

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



Département du Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie des Procédés et Environnement

**Évaluation du bilan carbone du transport aval de TOTAL Energies
Lubrifiants et décarbonation par la digitalisation et l'optimisation
des processus de planification des commandes et de programmation
des tournées de livraison.**

BELHARRANE Meryem & BEN ZEBA Sawsene Lina

Présenté et soutenu publiquement le (29/06/2026)

Composition du jury :

Présidente :	Mme DJELLOULI Naïma	Docteure ENP
Examinatrice :	Mme TCHEKIKEN Chakinez	Docteure ENP
Encadrant :	M. MESTROUH Islam	Manager HSSE, TotalEnergies Lubrifiants
Encadrant :	M. KERCHICH Yacine	Professeur ENP

ENP 2026

Département / ENP, 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200 Alger Algérie.

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



Département du Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie des Procédés et Environnement

**Évaluation du bilan carbone du transport aval de TOTAL Energies
Lubrifiants et décarbonation par la digitalisation et l'optimisation
des processus de planification des commandes et de programmation
des tournées de livraison.**

BELHARRANE Meryem & BEN ZEBA Sawsene Lina

Présenté et soutenu publiquement le (29/06/2026)

Composition du jury :

Présidente :	Mme DJELLOULI Naïma	Docteure ENP
Examinatrice :	Mme TCHEKIKEN Chakinez	Docteure ENP
Encadrant :	M. MESTROUH Islam	Manager HSSE, TotalEnergies Lubrifiants
Encadrant :	M. KERCHICH Yacine	Professeur ENP

ENP 2026

Département / ENP, 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200 Alger Algérie.

ملخص

هذا المشروع، المنجز لدى TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA)، يهدف إلى قياس البصمة الكربونية للنقل الخارجي وتخفيضها من خلال تحسين التخطيط اللوجستي.

أنشئت ميزانية كربون للنطاق 3 - الفئة 9 وفق منهجية ADEME وبروتوكول GHG Protocol، طُبِّقَتْ على توصيلات سنة 2025 لمستودعي البلدية ووهران (497.49 طن مكافئ CO₂)، عبر خط معالجة آلي بـ Google Apps Script جرت متابعته على لوحة Power BI. كما صُمِّمَتْ منصة ويب تُحَقِّق تحسين مسارات المركبات (خوارزمية Cluster-First/Route-Second مع تحسين 2-opt).

أظهر التحقق على شهر ديسمبر 2025 ما يلي: انخفاض الانبعاثات بنسبة 3%، تراجع عدد الرحلات بنسبة 39.5%، ومعدل إشغال بلغ 95.57% مقابل 69.73% في التخطيط اليدوي.

الكلمات المفتاحية: البصمة الكربونية، Power BI، Google Apps Script، GHG Protocol، ADEME، تحسين مسارات المركبات.

Abstract

This project, conducted at TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA), aims to measure and reduce the carbon footprint of outbound transport through optimised logistics planning. A Scope 3 Category 9 carbon inventory was established using ADEME's methodology and the GHG Protocol on 2025 deliveries from the Blida and Oran depots (497.49 tCO₂e) via a Google Apps Script pipeline tracked on a Power BI dashboard. A web-based platform performing vehicle routing optimisation was also designed (Cluster-First/Route-Second algorithm with 2-opt optimisation).

Validation on December 2025 showed : -3% emissions, -39.5% trips, and a 95.57% fill rate versus 69.73% manually.

Keywords : Carbon footprint, ADEME, GHG Protocol, Google Apps Script, Power BI, Vehicle Routing Optimisation.

Résumé

Ce projet, réalisé chez TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA), vise à mesurer et réduire l'empreinte carbone du transport aval via une optimisation de la planification logistique. Un bilan carbone Scope 3 Catégorie 9 a été établi selon la méthode ADEME et le GHG Protocol sur les livraisons 2025 des dépôts de Blida et Oran (497,49 tCO₂e), via un pipeline Google Apps Script suivi sur un tableau de bord Power BI. Une plateforme web assurant l'optimisation des tournées de véhicules a également été conçue (algorithme Cluster-First/Route-Second avec optimisation 2-opt). La validation sur décembre 2025 a montré : -3% d'émissions, -39,5% de tournées, et un taux de remplissage de 95,57% contre 69,73% en manuel.

Mots-clés : Bilan carbone, ADEME, GHG Protocol, Google Apps Script, Power BI, Optimisation des tournées de véhicules.

Remerciements

Avant toute chose, nous rendons grâce à Allah, le Tout-Puissant et le Miséricordieux, de nous avoir accordé la santé, la patience et la détermination nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant académique, Monsieur KERCHICH Yacine, pour la qualité de son accompagnement tout au long de ce projet. Ses orientations rigoureuses, sa disponibilité et la pertinence de ses conseils ont été une source d'inspiration constante.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre co-encadrant, Monsieur MESTROUH Islam, Manager HSSE chez TotalEnergies Lubrifiants Algérie, à qui nous devons une reconnaissance particulière. Dès le premier jour, il nous a accordé une confiance totale et une liberté de travail rare, nous permettant d'explorer notre sujet avec autonomie et ambition. Son encadrement bienveillant, ses remarques constructives et son engagement à nos côtés ont été déterminants dans l'aboutissement de ce projet. Qu'il trouve ici l'expression de notre plus sincère et profonde gratitude.

Nous associons à ces remerciements l'ensemble de l'équipe de TotalEnergies Lubrifiants Algérie, pour son accueil chaleureux, sa générosité et l'esprit de collaboration qui a animé chaque journée de notre stage. Évoluer au sein d'un environnement professionnel aussi stimulant et bienveillant a été une expérience précieuse que nous n'oublierons pas.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Madame DJELLOULI Naïma et Madame TCHEKIKEN Chakinez, pour l'honneur qu'elles nous font en acceptant de siéger dans notre jury et d'évaluer ce travail. Leur expertise et le temps qu'elles lui ont consacré sont pour nous une marque d'attention que nous apprécions profondément.

Enfin, nos pensées les plus profondes vont à nos familles respectives, qui ont été tout au long de ce parcours notre soutien le plus solide et notre source de force la plus sincère. Leur confiance indéfectible, leurs encouragements et leur amour ont rendu possible l'accomplissement de ce travail. Que ces pages leur soient dédiées.

Dédicaces

À ma mère, tu es mon héroïne, mon modèle et la personne à qui je dois absolument tout. Depuis toujours, tu as consacré ton temps, ton énergie et tout ton amour à me permettre de construire mon avenir. Tu as cru en moi lorsque je doutais, tu m'as relevée lorsque je tombais et tu ne m'as jamais laissée avancer seule. Si j'en suis arrivée là aujourd'hui, c'est avant tout grâce à toi. Mon plus grand bonheur sera toujours de te voir sourire et d'être la fille dont tu pourras être fière. Je t'aime infiniment.

À mon père, merci de m'avoir transmis bien plus que la force. Tu m'as appris à rester debout face aux difficultés et à avancer avec courage, patience et dignité. Je te dédie cette réussite avec tout mon amour et ma profonde gratitude.

À ma petite sœur Amina, mon rayon de soleil, merci d'illuminer ma vie par ta joie, ton innocence et ton amour. Sache que tu occupes une place immense dans mon cœur et que te voir grandir est l'un des plus beaux cadeaux que la vie m'ait offerts.

À Ferial, la cousine auprès de qui j'ai trouvé une véritable sœur. Nous avons grandi ensemble, partagé nos joies comme nos peines, et tu as toujours tout partagé avec moi avec une générosité et une sincérité qui me touchent profondément. Ta complicité est un trésor et une présence sur laquelle j'ai toujours pu compter.

À Besma, ma grande sœur de cœur (ma star <33), merci d'avoir toujours été ce soutien inconditionnel. Je vous aime toutes les deux du fond du cœur.

À ma tante Zahia, merci de m'avoir accueillie avec tant de chaleur et de m'avoir toujours considérée comme ta propre fille. Cet amour restera à jamais l'un des plus précieux cadeaux de ma vie.

À Naïma, merci d'avoir toujours cru en moi. Ta générosité, ta bienveillance et ton amour ont toujours été plus que suffisants. **À Zohra**, malgré les kilomètres qui nous séparent, tu resteras toujours cette femme d'une immense douceur que je considère comme une deuxième maman.

To Lyna, you are the sister life chose for me. Thank you for being there through every step of my journey, through both the brightest moments and the hardest ones. I hope this adventure is only the beginning of everything we have yet to experience together. Love you to the moon and back. Un merci également à la famille Belhadj, et tout particulièrement à Hakim. Merci de m'avoir toujours considérée comme votre deuxième fille.

To Dassine, Maria, Damia, Alaa, Sara, Maroua, Abir and Cerine, you are the kind of friends who make every moment brighter. Thank you for the laughter, the memories, and the unconditional love. You made my preparatory years unforgettable, and meeting you was the most beautiful thing that came out of this journey. **A very special thanks to Firas**, your support, kindness, and loyalty since high school are gifts I will always cherish. Thank you for always being there.

À ma famille CAPiste, vous êtes la famille avec qui j'ai créé les plus beaux souvenirs de mon parcours. Vous avez rendu les périodes de stress plus légères et les défis plus faciles à surmonter. Un immense merci à toute l'équipe Business Challenge ainsi qu'aux ITs pour cette aventure qui m'a permis de grandir, de gagner en confiance et de découvrir une autre version de moi-même. Merci également à **Hana, Abdelhadi et Rym** pour tous ces moments inoubliables.

À ma meilleure binôme Sawsen (Jacqueline), merci pour ta gentillesse, ta patience et ta bonne humeur, qui ont rendu cette aventure tellement plus agréable. Nous avons survécu au PFE ensemble, et c'est sans doute la plus belle preuve d'amitié qui soit. Je garderai précieusement tous ces souvenirs. Love you.

—Meryem ♥—

Dédicaces

À *Papa et Maman*, qui ont toujours tout donné pour ma réussite. Les sacrifices, les encouragements, l'amour sans condition, je vous remercie pour tout. Tout ce que je suis, je vous le dois, je vous aime.

À *Mayssa, Fayçal et Moncef*, qui m'ont toujours soutenue malgré les chamailleries, et qui ont toujours gâté leur petite sœur au possible, merci d'animer mes journées comme vous le faites. À *Ahlam* aussi, une présence toute récente qui apporte son lot de sourires.

À *Lyliane et Yanis*, mes petits rayons de soleil, la vie n'est devenue que plus belle depuis votre arrivée.

À *Yousra et Kahina*, ma deuxième famille, mes khtikhtis ; celles avec qui j'ai traversé chaque étape importante de ma vie, et qui sont restées à chaque fois. Certains liens résistent à tout, et le vôtre en est la plus belle preuve. (Mention spéciale à *Mazigh*, pour son aide précieuse !)

À *Arthur*, un ange parti trop tôt, ton absence ne s'atténuera jamais.

À *mes amies*,

À *Rym, Rachel et Bouth*, qui m'ont appris la valeur des choses et guidée tout au long de mon cursus. Vous me manquez énormément.

À *Leila, Houda, Lina, Hadjer, Zineb, Celia, Lavenda, Assia, Marwa, Lyna, Cerine, Louiza, Selma, Hana, Malak*, je sais, la liste est longue, mais quand on a de la chance, autant en avoir beaucoup. À vos côtés, je ne m'ennuie jamais. Merci pour les rires.

Au *CAP*, pour toutes les expériences vécues, toutes les leçons apprises, toutes les personnes qui m'ont forgée, qui m'ont appris à m'affirmer et à croire en moi, merci.

Aux *CAPistes, les casquettes bleues*, les anciens, les nouveaux ; chacun a laissé son empreinte. D'inter-Spécialités à Charity Festival, en passant par Charity Trip, chaque moment partagé, chaque souvenir, chaque personne resteront gravés à jamais. Peace and Love (Moscarda <3).

À *mes CAPistes préférés : Abdelhadi, Hana, Rym*, je vous suis reconnaissante pour l'amitié que vous me portez, mais aussi pour toutes les fois où votre aide a été des plus appréciées. J'espère sincèrement que vous continuerez à vous épanouir dans votre cursus et que vous en apprendrez autant, voire plus que moi. Chérissez chaque moment.

À *mes amis du cycle préparatoire : Alaa, Maroua, Sara, Sofiane, Lyes, Yacine, Bouchra et Yasmine*, nos chemins se sépareront peut-être, mais il y aura toujours une place qui vous est dédiée.

À *ma promotion GPE*, trois ans intenses, éprouvants, drôles et beaux à la fois. Votre gentillesse, votre générosité et votre énergie m'ont portée dans les moments les plus compliqués. Merci, vraiment. Un merci tout particulier à ceux qui se sont montrés présents à 11h comme à 3h du matin : *Maria, Lyna, Abir* et, bien sûr, mon binôme, *Boualem* (the best).

