis N.V. Stellantis a organisé sa 2^e convention internationale de fournisseurs à oran pour renforcer son ancrage industriel local, 2025. Sous-traitants locaux : MARTUR (sièges), PUREM (échappement), SIGIT-ACS (plastique), IDE-NET (électronique), DZ Link (logistique) ; objectif intégration locale : 45 % d'ici 2026.
- [53] TSA Algérie. Fiat en algérie : Stellantis lève le voile sur une production en forte accélération, 2026. 80 000 véhicules cumulés à mars 2026 ; 40 000 vhc/an en moyenne ; 5 000 emplois directs et indirects ; 50 000 vhc atteints en sept. 2025.
- [54] Ouest Tribune. Stellantis muscle son implantation en algérie : une montée en puissance vers 2028, 2026. Extension usine Taфраoui : capacité cible 135 000 vhc/an en 2028 ;

- ateliers soudure et peinture opérationnels depuis sept. 2025 ; Fiat Grande Panda : lancement imminent en CKD.
- [55] Autobip.com. Stellantis algérie : plus de 80 000 véhicules produits à l'usine Fiat d'Oran, 2026. Objectif 60 000 vhc en 2025 ; 90 000 vhc/an en 2026 ; rythme actuel dépasse les prévisions.
- [56] S. Chopra and P. Meindl. *Supply Chain Management : Strategy, Planning, and Operation*. Pearson Prentice Hall, 3 edition, 2007.
- [57] J. Forrest and R. Lougee-Heimer. CBC user guide. In *Emerging Theory, Methods, and Applications*, pages 257–277. INFORMS, 2005.
- [58] P. B. Mirchandani and R. L. Francis. *Discrete Location Theory*. John Wiley & Sons, 1990.
- [59] A. Weber. *Über den Standort der Industrien (Theory of the Location of Industries)*. University of Chicago Press, 1909. Traduction anglaise : 1929.
- [60] C. S. ReVelle and H. A. Eiselt. Location analysis : A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165(1) :1–19, 2005.
- [61] M. S. Daskin. *Network and Discrete Location : Models, Algorithms, and Applications*. John Wiley & Sons, 2 edition, 2013.
- [62] M. S. Daskin. *Network and Discrete Location : Models, Algorithms, and Applications*. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [63] R. Church and C. ReVelle. The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 32(1) :101–118, 1974.
- [64] S. Mitchell, M. O'Sullivan, and I. Dunning. PuLP : A linear programming toolkit for Python. *The University of Auckland, Auckland, New Zealand*, 2011.
- [65] M. L. Brandeau and S. S. Chiu. An overview of representative problems in location research. *Management Science*, 35(6) :645–674, 1989.
- [66] A. T. Murray. Advances in location modeling : GIS linkages and contributions. *Journal of Geographical Systems*, 12(3) :335–354, 2010.
- [67] M. T. Melo, S. Nickel, and F. Saldanha-da Gama. Facility location and supply chain management – a review. *European Journal of Operational Research*, 196(2) :401–412, 2009.
- [68] D. Luxen and C. Vetter. Real-time routing with OpenStreetMap data. In *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 513–516, 2011.
- [69] E. G. Coffman, M. R. Garey, and D. S. Johnson. Approximation algorithms for bin packing : A survey. In D. S. Hochbaum, editor, *Approximation Algorithms for NP-Hard Problems*, pages 46–93. PWS Publishing, Boston, 1996.
- [70] E. G. Coffman, M. R. Garey, and D. S. Johnson. Approximation algorithms for bin packing : a survey. In D. S. Hochbaum, editor, *Approximation Algorithms for NP-Hard Problems*, pages 46–93. PWS Publishing, 1997.
- [71] G. B. Dantzig and J. H. Ramser. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1) :80–91, 1959.
- [72] Paolo Toth and Daniele Vigo. *The Vehicle Routing Problem*. SIAM, Philadelphia, 2002.
- [73] R. Gevaers, E. Van de Voorde, and T. Vanelslender. Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective in an urban context. *European Transport Research Review*, 3(4) :229–238, 2011.

-
- [74] M. Savelsbergh and T. Van Woensel. City logistics : Challenges and opportunities. *Transportation Science*, 50(2) :579–590, 2016.
- [75] K. K. Boyer, A. M. Prud’homme, and W. Chung. The last mile challenge : Evaluating the effects of customer density and delivery window patterns. *Journal of Business Logistics*, 30(1) :185–201, 2009.
- [76] D. McFadden. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In P. Zarembka, editor, *Frontiers in Econometrics*, pages 105–142. Academic Press, 1974.
- [77] Teodor Gabriel Crainic, Nicoletta Ricciardi, and Giovanni Storchi. Models for evaluating and planning city logistics systems. *Transportation Science*, 43(4) :432–454, 2009.
- [78] K. Train and D. McFadden. The goods/leisure tradeoff and disaggregate work trip mode choice models. *Transportation Research*, 12(5) :349–353, 1978.
- [79] Steven Nahmias. *Production and Operations Analysis*. McGraw-Hill, 6 edition, 2009.
- [80] A. McKinnon, M. Browne, A. Whiteing, and M. Piecyk. *Green Logistics : Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. Kogan Page, 3 edition, 2015.
- [81] European Commission. Commission regulation (eu) 2017/2400 – VECTO : Vehicle energy consumption calculation tool. Technical report, Official Journal of the European Union, 2017.
- [82] ADEME. Bilan carbone – base carbone : facteurs d’émission pour le transport de marchandises. Technical report, Agence de la transition écologique (ADEME), 2022.
- [83] Alan Rushton, Phil Croucher, and Peter Baker. *The Handbook of Logistics and Distribution Management*. Kogan Page, London, 5 edition, 2014.
- [84] W. McKinney. Data structures for statistical computing in Python. In *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pages 56–61, 2010.
- [85] C. R. Harris et al. Array programming with NumPy. *Nature*, 585 :357–362, 2020.
- [86] P. Virtanen et al. SciPy 1.0 : Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17 :261–272, 2020.
- [87] J. D. Hunter. Matplotlib : A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3) :90–95, 2007.
- [88] K. E. Train. *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press, 2 edition, 2009.
- [89] F. J. Aguilar. *Scanning the Business Environment*. Macmillan, 1967.
- [90] M. E. Porter. How competitive forces shape strategy. *Harvard Business Review*, 57(2) :137–145, 1979.
- [91] H. Weihrich. The TOWS matrix – a tool for situational analysis. *Long Range Planning*, 15(2) :54–66, 1982.