À *Sophie et Rayane*, cinq ans d'amitié. Dans les hauts et dans les bas, dans les éclats de rire et les longs chemins parcourus ensemble, vous êtes restés malgré tout, et c'est ce « malgré tout » qui vous rend si précieux. Vous êtes, comme dirait quelqu'un, mes piliers.

À *Sophie*, je ne pouvais pas écrire ces dédicaces sans te dédier un passage entier. J'ai parfois du mal à comprendre comment tu fais pour toujours répondre présente ; merci de ne jamais avoir décliné mes appels, de me réveiller tôt le matin même quand tu es fatiguée, de me faire tenter de nouvelles expériences, de m'écouter même quand c'est la 1000^e fois que je me plains, et bien plus encore. Merci d'être rentrée dans ma vie, toi et ta lumière.

À *Meryem*, plus de nuits blanches partagées qu'une personne ne pourrait raisonnablement tolérer, et pourtant, tu t'es montrée toujours ouverte à mes idées, et patiente face à mes doutes. Au-delà d'être une amie chère, my Luci partner, c'est ton ambition et ta motivation qui ont rendu ce travail possible. À ma binôme exceptionnelle.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des codes

Liste des acronymes

Introduction générale

1	Contexte industriel et cadre du projet	21
1.1	Introduction	22
1.2	TotalEnergies : Présentation générale	22
1.3	Organisation logistique de TELA	24
1.4	Problématique et objectifs du stage	26
1.4.1	Diagnostic de la situation actuelle : le défi de l'optimisation	26
1.4.2	Objectifs du projet de fin d'études	27
1.5	Périmètre et délimitation de l'étude	28
1.6	Conclusion du chapitre	29
2	État de l'art et cadre théorique	30
2.1	Introduction	31
2.2	Changement climatique et émissions GES	31
2.3	Le GHG Protocol : référentiel mondial de comptabilité carbone	33
2.3.1	Scope 3 – Émissions indirectes de la chaîne de valeur	34
2.3.2	Catégorie 9 - Transport et distribution aval	35
2.4	Méthodes de calcul du bilan carbone du transport	36

2.4.1	Approches générales : monétaire, physique, fuel-based	36
2.4.2	La méthode ADEME par facteurs d'émission par défaut (table t · km) . .	37
2.4.3	La méthode des données agrégées (ADEME, formules 4 à 6) - méthode retenue	37
2.4.4	Limites et incertitudes des méthodes	39
2.5	Réglementation algérienne et internationale	39
2.6	Optimisation du transport et taux de remplissage	40
2.7	Digitalisation de la logistique	44
2.8	Conclusion du chapitre	46
3	Bilan carbone du transport aval (Scope 3 - Catégorie 9)	47
3.1	Introduction	48
3.2	Méthodologie adoptée	48
3.3	Traitement et préparation des données	49
3.3.1	Algorithme de tri des villes (nearest neighbor)	52
3.3.2	Remplissage des distances (matrice inter-wilayas)	53
3.4	Inventaire des données transport	54
3.4.1	Structure de l'inventaire	54
3.5	Résultats et analyse du bilan carbone	55
3.5.1	Consommation spécifique et donnée agrégée	55
3.5.2	Logique de calcul incrémentale	56
3.6	Analyse des résultats	57
3.6.1	Indicateurs globaux	57
3.6.2	Répartition par dépôt et par prestataire	58
3.6.3	Analyse géographique : émissions par wilaya	59
3.6.4	Analyse temporelle : évolution mensuelle des émissions	60
3.7	Diagnostic et leviers de réduction	61
3.7.1	Diagnostic principal : le taux de remplissage comme levier central	61
3.7.2	Leviers identifiés	62
3.7.3	Limites de l'inventaire	62
3.8	Conclusion du chapitre	63

4	Conception et mise en œuvre de la plateforme de planification logistique	64
4.1	Introduction	65
4.2	Expression des besoins	65
4.2.1	Analyse du processus actuel	65
4.2.2	Lacunes identifiées	66
4.2.3	Cahier des charges fonctionnel	67
4.3	Architecture de la solution	69
4.3.1	Description des couches	70
4.3.1.1	Couche de présentation	70
4.3.1.2	Couche logique métier	71
4.3.1.3	Couche de persistance	71
4.3.2	Modules fonctionnels	72
4.3.3	Choix technologiques	73
4.4	Algorithme de planification et optimisation du taux de remplissage	74
4.4.1	Contraintes non modélisées et périmètre du système	74
4.4.2	Formulation du problème	74
4.4.2.1	Données du problème	75
4.4.2.2	Variables de décision	75
4.4.2.3	Contraintes	75
4.4.2.4	Fonction objectif	75
4.4.3	Complexité et choix de l'approche heuristique	76
4.4.4	Vue d'ensemble : Cluster-First / Route-Second	76
4.4.5	Phase 1 – Subdivision des commandes lourdes	77
4.4.6	Phase 2 – Constitution des lots	79
4.4.7	Phase 3 – Construction des tournées	81
4.4.8	Phase 4 – Optimisation 2-opt	83
4.4.9	Intégration des règles métier	84
4.4.9.1	Règle « Clients PL Interdit »	85
4.4.9.2	Priorisation par âge des commandes	85
4.4.10	Validation et performances	85

4.5	Implémentation et fonctionnalités clés	86
4.5.1	Architecture frontend et expérience utilisateur	86
4.5.2	Saisie et gestion des commandes	87
4.5.3	Planification et édition interactive des tournées	89
4.5.4	Visualisation cartographique des tournées	90
4.5.5	Tableau de bord et analyse de performance	91
4.5.6	Traçabilité : journal d’audit	92
4.5.7	Garanties d’intégrité	93
4.5.7.1	Identifiants uniques de tournées	93
4.5.7.2	Historique en mode journal cumulatif	93
4.5.7.3	Tolérance aux données corrompues	93
4.6	Conclusion du chapitre	94
5	Validation expérimentale et évaluation de l’impact de la plateforme	95
5.1	Introduction	96
5.2	Protocole de validation expérimentale	96
5.3	Fonctionnement de la plateforme sur le cas de validation	97
5.3.1	Saisie et organisation des commandes	97
5.3.2	Planification algorithmique et résultats intermédiaires	98
5.4	Résultats de la planification optimisée	98
5.5	Analyse comparative avant / après	100
5.5.1	Tableau de bord comparatif	100
5.5.2	Analyse des gains par dimension	100
5.5.2.1	Dimension environnementale	100
5.5.2.2	Dimension logistique	101
5.5.2.3	Dimension opérationnelle	101
5.6	Mise en perspective : que représente 1 tonne de CO ₂ e évitée?	101
5.7	Discussion des résultats et limites	103
5.7.1	Forces de la solution	103
5.7.2	Limites identifiées	103
5.8	Recommandations et perspectives	104

5.9 Conclusion du chapitre	104
--------------------------------------	-----

Conclusion générale

Bibliographie

Table des figures

- 1.1 *Structure organisationnelle simplifiée du groupe TotalEnergies - positionnement de la branche Lubrifiants et de TELA (Source : auteurs, d'après TotalEnergies 2023)*
- 1.2 *Cartographie des flux de transport aval de TELA : dépôts de Blida et Oran vers les wilayas desservies (2025) - Source : Power BI TELA, données internes*
- 1.3 *Schéma de la chaîne d'approvisionnement aval de TELA : de la production au client final - Source : auteurs*
- 1.4 *Évolution mensuelle du taux de remplissage du transport secondaire de TELA (2025) - Source : reporting interne TotalEnergies Lubrifiants Algérie*
- 1.5 *Architecture du projet : articulation entre le volet Bilan Carbone et le volet Plateforme de planification - Source : auteurs*
- 2.1 *Schéma de l'effet de serre naturel (rayonnement solaire entrant / rayonnement infra-rouge piégé par les GES)*
- 2.2 *Répartition des émissions mondiales de GES par secteur - Source : PNUE 2022 . . .*
- 2.3 *Schéma classique du GHG Protocol représentant la chaîne de valeur avec Scope 1 (émissions directes), Scope 2 (énergie achetée) et Scope 3 (amont/aval)*
- 2.4 *Schéma illustrant le principe de la Formule 6 ADEME : calcul incrémental du CO_{2e} par segment*
- 2.5 *Principe de dérivation des formules ADEME appliquées au calcul incrémental du CO_{2e} - Source : auteurs, d'après ADEME 2012*
- 2.6 *Schéma illustrant les étapes du Vehicle Routing Problem*
- 2.7 *Processus de fonctionnement d'un TMS*
- 3.1 *Schéma méthodologique global du chapitre 3 : de la collecte des données au diagnostic carbone - Source : auteurs*
- 3.2 *Illustration de l'algorithme nearest neighbor : avant et après tri des villes d'une tournée - Source : auteurs*
- 3.3 *Pipeline de traitement des données : du fichier Excel brut à la colonne CO_{2e} calculée - Source : auteurs*
- 3.4 *Extrait de la Table 1 après traitement complet du pipeline - Source : capture Google Sheets, données TELA 2025*

3.5	<i>Schéma de la logique de calcul incrémentale du CO₂e par tournée - Source : auteurs</i>	.
3.6	<i>CO₂e total (t) par dépôt - Diagramme en anneau - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs</i>	
3.7	<i>Évolution mensuelle du CO₂e (kg) par prestataire - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs</i>	
3.8	<i>CO₂e total (kg) par wilaya de destination - Graphique en barres horizontales - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs</i>	
3.9	<i>Tableau de bord Power BI complet - Vue d'ensemble du bilan carbone TELA 2025 - Source : auteurs</i>	
3.10	<i>Taux de remplissage annuel 2025 - Graphique en gauge - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs</i>	
4.1	<i>Processus actuel de planification chez TELA - Source : auteurs</i>	
4.2	<i>Architecture de la solution - Source : auteurs</i>	
4.3	<i>Vue d'ensemble de l'algorithme de planification - Source : auteurs</i>	
4.4	<i>Écran d'authentification de la plateforme - Source : auteurs</i>	
4.5	<i>Menu d'accueil de la plateforme - Source : auteurs</i>	
4.6	<i>Fenêtre de saisie de commande et détection de doublons - Source : auteurs</i>	
4.7	<i>Vue de planification : tournées proposées et indicateurs visuels - Source : auteurs</i>	. . .
4.8	<i>Édition manuelle d'une tournée avec réordonnancement par glisser-déposer - Source : auteurs</i>	
4.9	<i>Erreur de dépassement de capacité - Source : auteurs</i>	
4.10	<i>Représentation cartographique des tournées - Source : auteurs</i>	
4.11	<i>Tableau de bord : indicateurs principaux et visualisations - Source : auteurs</i>	
4.12	<i>Journal d'audit horodaté des actions utilisateurs - Source : auteurs</i>	
5.1	<i>Saisie des commandes de décembre 2025 - Source : capture Google Sheets</i>	
5.2	<i>Module de planification : tournées proposées par l'algorithme pour le 15 décembre 2025 - Source : capture plateforme TELA</i>	
5.3	<i>Extrait du fichier Excel exporté par la plateforme d'optimisation - Source : auteurs</i>	. .
5.4	<i>Dashboard Power BI post-optimisation : CO₂e total 37,63 tCO₂e et taux de remplissage 95,57 % - Source : auteurs</i>	

Liste des tableaux

1.1	Chiffres clés du groupe TotalEnergies (2025)	...
1.2	Domaines d'activité de TotalEnergies en Algérie	...
1.3	Prestataires de transport de TELA et caractéristiques des flottes (2025)	...
1.4	Périmètre de l'étude	...
2.1	Les 15 catégories du Scope 3 (GHG Protocol)	...
2.2	Comparaison des trois approches de calcul du bilan carbone	...
2.3	Barème des données agrégées par prestataire et par palier de capacité	...
2.4	Explication des différentes méthodes connues d'optimisation	...
3.1	Variables collectées, sources et rôle dans le calcul carbone	...
3.2	Étapes du pipeline de traitement automatisé (Google Apps Script)	...
3.3	Paramètres, facteurs d'émission et hypothèses de calcul	...
3.4	Résultats globaux du bilan carbone du transport aval TELA (2025)	...
3.5	Indicateurs mensuels du bilan carbone TELA (2025)	...
4.1	Lacunes du processus actuel et impact opérationnel	...
4.2	Besoins fonctionnels de la plateforme	...
4.3	Besoins non fonctionnels de la plateforme	...
4.4	Structure des feuilles de persistance	...
4.5	Modules fonctionnels de la plateforme	...
4.6	Choix technologiques et justifications	...
4.7	Performance de l'algorithme sur trois jeux de tests représentatifs	...
4.8	Comparaison indicative de la planification manuelle et de l'algorithme proposé	...
5.1	Paramètres du protocole de validation expérimentale	Source : auteurs. ...
5.2	Comparaison synthétique des résultats avant et après optimisation	Source : auteurs.
5.3	Comparaison avant/après planification optimisée – Décembre 2025, dépôt Blida	Source :

	auteurs.	
5.4	Équivalences concrètes d'une tonne de CO ₂ e évitée	Sources : ADEME, Our World in Data, Carbon Footprint Ltd, CDER Algérie et WWF.
5.5	Recommandations opérationnelles et stratégiques	Source : auteurs.

Liste des codes

Listing 3.1. `ajouterConsommation()` + `calculerDonneeAgreguee()` — `DataProcessor.gs`

Listing 3.2. `calculerCO2e()`—`DataProcessor.gs` (Formule 6 ADEME)

Listing 3.3. `onOpen()` - Menu `DataProcessor.gs`

Listing 3.4. `nearestNeighbor()` - `DataProcessor.gs`

Listing 3.5. `ultraNormaliser()` - `DataProcessor.gs`

Pseudocode 4.1. Subdivision des commandes lourdes

Listing 4.1. Code d'exécution de la fonction `SplitHeavyOrders`

Pseudocode 4.2. Constitution des lots clients

Listing 4.2. Code d'exécution de la fonction `BuildClientLots`

Pseudocode 4.3. Construction des tournées par région

Listing 4.3. Code d'exécution de la fonction `BuildTournées`

Pseudocode 4.4. Optimisation 2-opt (TSP ouvert)

Listing 4.4. Code d'exécution de la fonction `TwoOptRoute`

Liste des acronymes

- **ADNI** : Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative
- **CNN** : Convolutional Neural Network
- **DICOM** : Digital Imaging and Communications in Medicine
- **ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
- **AFR** : Alternative Fuels and Raw Materials
- **API** : American Petroleum Institute
- **Apps Script** : Google Apps Script – environnement de développement JavaScript Google
- **BF** : Besoin Fonctionnel
- **BL** : Bon de Livraison
- **BNF** : Besoin Non Fonctionnel
- **CAPEX** : Capital Expenditure (dépenses d'investissement)
- **Cat.** : Catégorie
- **CDN** : Contribution Déterminée au niveau National
- **CFP** : Compagnie Française des Pétroles
- **Chart.js** : Bibliothèque JavaScript de visualisation de données
- **CH₄** : Méthane
- **CO₂** : Dioxyde de carbone
- **CO₂e** : Équivalent dioxyde de carbone
- **CVRP** : Capacitated Vehicle Routing Problem
- **DA** : Dinar Algérien
- **FE** : Facteur d'Émission
- **GES** : Gaz à Effet de Serre
- **GHG Protocol** : Greenhouse Gas Protocol – référentiel mondial de comptabilité GES
- **GIEC** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
- **GPS** : Global Positioning System
- **HSSE** : Hygiène, Sécurité, Santé et Environnement
- **HOG** : Histogramme de Gradients Orientés
- **IRM** : Imagerie par Résonance Magnétique
- **KNN** : K-Nearest Neighbors
- **IoT** : Internet of Things (Internet des Objets)
- **ISO** : International Organization for Standardization
- **KPI** : Key Performance Indicator (Indicateur Clé de Performance)
- **Leaflet** : Bibliothèque JavaScript de cartographie interactive
- **NIFTI** : Neuroimaging Informatics Technology Initiative

- **N₂O** : Protoxyde d'azote
 - **OPEX** : Operating Expenditure (dépenses d'exploitation)
 - **PFE** : Projet de Fin d'Études
 - **PL** : Poids Lourd
 - **PTAC** : Poids Total Autorisé en Charge
 - **Power BI** : Microsoft Power Business Intelligence (outil de visualisation de données)
 - **ppm** : Parties par million
 - **PRG** : Potentiel de Réchauffement Global
 - **RSE** : Responsabilité Sociétale des Entreprises
 - **SAP** : Systems, Applications and Products (système ERP)
 - **SPA** : Société Par Actions / Single-Page Application (selon contexte)
 - **SortableJS** : Bibliothèque JavaScript de réordonnancement par glisser-déposer
 - **SSO** : Single Sign-On (authentification unique)
 - **TELA** : TotalEnergies Lubrifiants Algérie
 - **TMS** : Transport Management System
 - **TRM** : Transport Routier de Marchandises
 - **TSP** : Travelling Salesman Problem (Problème du Voyageur de Commerce)
 - **USD** : Dollar Américain
 - **VRP** : Vehicle Routing Problem (Problème de Tournées de Véhicules)
 - **WBCSD** : World Business Council for Sustainable Development
 - **WRI** : World Resources Institute
 - **YTD** : Year-to-Date (cumul annuel depuis le début de l'année)
 - **2-opt** : Algorithme d'optimisation locale de tournées (échange de deux arêtes)
-

Introduction générale

Introduction générale

“Ce que tu mesures, tu le comprends. Ce que tu comprends, tu peux le changer.”

—Lord Kelvin

Ce n'est plus une projection pour 2050, c'est la réalité de notre présent. Crises climatiques à répétition, basculements écosystémiques, pressions croissantes sur les ressources : l'urgence climatique ne laisse plus de place à la temporisation. Face à ce constat, la performance industrielle ne peut plus se mesurer uniquement à l'aune des gains financiers ou logistiques, mais doit intégrer sa résilience face au réchauffement global. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat est sans ambiguïté (GEIEC) est sans ambiguïté : pour limiter le réchauffement à 1,5°C, les émissions mondiales de gaz à effet de serre doivent atteindre leur pic avant 2025 et diminuer de 43 % d'ici 2030 [1]. Dans cette équation, le secteur des transports occupe une place singulière : responsable d'environ 25 % des émissions mondiales de CO₂e liées à l'énergie [2], c'est le seul secteur dont les rejets ont continué de croître de manière quasi ininterrompue au cours de la dernière décennie.

À l'échelle nationale, l'Algérie s'inscrit dans ce changement de paradigme à travers sa Contribution Déterminée au niveau National, qui engage le pays à réduire ses émissions de 7 % à 22 % d'ici 2030 [3]. Pour un groupe multi-énergies comme TotalEnergies, engagé dans une trajectoire de neutralité carbone à l'horizon 2050, l'enjeu ne réside plus dans le simple suivi passif des indicateurs, mais dans une réduction active et mesurable de son empreinte. C'est dans les flux de transport aval, classés en Scope 3, Catégorie 9 selon le GHG Protocol, que se situe le gisement d'optimisation le plus stratégique [4].

C'est à cette intersection que s'inscrit le présent projet de fin d'études, mené au sein de TotalEnergies Lubrifiants Algérie. Il vise, d'une part, à établir et automatiser le calcul du bilan carbone du transport aval, en s'appuyant sur les méthodologies du GHG Protocol et de l'ADEME [4, 5], et, d'autre part, à concevoir une plateforme de planification intelligente des commandes et des tournées de livraison, reposant sur des algorithmes d'optimisation combinatoire.

Ce mémoire est structuré en 5 chapitres de la manière suivante :

Chapitre 1 : Ce chapitre présente le groupe TotalEnergies, sa filiale TELA, la chaîne d'approvisionnement aval ainsi que le diagnostic des inefficacités logistiques qui motivent ce projet.

Chapitre 2 : Ce chapitre expose les fondements du changement climatique, les cadres méthodologiques du GHG Protocol et de l'ADEME, la réglementation environnementale algérienne, les modèles d'optimisation des tournées de véhicules et le rôle de la digitalisation dans la décarbonation logistique.

Chapitre 3 : Ce chapitre est consacré au bilan carbone du transport aval (Scope 3, Cat. 9) : collecte et traitement des données de transport de TELA sur une année complète, aboutissant à une baseline exprimée en tonnes de CO₂e, et identification via une analyse de

Pareto des axes les plus émetteurs.

Chapitre 4 : Ce chapitre présente la conception de la plateforme de planification : cahier des charges fonctionnel, architecture logicielle, modélisation des algorithmes de regroupement des commandes et d'optimisation des tournées.

Chapitre 5 : Ce chapitre est dédié à la validation de la solution par comparaison aux données historiques de TELA, à la quantification des gains obtenus et aux recommandations pour une intégration pérenne.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par les principales conclusions et quelques perspectives.

Chapitre 1

Contexte industriel et cadre du projet

1.1 Introduction

Ce chapitre pose les fondements contextuels du projet en présentant l’entreprise d’accueil, TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA), filiale opérationnelle du groupe TotalEnergies. Il s’attache à décrire l’organisation logistique de TELA, à cartographier les flux de transport aval qui constituent le périmètre central de cette étude, et à formuler la problématique ainsi que les objectifs du projet. Une attention particulière est portée à la délimitation rigoureuse du périmètre d’analyse, condition préalable à toute démarche sérieuse de comptabilité carbone.

1.2 TotalEnergies : Présentation générale

TotalEnergies constitue aujourd’hui l’un des principaux groupes énergétiques à l’échelle internationale. Fondée en 1924 sous le nom de Compagnie française des pétroles (CFP), l’entreprise a connu plusieurs transformations stratégiques majeures, aboutissant en 2021 à l’adoption de sa dénomination actuelle, qui reflète sa volonté affichée de s’inscrire dans la dynamique de la transition énergétique mondiale [6]. Présente dans plus de 120 pays, elle déploie une organisation intégrée couvrant l’ensemble de la chaîne de valeur énergétique, allant de l’exploration et la production jusqu’à la distribution finale des produits énergétiques. Sur le plan financier, le groupe a réalisé un chiffre d’affaires de 201 milliards de dollars en 2025 et emploie plus de 100 000 collaborateurs à travers le monde [6].

TABLE 1.1 – Chiffres clés du groupe TotalEnergies (2025)

Indicateur	Valeur
Production d’hydrocarbures	2 529 kbep/j (2025)
Capacité renouvelable installée	$\approx$ 34,1 GW (2025)
Part du gaz dans la production	$\approx$ 45,51 %
Objectif net zéro	2050 (ambition groupe)

Source : Rapport annuel TotalEnergies 2025.

La Figure 1.1 illustre la structure organisationnelle simplifiée du groupe TotalEnergies, mettant en évidence le positionnement de la branche Lubrifiants et de TELA au sein de cette organisation.

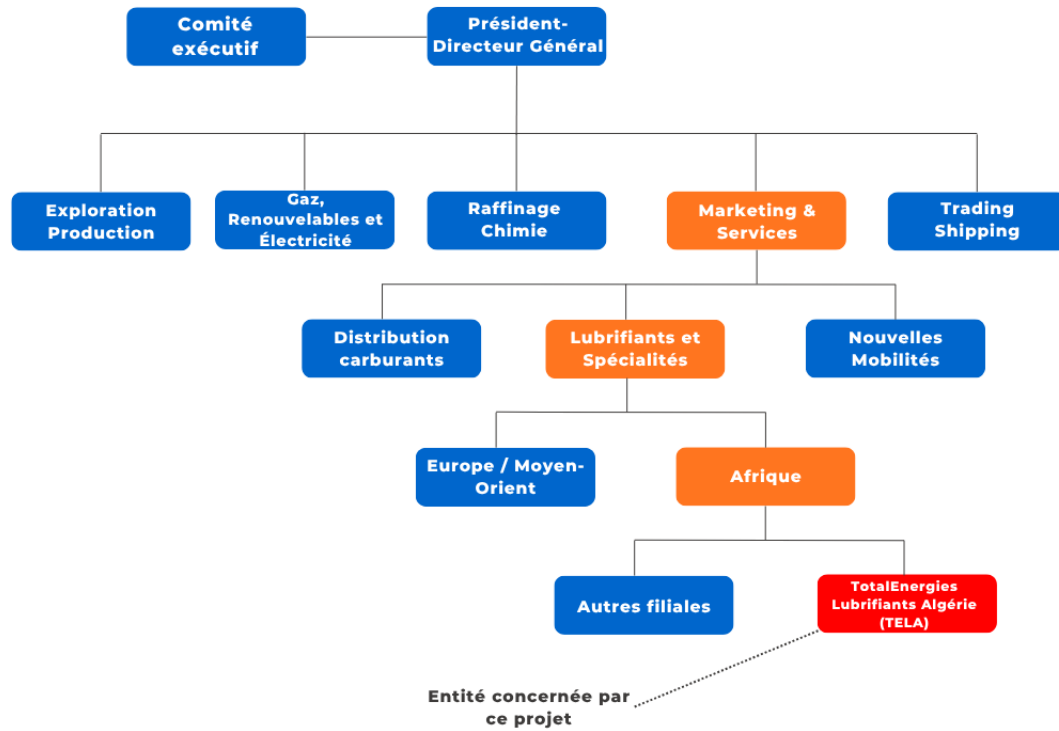


FIGURE 1.1 – Structure organisationnelle simplifiée du groupe TotalEnergies - positionnement de la branche Lubrifiants et de TELA (Source : auteurs, d'après TotalEnergies 2023)

Dans le contexte africain, et plus particulièrement en Algérie, TotalEnergies occupe une position stratégique. Le pays représente un marché énergétique majeur en raison de son potentiel considérable en hydrocarbures et de la croissance continue de sa demande industrielle. L'implantation du groupe en Algérie s'inscrit dans une logique de partenariat à long terme avec l'entreprise nationale Sonatrach, couvrant des activités allant de l'exploration pétrolière à la distribution de produits raffinés [7]. Le tableau 1.2 synthétise les principaux domaines d'activité de TotalEnergies en Algérie.

TABLE 1.2 – Domaines d'activité de TotalEnergies en Algérie
Source : TotalEnergies Algérie.

Domaine d'activité	Implantation / Activité
Exploration & Production	Partenariats avec Sonatrach sur plusieurs blocs (Tin Fouye, etc.)
Raffinage & Distribution	Commercialisation de carburants et produits pétroliers
Lubrifiants	TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA) - production et distribution
Énergie renouvelable	Projets en développement dans le cadre de la transition énergétique

C'est dans ce contexte qu'évolue TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA), entité opérationnelle spécialisée dans la production et la commercialisation de lubrifiants sur le marché algérien.

TELA assure la disponibilité d'une gamme complète de produits destinés aux secteurs industriels, automobiles et aux particuliers. Son organisation interne repose sur une structuration fonctionnelle classique, intégrant des départements de production, de logistique, de commercial et de fonctions support. La fonction logistique y occupe une place déterminante en raison de son impact direct sur la performance économique et environnementale de l'entreprise.

1.3 Organisation logistique de TELA

L'organisation logistique de TELA s'inscrit dans une logique de chaîne d'approvisionnement aval, couvrant l'ensemble des opérations depuis la sortie des produits finis jusqu'à leur livraison au client final. Cette chaîne repose sur deux dépôts principaux situés à Blida et à Oran, depuis lesquels rayonnent l'ensemble des flux de distribution à l'échelle nationale. Le dépôt de Blida dessert principalement le centre, l'est et le sud du pays, tandis que celui d'Oran couvre les wilayas de l'ouest algérien [8].

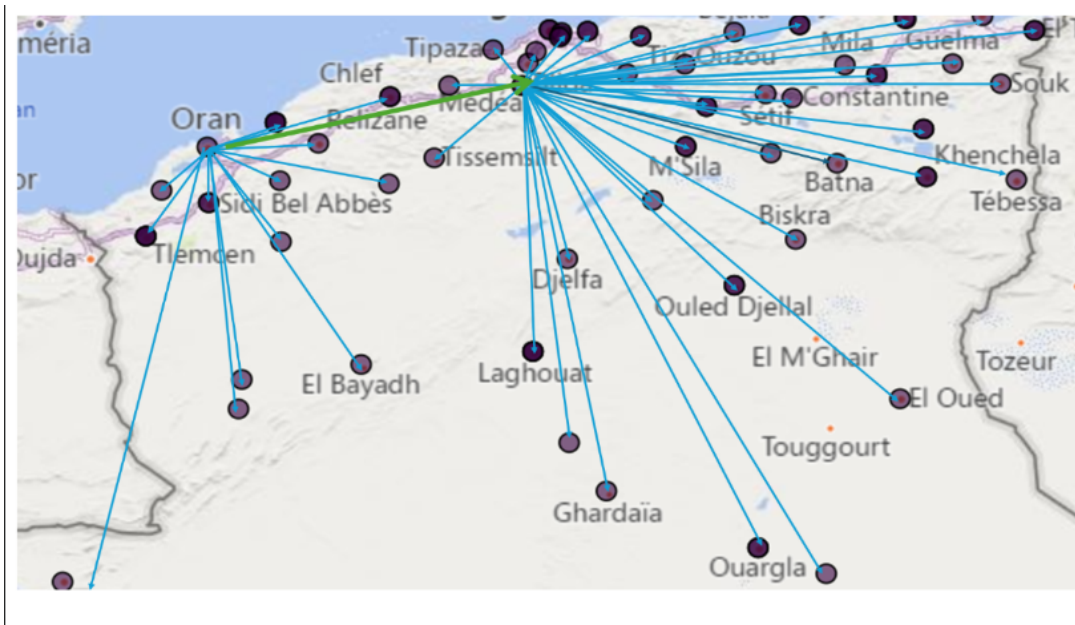


FIGURE 1.2 – Cartographie des flux de transport aval de TELA : dépôts de Blida et Oran vers les wilayas desservies (2025) - Source : Power BI TELA, données internes

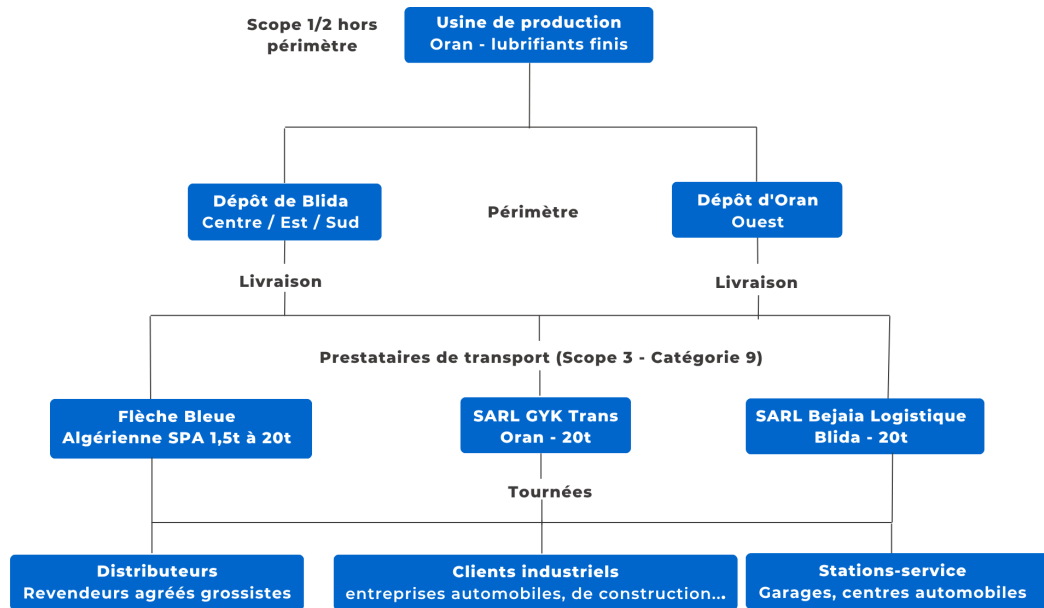


FIGURE 1.3 – Schéma de la chaîne d'approvisionnement aval de TELA : de la production au client final - Source : auteurs

Le transport routier constitue l'unique modalité logistique retenue, en raison de sa flexibilité et de sa capacité à desservir l'ensemble du territoire, y compris les zones enclavées. TELA fait appel à trois prestataires externes spécialisés dans le transport de marchandises, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.3.

TABLE 1.3 – Prestataires de transport de TELA et caractéristiques des flottes (2025)
Source : données internes TELA.

Prestataire	Capacités disponibles (tonnes)
Flèche Bleue Algérienne SPA	1,5 t - 2,5 t - 3,5 t - 5 t - 7 t - 10 t - 20 t
SARL GYK Trans	20 t
SARL Bejaia Logistique	20 t

Dans la pratique, les flux de transport se caractérisent par une forte variabilité, tant au niveau des volumes transportés que des distances parcourues. Cette variabilité est accentuée par des pratiques de planification non systématisées, conduisant à des situations de sous-remplissage des véhicules. Un tel phénomène engendre une augmentation du nombre de trajets nécessaires pour satisfaire la demande, ce qui se traduit mécaniquement par une hausse des coûts logistiques et de l'empreinte carbone associée. La maîtrise et l'optimisation des flux de transport apparaissent ainsi comme des enjeux stratégiques pour l'entreprise, tant sur le plan économique qu'environnemental.

1.4 Problématique et objectifs du stage

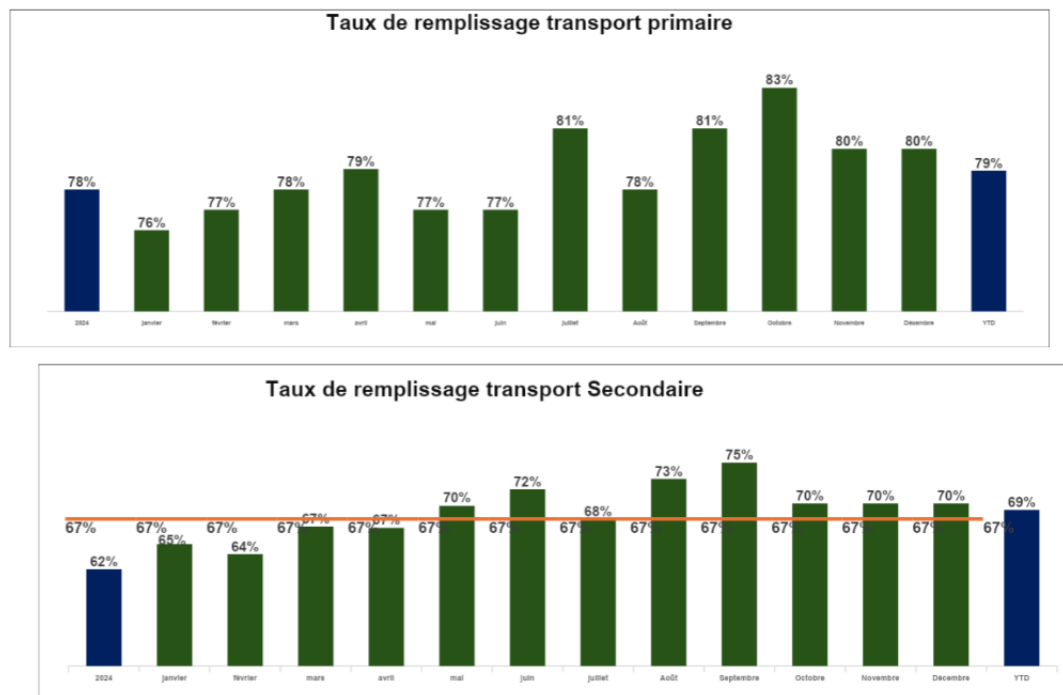
1.4.1 Diagnostic de la situation actuelle : le défi de l’optimisation

La gestion logistique de TotalEnergies Lubrifiants Algérie, si elle garantit une disponibilité satisfaisante des produits, se heurte néanmoins à des dysfonctionnements structurels dans la planification du transport aval. Le constat central est celui d’une fragmentation des flux logistiques qui pèse directement sur la performance environnementale et opérationnelle de l’entreprise.

En l’absence d’un outil de regroupement automatisé des commandes, la planification s’effectue de manière réactive, pilotée par l’urgence des délais plutôt que par une logique d’optimisation des capacités. Le regroupement des commandes par tournée repose sur l’appréciation personnelle des responsables de planification, sans critères formalisés ni méthode prédéfinie : des commandes à destination de wilayas géographiquement éloignées peuvent ainsi se retrouver affectées à un même véhicule, tandis que des livraisons vers des zones proches sont traitées séparément.

À cela s’ajoute l’absence d’un ordonnancement rationnel des destinations au sein d’une même tournée ; l’ordre de passage entre wilayas n’étant pas systématiquement établi selon la proximité au dépôt, ce qui génère des déviations inutiles et un kilométrage excessif. Cette dépendance au jugement individuel soulève par ailleurs des risques organisationnels : en l’absence de règles explicites, deux planificateurs confrontés à une même configuration de commandes peuvent aboutir à des décisions radicalement distinctes, rendant la performance logistique tributaire de l’expérience de chaque agent plutôt que d’une logique collective et reproductible.

Les conséquences de cette situation sont objectivées par les données de reporting interne de TELA. La figure 1.4 présente l’évolution mensuelle du taux de remplissage du transport secondaire sur l’année 2025. On constate que le taux annuel moyen (YTD) s’établit à 69 %, en progression par rapport à 2024 (62 %), mais demeurant en deçà des standards opérationnels recommandés. Les valeurs mensuelles oscillent entre 64 % en février et 75 % en septembre, révélant une variabilité saisonnière prononcée qui confirme l’absence d’une logique d’optimisation systématique : les pics de remplissage correspondent davantage à des périodes de forte demande qu’à des améliorations structurelles du processus de planification [8].

KPI's Transport décembre 25

2 |

FIGURE 1.4 – Évolution mensuelle du taux de remplissage du transport secondaire de TELA (2025)
- Source : reporting interne TotalEnergies Lubrifiants Algérie

Dans un secteur où le transport routier de fret figure parmi les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre, cette inefficacité logistique génère mécaniquement une empreinte carbone disproportionnée par rapport au volume de marchandises effectivement livré. Pourtant, cette réalité reste difficile à appréhender avec précision : si un outil de calcul existe, ses résultats s'éloignent sensiblement de la réalité faute d'une méthodologie suffisamment rigoureuse, et son utilisation entièrement manuelle en limite la fréquence et la fiabilité. L'entreprise se retrouve ainsi privée d'une visibilité exploitable sur ses émissions, ce qui compromet sa capacité à piloter sa performance environnementale et à démontrer la cohérence de ses pratiques opérationnelles avec les engagements de décarbonation portés à l'échelle du Groupe.

1.4.2 Objectifs du projet de fin d'études

Ce projet poursuit une double ambition : comprendre l'impact environnemental du transport aval tel qu'il existe aujourd'hui, puis agir sur les leviers opérationnels qui permettent de le réduire.

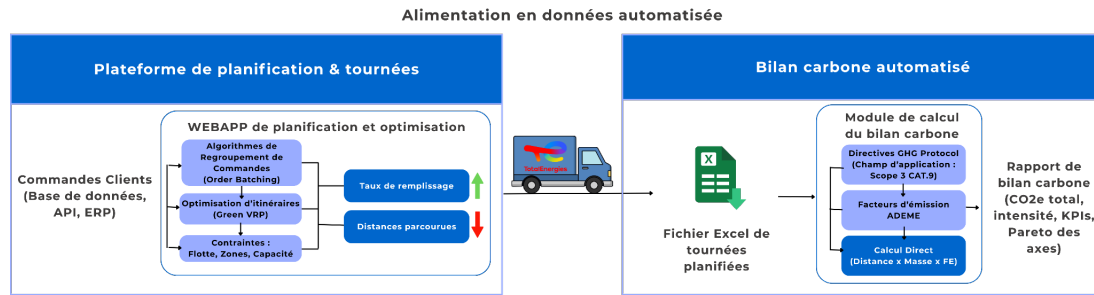


FIGURE 1.5 – Architecture du projet : articulation entre le volet Bilan Carbone et le volet Plateforme de planification - Source : auteurs

La première ambition se traduit par l'établissement d'un bilan carbone historique du transport aval, conduit selon le cadre du GHG Protocol (Scope 3, Catégorie 9) et les facteurs d'émission de l'ADEME [4, 5]. Au-delà de la mesure brute des émissions, cette phase vise à identifier les flux et les zones géographiques les plus émetteurs, afin de rendre visible ce qui, jusqu'ici, restait diffus. Elle se prolonge par le développement d'un outil de calcul automatisé — fondé sur Google Apps Script et Power BI — capable de reproduire cette analyse à partir de tout nouveaux fichiers de tournées et de commandes, ancrant ainsi la mesure carbone dans le quotidien opérationnel de l'entreprise.

La seconde ambition consiste à concevoir une plateforme de planification intelligente, qui automatise ce que la pratique actuelle laisse à l'appréciation individuelle. En s'appuyant sur des algorithmes d'optimisation combinatoire, elle regroupe les commandes par proximité géographique, ordonne les destinations de manière à minimiser le kilométrage parcouru, et maximise le taux de remplissage des véhicules. Les tournées ainsi planifiées alimentent directement l'outil de calcul carbone, formant un pipeline naturel entre optimisation logistique et évaluation environnementale.

C'est cette articulation entre les deux volets qui donne au projet sa cohérence : mesurer pour comprendre l'existant, optimiser pour en réduire l'impact en traduisant concrètement, à l'échelle locale, les engagements de décarbonation du Groupe TotalEnergies.

1.5 Périmètre et délimitation de l'étude

L'étude menée dans le cadre de ce travail s'inscrit dans le référentiel du GHG Protocol, qui constitue aujourd'hui la norme internationale de référence pour la comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre [4]. Plus précisément, l'analyse porte sur le Scope 3, et en particulier sur la catégorie 9 relative au transport et à la distribution aval. Cette catégorie englobe l'ensemble des émissions indirectes générées par le transport des produits depuis les installations de l'entreprise jusqu'aux clients finaux, y compris les activités réalisées par des prestataires de transport externes [4].

La délimitation rigoureuse du périmètre constitue une étape méthodologique incontournable dans tout exercice de bilan carbone. Elle garantit la cohérence des données collectées, la reproductibilité de l'analyse et la pertinence des comparaisons dans le temps. Le tableau 1.4 synthétise les frontières retenues selon quatre dimensions complémentaires.

TABLE 1.4 – Périmètre de l'étude
Source : auteurs.

Dimension	Périmètre retenu	Exclusions
Géographique	Territoire algérien (wilayas desservies par TELA)	Opérations hors Algérie, filiales étrangères
Temporelle	Janvier à décembre 2025 (12 mois complets)	Années antérieures à 2025
Organisationnelle	TELA - transport aval (livraisons clients)	Transport amont, autres filiales TotalEnergies
Scope GHG	Scope 3 - Catégorie 9 (transport & distribution aval)	Scope 1, Scope 2, autres catégories Scope 3
Mode de transport	Transport routier de marchandises (TRM)	Transport maritime, aérien, pipeline
Acteurs	Prestataires externes mandatés par TELA	Flotte propre (inexistante), sous-traitance non mandatée

Cette délimitation appelle plusieurs précisions.

Sur le plan géographique, l'étude se concentre exclusivement sur les livraisons à destination du territoire algérien, ce qui permet de tenir compte des spécificités locales en matière d'infrastructures de transport et des conditions opérationnelles propres à ce marché. Sur le plan temporel, la période de référence couvre l'intégralité de l'année 2025, garantissant ainsi la représentativité des données et la prise en compte des variations saisonnières de la demande.

Sur le plan organisationnel, seules les activités de transport aval relevant directement de TELA sont incluses dans le périmètre. Cela exclut notamment les émissions liées au transport amont des matières premières et des produits semi-finis (Scope 3, Catégorie 4), aux déplacements professionnels des employés, ainsi qu'aux opérations des autres filiales du groupe TotalEnergies. Cette restriction volontaire du périmètre est justifiée par la disponibilité et la fiabilité des données, mais aussi par l'objectif opérationnel du projet, qui vise à fournir des résultats directement exploitables par les équipes logistiques de TELA.

Enfin, il convient de souligner que l'étude porte exclusivement sur le transport routier de marchandises, mode unique retenu par TELA pour ses opérations de distribution. Les autres modes de transport — maritime, ferroviaire, aérien — ne sont pas concernés par les flux de distribution nationale de l'entreprise et n'entrent donc pas dans le périmètre de l'analyse.

1.6 Conclusion du chapitre

Ce premier chapitre a permis de poser le cadre organisationnel et analytique du projet. La présentation de TotalEnergies et de TELA a mis en évidence la dimension stratégique des enjeux de transport aval. Le diagnostic de la situation actuelle révèle des marges d'amélioration significatives, tant sur le plan de l'efficacité logistique que de la mesure de l'empreinte carbone. La délimitation rigoureuse du périmètre d'étude, conforme aux exigences du GHG Protocol, garantit la cohérence et la reproductibilité de l'analyse conduite dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

État de l'art et cadre théorique

2.1 Introduction

Toute démarche de réduction des émissions commence par une compréhension rigoureuse de leurs origines, de leurs mécanismes et des outils disponibles pour les quantifier. Ce chapitre pose ce socle, en parcourant les dimensions scientifiques, normatives, réglementaires et techniques qui structurent l’approche adoptée dans ce projet.

Il s’ouvre sur les fondements du changement climatique et la physique de l’effet de serre, avant d’introduire les cadres méthodologiques qui permettent de traduire des activités économiques en émissions mesurables : le GHG Protocol comme référentiel de périmétrage, et les méthodes de l’ADEME comme outils de calcul. Une attention particulière est portée au Scope 3 Catégorie 9, qui couvre précisément les émissions liées au transport aval, périmètre central de ce travail.

Le chapitre aborde ensuite le cadre réglementaire algérien et international, afin de situer la démarche dans son contexte juridique et institutionnel. Il explore enfin les leviers opérationnels de décarbonation du transport, en examinant l’impact du taux de remplissage sur les émissions, les principes d’optimisation des tournées de véhicules, et le rôle croissant de la digitalisation logistique comme vecteur de performance environnementale.

2.2 Changement climatique et émissions GES

Le changement climatique s’impose aujourd’hui comme l’un des défis environnementaux les plus pressants à l’échelle mondiale. Hausse progressive des températures moyennes, modification des régimes de précipitations, intensification des phénomènes extrêmes tels que les vagues de chaleur, les sécheresses ou les inondations : ses manifestations sont multiples et ses conséquences de plus en plus tangibles. Selon le sixième rapport du GIEC publié en 2023 [1], la température moyenne mondiale a déjà augmenté d’environ 1,1°C par rapport aux niveaux préindustriels, et cette tendance devrait s’accélérer en l’absence d’actions correctives ambitieuses. Ce dérèglement est étroitement lié à l’augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, dont la majeure partie est imputable aux activités humaines.

L’effet de serre est, à l’origine, un phénomène naturel indispensable à la vie sur Terre. Des gaz tels que la vapeur d’eau, le dioxyde de carbone, le méthane ou le protoxyde d’azote absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, maintenant ainsi une température globale compatible avec les conditions biologiques actuelles. Sans cet effet, la température moyenne de la planète avoisinerait -18°C au lieu des $+15^{\circ}\text{C}$ actuels. Depuis la révolution industrielle cependant, les activités anthropiques ont considérablement accru les concentrations de ces gaz : la concentration en CO_2 atmosphérique est passée d’environ 280 ppm à plus de 420 ppm en 2023, soit une augmentation de l’ordre de 50% en deux siècles. Cette amplification de l’effet de serre naturel a enclenché un réchauffement global aux effets de plus en plus déstabilisateurs.

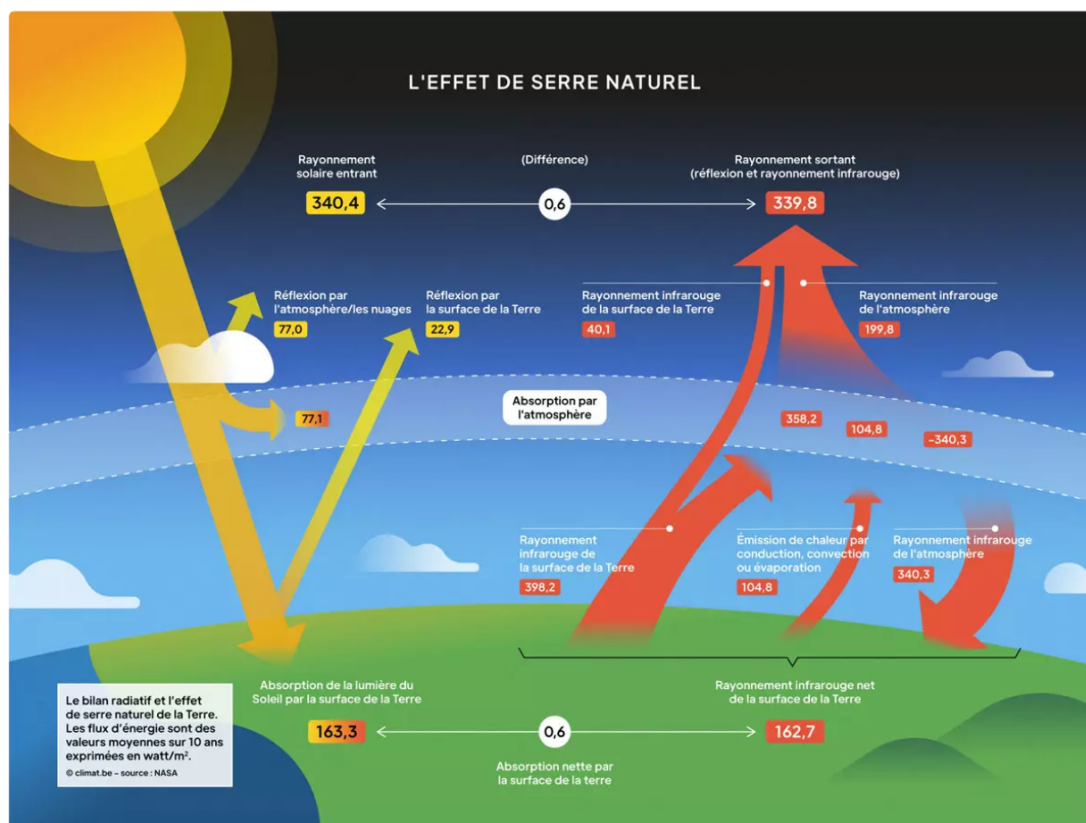


FIGURE 2.1 – Schéma de l'effet de serre naturel (rayonnement solaire entrant / rayonnement infrarouge piégé par les GES)

Les sources de ces émissions sont multiples : production d'énergie, industrie, agriculture et bâtiments contribuent chacun de manière significative à l'augmentation des concentrations atmosphériques. En 2022, les émissions mondiales de GES ont atteint un niveau record de 57,4 milliards de tonnes de CO₂e selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Parmi les secteurs contributeurs, le transport occupe une place singulière : il représente 25% des émissions mondiales de CO₂e liées à l'énergie selon les sources, et sa dépendance structurelle aux combustibles fossiles le rend particulièrement difficile à décarboner.

Au sein de ce secteur, le transport de marchandises par voie routière concentre une part croissante des émissions, portée par l'essor du commerce et la multiplication des flux de distribution. Les émissions liées à la logistique aval, c'est-à-dire à l'acheminement des produits depuis les entrepôts jusqu'aux clients finaux, constituent à ce titre un levier d'action prioritaire pour toute organisation cherchant à réduire son empreinte climatique.

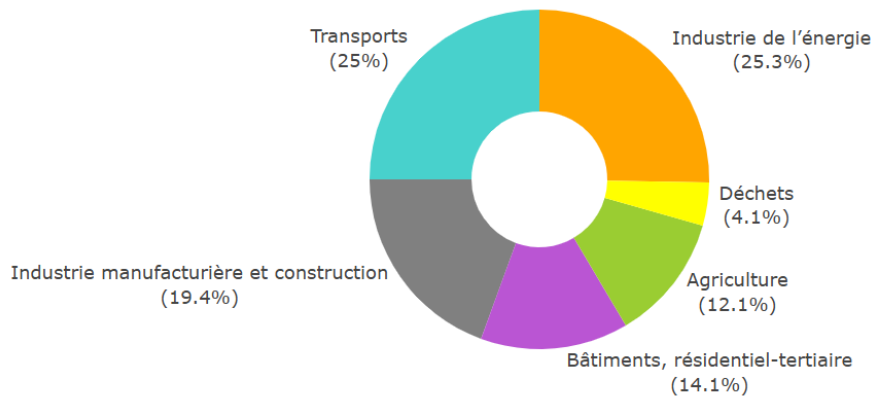


FIGURE 2.2 – Répartition des émissions mondiales de GES par secteur - Source : PNUE 2022

Face à l’ampleur du phénomène, la communauté internationale a progressivement structuré son action. L’Accord de Paris, adopté en 2015 et ratifié par 196 parties [10], fixe l’objectif de contenir le réchauffement bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, en visant idéalement 1,5°C. Pour respecter cette trajectoire, les scientifiques estiment que les émissions mondiales devront être réduites d’environ 43% d’ici 2030 par rapport aux niveaux de 2019, et atteindre la neutralité carbone aux alentours de 2050. Cet accord marque une étape décisive dans la gouvernance climatique mondiale, en incitant États, entreprises et organisations à mesurer, réduire et publier leurs émissions de manière transparente et vérifiable. Il a notamment impulsé le développement de cadres méthodologiques standardisés, devenus des références incontournables pour toute démarche sérieuse de comptabilité carbone.

C’est dans ce contexte que s’est imposée la notion d’équivalent dioxyde de carbone, exprimée en CO₂e. Cette unité de mesure permet de ramener l’ensemble des gaz à effet de serre à une grandeur commune, en s’appuyant sur le potentiel de réchauffement global (PRG) de chaque gaz, c’est-à-dire son impact climatique rapporté à celui du CO₂e sur un horizon de 100 ans. À titre d’exemple, le méthane possède un PRG de 28, signifiant qu’une tonne de méthane a un impact climatique équivalent à 28 tonnes de CO₂e sur cette période. Le protoxyde d’azote, quant à lui, affiche un PRG de 265. Cette conversion en CO₂e permet ainsi d’agrèger des émissions de nature très différente en un indicateur unique, cohérent et comparable. Il constitue aujourd’hui l’outil de référence pour l’élaboration des bilans carbone et l’évaluation de l’empreinte climatique d’une activité donnée, qu’il s’agisse d’un État, d’une entreprise ou d’une opération logistique spécifique.

2.3 Le GHG Protocol : référentiel mondial de comptabilité carbone

Le GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol) constitue le référentiel mondial le plus largement utilisé pour la comptabilité et le reporting des émissions de gaz à effet de serre. Développé conjointement par le World Resources Institute (WRI) et le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), ce cadre fournit des normes reconnues internationalement pour

mesurer, gérer et réduire les émissions de GES [4].

Le GHG Protocol définit trois scopes (périmètres) d’émissions permettant de catégoriser les sources d’émissions selon le degré de contrôle de l’entreprise :

Scope 1 : Émissions directes provenant de sources détenues ou contrôlées par l’entreprise, telles que la combustion de combustibles fossiles dans les chaudières, fours et véhicules propres à l’entreprise. Ces émissions incluent également les processus industriels et les émissions fugitives (fuites de gaz réfrigérants, par exemple).

Scope 2 : Émissions indirectes liées à la production d’énergie électrique, de vapeur, de chaleur ou de froid achetée et consommée par l’entreprise. Bien que ces émissions se produisent dans des installations détenues par des tiers (centrales électriques), elles sont considérées comme indirectement causées par les activités de l’entreprise.

Scope 3 : Toutes les autres émissions indirectes qui se produisent dans la chaîne de valeur de l’entreprise, en amont (upstream) et en aval (downstream). Le Scope 3 comprend 15 catégories distinctes, chacune couvrant des sources d’émissions spécifiques. Ces émissions représentent souvent la plus grande partie de l’empreinte carbone totale d’une entreprise, notamment pour les secteurs de la production et de la distribution.

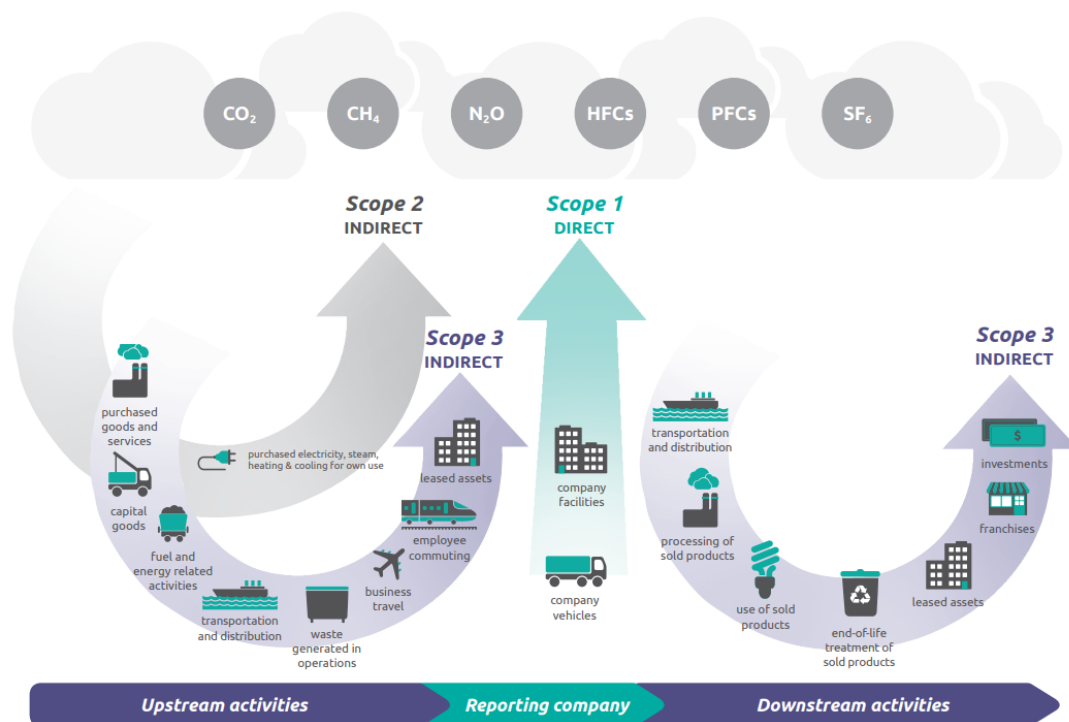


FIGURE 2.3 – Schéma classique du GHG Protocol représentant la chaîne de valeur avec Scope 1 (émissions directes), Scope 2 (énergie achetée) et Scope 3 (amont/aval)

2.3.1 Scope 3 – Émissions indirectes de la chaîne de valeur

Le Scope 3 du GHG Protocol couvre l’ensemble des émissions indirectes qui ne sont pas incluses dans le Scope 2, se produisant dans la chaîne de valeur de l’entreprise. Ces émissions sont généralement les plus difficiles à mesurer et à réduire, car elles dépendent de décisions et d’actions prises par des tiers (fournisseurs, clients, transporteurs). Les 15 catégories du Scope 3 sont présentées dans le tableau 2.1 [4].

TABLE 2.1 – Les 15 catégories du Scope 3 (GHG Protocol)
Source : GHG Protocol, 2011.

N°	Catégorie	Amont / Aval
1	Biens et services achetés	Amont
2	Biens d’équipement immobilisés (capital goods)	Amont
3	Combustibles et énergie non inclus dans Scope 1/2	Amont
4	Transport et distribution amont	Amont
5	Déchets générés par les opérations	Amont
6	Déplacements professionnels	Amont
7	Déplacements domicile-travail des employés	Amont
8	Biens loués en amont	Amont
9	Transport et distribution aval ← périmètre de cette étude	Aval
10	Traitement des produits vendus	Aval
11	Utilisation des produits vendus	Aval
12	Fin de vie des produits vendus	Aval
13	Biens loués en aval	Aval
14	Franchises	Aval
15	Investissements	Aval

2.3.2 Catégorie 9 - Transport et distribution aval

La Catégorie 9 (Downstream Transportation and Distribution) inclut les émissions survenant pendant l’année de reporting, provenant du transport et de la distribution des produits vendus, dans des véhicules et installations non détenus ou contrôlés par l’entreprise signalante. Ces émissions se produisent entre les opérations de l’entreprise et le consommateur final, lorsque le transport n’est pas payé par l’entreprise signalante.

Les émissions de la Catégorie 9 peuvent provenir de :

Entrepôts et centres de distribution : stockage des produits vendus dans des entrepôts et centres de distribution non contrôlés par l’entreprise.

Installations de détail : stockage dans les magasins de vente au détail.

Transport aérien : expédition par avion de produits vendus.

Transport ferroviaire : transport par train de marchandises.

Transport routier : camionnage et livraison par route.

Transport maritime : expédition par bateau.

Déplacements des clients : les entreprises peuvent inclure optionnellement les émissions des clients se rendant aux magasins de détail.

La Catégorie 9 inclut uniquement les émissions de transport et de distribution qui se produisent après que l’entreprise signalante a payé pour produire et distribuer ses produits. Les services de transport et de distribution en amont achetés par l’entreprise signalante sont exclus de la Catégorie 9 et inclus dans la Catégorie 4 (Upstream transportation and distribution), car dans ce cas l’entreprise achète directement le service.

Pour TELA, le périmètre de la Catégorie 9 se limite au transport routier de marchandises (cf. tableau 1.4, chapitre 1) : les autres sources listées ci-dessus (entrepôts tiers, retail, transport aérien/ferroviaire/maritime, déplacements clients) sont hors périmètre de l’étude.

2.4 Méthodes de calcul du bilan carbone du transport

2.4.1 Approches générales : monétaire, physique, fuel-based

Trois grandes familles d’approches existent pour calculer les émissions de GES liées au transport.

Approche monétaire (spend-based) : Cette méthode calcule les émissions en multipliant le montant dépensé pour un service de transport par un facteur d’émission monétaire (kgCO₂e/€ ou kgCO₂e/unité de devise) :

$$\text{Émissions (kgCO}_2\text{e)} = \text{Montant dépensé (€)} \times \text{Facteur d'émission (kgCO}_2\text{e/€)}$$

C’est l’approche la moins précise, car elle ne tient compte ni des distances réelles, ni des tonnages, ni du mode de transport. Elle est surtout utilisée lorsque les données physiques sont indisponibles ; ce qui n’est pas le cas dans ce travail.

Approche physique (distance-based) : Plus précise, elle calcule les émissions à partir de la masse transportée, de la distance parcourue et d’un facteur d’émission par mode :

$$\text{Émissions (kgCO}_2\text{e)} = \text{Masse (t)} \times \text{Distance (km)} \times \text{FE (kgCO}_2\text{e/t} \cdot \text{km)}$$

C’est l’approche recommandée par le GHG Protocol pour la Catégorie 9 lorsque les données de distance et de masse sont disponibles ; c’est la famille de méthode dans laquelle s’inscrit ce projet.

Approche fuel-based : Lorsque les données de consommation réelle de carburant sont disponibles auprès des transporteurs, cette méthode utilise directement la quantité de carburant consommée multipliée par le facteur d’émission du carburant. C’est l’approche la plus précise, mais rarement applicable car les entreprises n’ont généralement pas accès aux données de carburant de leurs prestataires tiers.

TABLE 2.2 – Comparaison des trois approches de calcul du bilan carbone
Source : auteurs, d’après GHG Protocol, 2011.

Approche	Formule	Précision	Cas d’usage
Monétaire	Émissions = Dépenses × FE (kgCO ₂ e/€)	Faible–moyenne	Données physiques absentes
Physique	Émissions = Masse (t) × Distance (km) × FE	Moyenne–élevée	Données réelles disponibles
Fuel-based	Émissions = Carburant (L) × FE (kgCO ₂ e/L)	Élevée	Accès aux données de consommation réelle

La méthode des données agrégées retenue dans ce projet (détaillée en 2.4.3) se situe à mi-chemin entre l’approche physique standard et l’approche fuel-based : elle s’appuie sur un taux de consommation par véhicule (proxy du carburant réellement consommé) combiné à la masse et à la distance, ce qui en fait une approche hybride plus précise que la méthode physique standard à facteur fixe.

2.4.2 La méthode ADEME par facteurs d’émission par défaut (table t · km)

Le guide ADEME (2012) propose une méthode par défaut appliquant un facteur d’émission fixe par tonne-kilomètre selon la catégorie du véhicule [5]. Cette méthode n’a pas été retenue, car le facteur est fixe quel que soit le taux de remplissage réel, ce qui revient à émettre la même intensité carbone qu’un camion soit chargé à 100 % ou à 40 %.

2.4.3 La méthode des données agrégées (ADEME, formules 4 à 6) - méthode retenue

Le même guide ADEME propose une méthode plus fine, dite des données agrégées, qui ne repose plus sur un facteur fixe par catégorie de véhicule mais sur le taux de consommation de carburant réel du véhicule rapporté à sa capacité, combiné au poids effectivement transporté à chaque segment de la tournée. C’est cette méthode qui a été retenue dans ce travail, car elle correspond aux données réellement disponibles auprès des prestataires de TELA (capacité par camion, taux de consommation par palier) et qu’elle permet de refléter la diminution progressive de la charge au fil d’une tournée multi-arrêts — une caractéristique structurante du transport aval de TELA (cf. section 1.3).

Formule 5 - Donnée agrégée :

$$\text{Donnée agrégée} = \frac{\text{Taux de consommation [L/km]}}{\text{Capacité max du camion [t]}} \times \text{Facteur d'émission [kgCO}_2\text{e/L]}$$

avec :

- Facteur d’émission diesel = $3,18 \text{ tCO}_2\text{e/t diesel} \times 0,835 \text{ kg/L}$ (masse volumique du diesel) = $2,655 \text{ kgCO}_2\text{e/L}$
- Taux de consommation : variable selon le prestataire et la capacité du camion, défini par paliers (de 1,5 t à 20 t)
- Capacité max : propre à chaque type/gabarit de camion

TABLE 2.3 – Barème des données agrégées par prestataire et par palier de capacité
Source : auteurs, d’après ADEME (2012) et données des prestataires.

Capacité (t)	Taux conso (L/km)	Calcul	Donnée agrégée (kgCO ₂ e/t · km)
<i>Flèche Bleue Algérienne SPA / SARL GYK Trans (mêmes taux de consommation)</i>			
1,5	0,08	$(0,08/1,5) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,14160
2,5	0,10	$(0,10/2,5) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,10620
3,5	0,12	$(0,12/3,5) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,09103
5	0,16	$(0,16/5) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,08496
7	0,19	$(0,19/7) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,07209
10	0,22	$(0,22/10) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,05841
20	0,38	$(0,38/20) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,05045
<i>SARL Bejaia Logistique</i>			
20	0,32	$(0,32/20) \times \frac{2,655}{2,655}$	0,04248

Formule 6 - CO₂e par livraison :

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{Donnée agrégée} \times \text{Poids restant sur le camion [t]} \times \text{Distance du segment [km]}$$

Le poids restant est recalculé après chaque arrêt de la tournée (poids initial moins le cumul des poids déjà livrés), ce qui permet d’attribuer à chaque segment une charge carbone proportionnelle à la charge réellement transportée à ce moment précis — et non à la charge initiale du camion au départ du dépôt.

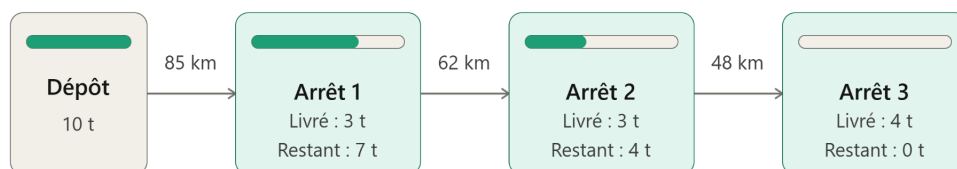


FIGURE 2.4 – Schéma illustrant le principe de la Formule 6 ADEME : calcul incrémental du CO₂e par segment

Ce raffinement méthodologique a une conséquence directe sur l’interprétation des résultats : deux tournées parcourant la même distance totale n’émettront pas la même quantité de CO₂e si l’ordre des arrêts diffère, car le poids restant — et donc l’intensité carbone de chaque segment —

dépend de l’ordre de déchargement. Ce constat fait le lien direct avec la section 2.6 (optimisation des tournées) et avec le volet « plateforme de planification » du mémoire : l’ordonnancement des arrêts n’est pas neutre sur le plan carbone.

2.4.4 Limites et incertitudes des méthodes

Les méthodes de calcul du bilan carbone comportent plusieurs limites et incertitudes, qui s’appliquent à des degrés divers selon la méthode choisie :

Qualité des données : les données de distance, de masse et de type de véhicule ne sont pas toujours disponibles ou précises, surtout pour le Scope 3 où les données proviennent de tiers (prestataires de transport).

Facteurs d’émission variables : les facteurs d’émission peuvent varier selon le pays, le type de carburant, l’âge du véhicule, les conditions de route — autant de paramètres non capturés par un facteur moyen ou un taux de consommation théorique par palier.

Hypothèses simplificatrices : en l’absence de données réelles, certaines hypothèses ont dû être posées (ex. distances reconstituées par matrice inter-wilayas plutôt que mesurées par GPS, ce qui peut sous-estimer ou surestimer les émissions réelles).

Émissions de la chaîne d’approvisionnement : pour la Catégorie 9, il reste difficile d’obtenir des données complètes sur tous les maillons (entrepôts tiers, distribution, détail) — ces maillons sont d’ailleurs hors périmètre de cette étude (cf. tableau 1.4).

Variabilité temporelle : les émissions varient selon les saisons et les périodes de pointe, ce qui rend les comparaisons annuelles complexes — observation cohérente avec la variabilité du taux de remplissage mensuel déjà constatée en section 1.4.1 (64% en février à 75% en septembre).

Malgré ces limites, le GHG Protocol et la méthode ADEME des données agrégées restent les référentiels les plus rigoureux disponibles pour ce type d’inventaire, à condition de documenter clairement les hypothèses retenues — ce qui sera fait au chapitre 3.

2.5 Réglementation algérienne et internationale

La lutte contre le changement climatique repose sur un ensemble d’engagements et de cadres normatifs qui, du niveau international au niveau national, structurent progressivement les pratiques des États comme des entreprises en matière de mesure, de réduction et de reporting des émissions de gaz à effet de serre.

À l’échelle internationale, l’Accord de Paris demeure le pilier central de la gouvernance climatique mondiale. Ratifié par l’Algérie en octobre 2016, il engage le pays à contribuer aux objectifs globaux de limitation du réchauffement. Dans ce cadre, l’Algérie a soumis sa Contribution Déterminée au niveau National, prévoyant une réduction inconditionnelle de 7% de ses émissions à l’horizon 2030, portée à 22% [3] sous réserve d’un appui international en matière de financement et de transfert de technologies. Cet engagement traduit une volonté politique réelle, même si sa mise en œuvre opérationnelle reste encore à consolider.

Sur le plan national, le socle juridique est posé par la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l’environnement dans le cadre du développement durable [11]. Elle établit

les principes fondateurs de la politique environnementale algérienne, notamment les principes de prévention, de précaution et de pollueur-payeur, et encadre les activités susceptibles d’avoir un impact sur l’environnement. Dans les secteurs du transport et de l’énergie, plusieurs dispositions réglementaires complémentaires encadrent indirectement les émissions, à travers des exigences de performance technique, de contrôle des installations et de gestion des risques environnementaux. Sans viser explicitement le carbone, ces textes contribuent néanmoins à orienter les pratiques industrielles et logistiques vers une maîtrise accrue de leurs impacts.

En complément de ce cadre réglementaire, les organisations s’appuient sur des référentiels volontaires pour structurer leurs démarches de comptabilité carbone. Le GHG Protocol constitue à ce titre la référence méthodologique la plus largement adoptée à l’échelle mondiale, en définissant les périmètres d’inventaire et les règles de comptabilisation des émissions selon trois scopes. Les méthodes publiées par l’ADEME viennent compléter ce cadre en fournissant les outils de calcul nécessaires à la quantification des émissions par activité (cf. section 2.4.3). Ensemble, ces deux référentiels forment la base méthodologique sur laquelle repose toute démarche sérieuse de bilan carbone.

Dans une perspective plus large, certaines organisations s’inscrivent dans une logique de management de l’énergie formalisée, dont l’ISO 50001 constitue le cadre de référence [12]. Cette norme internationale fournit un système structuré pour améliorer en continu la performance énergétique, réduire les consommations et, par extension, les émissions associées. Pour une entreprise comme TotalEnergies, dont les ambitions de décarbonation s’expriment à l’échelle du Groupe, l’ISO 50001 représente un levier stratégique permettant d’ancrer la transition énergétique dans les processus opérationnels quotidiens, y compris dans des activités aussi concrètes que la planification du transport aval.

2.6 Optimisation du transport et taux de remplissage

Dans un contexte où la maîtrise des coûts, la réduction des délais et la limitation des émissions de gaz à effet de serre sont devenues des priorités concurrentes, l’optimisation du transport s’impose comme un levier stratégique à part entière. Au cœur de cette démarche se trouve le taux de remplissage, indicateur clé qui mesure le niveau d’exploitation effective de la capacité d’un véhicule et conditionne directement la performance économique et environnementale d’une opération de transport.

Dans le secteur du transport de marchandises, le taux de remplissage pondéral rapporte la masse effectivement transportée à la charge utile maximale autorisée du véhicule. Un véhicule dont la charge utile est de 20 tonnes mais qui n’en transporte que 12 affiche ainsi un taux de remplissage de 60%, signifiant que 40% de sa capacité est mobilisée à vide. Cette sous-utilisation n’est pas anodine : elle implique que le carburant consommé, et les émissions qui en découlent, sont supportés par un volume de marchandises réduit, dégradant mécaniquement la performance environnementale de chaque livraison. À l’inverse, maximiser la charge transportée sur chaque tournée permet de répartir ces émissions sur un plus grand nombre de produits, réduisant ainsi l’empreinte carbone unitaire. L’objectif n’est donc pas seulement de réduire le nombre de trajets effectués, mais d’optimiser simultanément la charge embarquée sur chacun d’eux.

Influence du taux de remplissage sur les émissions de CO₂e

La Figure 2.5 détaille la démarche mathématique permettant d’établir la relation de proportionnalité inverse entre le taux de remplissage et les émissions spécifiques de CO₂e.

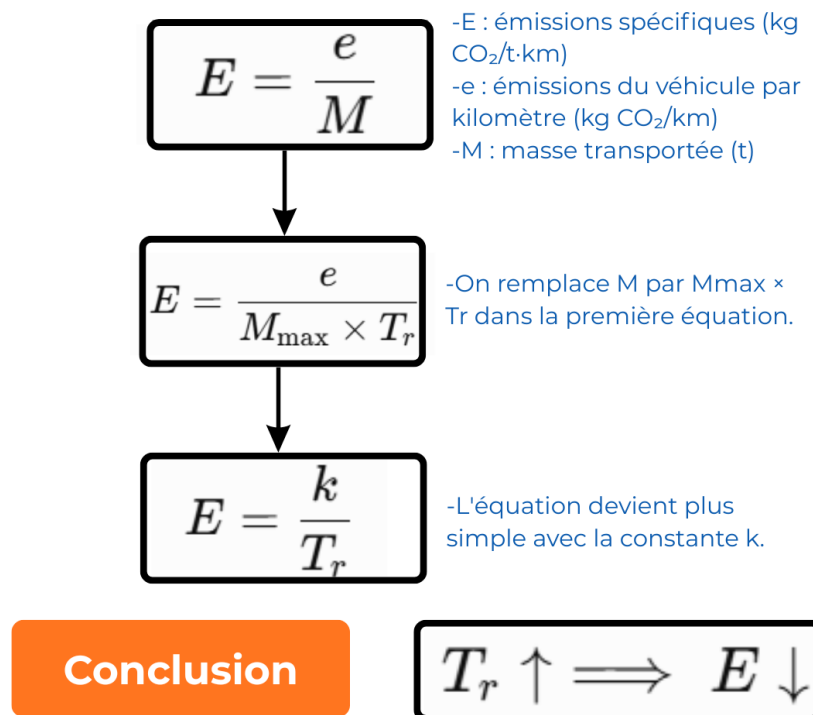


FIGURE 2.5 – Principe de dérivation des formules ADeme appliquées au calcul incrémental du CO₂e
- Source : auteurs, d’après ADeme 2012

Cette réalité prend une dimension particulière dans le transport aval, où les commandes sont souvent hétérogènes en volume et dispersées géographiquement. Une planification non structurée conduit naturellement à des tournées sous-chargées : faute de regroupement raisonné, des véhicules sont expédiés avec des charges partielles vers des destinations éloignées, tandis que des commandes voisines sont traitées séparément lors de rotations ultérieures. Le coût environnemental de cette fragmentation est direct et cumulatif : chaque rotation supplémentaire inutile s’ajoute aux précédentes pour former une empreinte carbone globalement disproportionnée par rapport au volume de marchandises effectivement livré.

C’est précisément ce que cherchent à formaliser les modèles de tournées de véhicules, connus sous l’acronyme VRP pour Vehicle Routing Problem. Introduits par Dantzig et Ramser dès 1959 [13], ces modèles visent à déterminer les itinéraires optimaux d’une flotte afin de desservir un ensemble de clients sous diverses contraintes opérationnelles : capacité des véhicules, fenêtres horaires de livraison, distances maximales ou priorités de traitement. Le critère à minimiser varie selon les contextes, qu’il s’agisse de la distance totale parcourue, du temps global, du coût logistique ou, de plus en plus, de l’empreinte carbone générée.



FIGURE 2.6 – Schéma illustrant les étapes du Vehicle Routing Problem

La complexité combinatoire de ces problèmes, qui appartiennent à la catégorie des problèmes NP-difficiles [17], a donné naissance à une large famille d’approches de résolution. Parmi les méthodes exactes figurent la programmation linéaire et le branch-and-bound, efficaces sur des instances de taille réduite. Pour des problèmes de grande dimension, on recourt davantage à des heuristiques et métaheuristiques, telles que l’algorithme de Clarke-Wright [15], le 2-opt, le recuit simulé ou les algorithmes génétiques, qui permettent d’obtenir des solutions de bonne qualité dans des délais raisonnables sans garantir l’optimalité stricte.

TABLE 2.4 – Explication des différentes méthodes connues d’optimisation
Source : auteurs.

Méthode	Principe en une phrase	Avantage	Limite
Méthode exacte	Explore l’espace des solutions de manière exhaustive ou structurée afin de garantir la meilleure solution possible.	Permet d’obtenir l’optimum.	Deviens rapidement trop coûteuse en temps de calcul pour les instances réelles.
Heuristique constructive	Construit rapidement une solution initiale du VRP à partir de règles simples de décision.	Rapide et facile à mettre en œuvre.	Ne garantit pas une solution optimale.
Clarke & Wright	Fusionne progressivement des tournées initiales en fonction des économies de distance réalisées.	Simple, efficace et très utilisée comme base de départ.	Peut produire une solution perfectible sans amélioration supplémentaire.
Algorithme de balayage	Trie les clients selon leur position angulaire autour du dépôt, puis forme les tournées par groupes compatibles.	Facile à comprendre et à implémenter.	Sensible à la position du dépôt et aux contraintes du problème.
Insertion séquentielle	Ajoute les clients un par un dans la tournée à l’endroit où le surcoût est minimal.	Souple et adaptable à plusieurs variantes du VRP.	Dépend fortement de l’ordre d’insertion choisi.
2-opt	Améliore une tournée en supprimant deux arêtes et en reconnectant différemment les clients pour réduire la distance totale.	Simple, rapide et très efficace pour optimiser une solution initiale.	Fournit seulement une amélioration locale.
Métaheuristique	Explore intelligemment plusieurs zones de l’espace de recherche pour améliorer la qualité des solutions.	Donne souvent de très bonnes solutions sur des problèmes complexes.	Plus lourde à paramétrer et plus coûteuse qu’une heuristique simple.

Dans le cas du transport aval, le regroupement des commandes constitue le premier levier d’optimisation. Il s’agit de consolider plusieurs commandes compatibles au sein d’une même tournée,

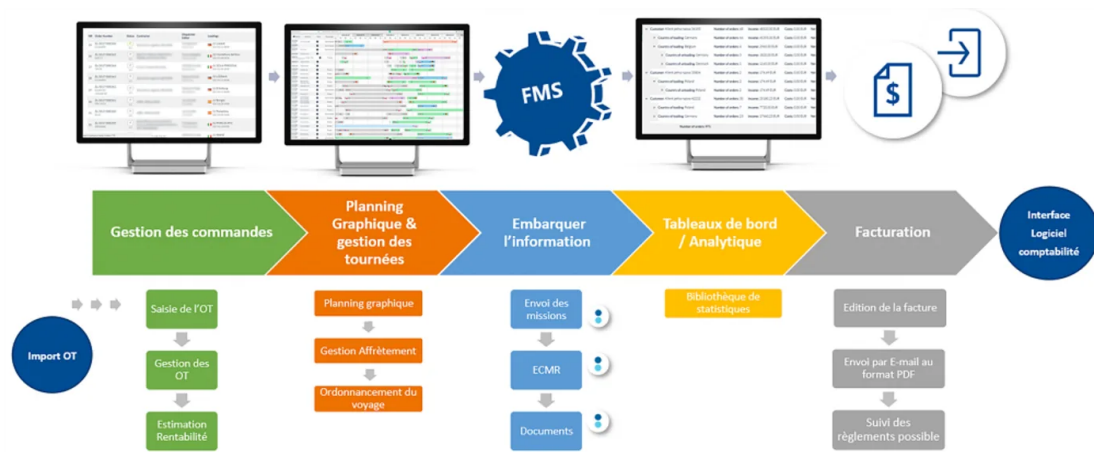
en tenant compte de leur proximité géographique, de leur date de livraison et du tonnage disponible sur le véhicule. Cette logique de consolidation permet de limiter les kilomètres parcourus à vide, d’augmenter le taux de remplissage pondéral et de mieux exploiter la flotte existante. Elle s’articule naturellement avec l’ordonnancement des destinations au sein de chaque tournée : l’ordre dans lequel les points de livraison sont visités influence directement la distance totale parcourue, et par extension les émissions générées — un constat qui rejoint directement la logique de la formule 6 vue en section 2.4.3 (le poids restant, donc l’intensité carbone, dépend de l’ordre des arrêts). Un ordonnancement sous-optimal, même sur une tournée bien chargée, peut annuler une partie des gains obtenus par le regroupement.

Au-delà de la performance opérationnelle immédiate, l’optimisation des tournées offre un avantage stratégique souvent sous-estimé : celui de la traçabilité et de la reproductibilité des décisions. Une planification algorithmique produit des résultats cohérents, justifiables et indépendants du jugement individuel, ce qui facilite l’analyse rétrospective des performances, l’identification des axes d’amélioration et l’intégration progressive de critères environnementaux dans les arbitrages logistiques quotidiens. Envisagée sous cet angle, l’optimisation du transport dépasse largement la simple réduction des coûts : elle devient un outil de pilotage environnemental, capable de réconcilier performance industrielle et objectifs de décarbonation dans une démarche cohérente et durable.

2.7 Digitalisation de la logistique

La digitalisation de la logistique représente aujourd’hui bien plus qu’une modernisation technique : elle redéfinit en profondeur la manière dont les flux physiques sont anticipés, coordonnés et pilotés. En permettant de collecter, traiter et exploiter en temps réel les données liées aux commandes, aux transports et aux stocks, les outils numériques apportent une réponse structurée aux limites des approches logistiques traditionnelles, souvent fragmentées et réactives. Cette transformation s’inscrit dans un mouvement plus large d’industrie 4.0, où la donnée devient une ressource stratégique au même titre que les actifs physiques, et où la capacité à décider vite et bien conditionne directement la compétitivité des organisations.

Au cœur de ces transformations se trouvent les systèmes de gestion du transport, communément désignés par l’acronyme TMS pour Transport Management System. Ces plateformes centralisent l’ensemble des opérations de transport : planification des expéditions, optimisation des itinéraires, affectation des véhicules, suivi des livraisons et automatisation des tâches administratives. En agrégeant les données de commandes et de capacité, un TMS facilite la consolidation des flux, améliore la visibilité opérationnelle et fournit aux décideurs des indicateurs de performance tels que le coût par tournée, le taux de remplissage ou le respect des délais.

FIGURE 2.7 – *Processus de fonctionnement d'un TMS*

Les plateformes de planification des commandes ont connu un essor considérable avec la montée en puissance des algorithmes d'optimisation et des capacités de calcul. Ces solutions regroupent les commandes selon des critères géographiques, temporels ou capacitaires, et proposent des tournées optimisées à partir de contraintes métier définies par l'utilisateur. Les plus avancées intègrent des fonctions de simulation, de géolocalisation, de calcul de charge et d'analyse prédictive, permettant d'anticiper les besoins de transport avant même que les commandes ne soient confirmées. Toutefois, une limite commune à beaucoup de ces solutions demeure leur orientation quasi exclusive vers la performance économique : la réduction des coûts et des délais prime encore largement sur la prise en compte des impacts environnementaux dans le processus de décision.

Les technologies de l'Internet des objets, ou IoT, viennent compléter ces plateformes en enrichissant la donnée disponible en temps réel. Des capteurs embarqués sur les véhicules permettent de remonter en continu des informations sur la position, la vitesse, la consommation de carburant ou encore l'état de la cargaison. Ces données, agrégées et analysées, offrent une visibilité inédite sur le déroulement effectif des tournées et permettent de détecter rapidement les écarts par rapport au plan initial. Dans une logique d'amélioration continue, elles alimentent également les modèles de planification future. Cette boucle entre exécution et planification constitue l'un des apports les plus significatifs de la digitalisation logistique, car elle permet de réduire progressivement l'écart entre le plan théorique et la réalité opérationnelle.

C'est précisément sur ce point que la digitalisation logistique ouvre des perspectives nouvelles en matière environnementale. En optimisant les tournées, en limitant les kilomètres parcourus à vide et en améliorant le taux de remplissage des véhicules, les outils numériques contribuent indirectement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mais au-delà de ces gains indirects, l'intégration de modules de calcul carbone directement dans les plateformes de planification marque une évolution qualitative importante : elle permet d'évaluer l'impact environnemental d'une décision avant son exécution, transformant ainsi la variable carbone en critère opérationnel à part entière plutôt qu'en indicateur de reporting a posteriori — c'est précisément l'ambition du chapitre 4 de ce mémoire.

La maturité croissante de ces outils s'accompagne néanmoins de défis réels. L'interopérabilité entre systèmes reste un obstacle fréquent : données de commandes, contraintes de flotte, référentiels géographiques et facteurs d'émission proviennent souvent de sources hétérogènes, dont l'intégration cohérente exige un travail de structuration important — un constat que vous avez d'ailleurs rencontré concrètement lors du nettoyage des données de TELA (chapitre 3). La qua-

lité de la donnée d’entrée conditionne directement la pertinence des résultats produits, ce qui place la gouvernance des données au rang des prérequis indispensables à toute démarche de digitalisation sérieuse. Par ailleurs, l’adoption de ces outils par les équipes opérationnelles suppose un accompagnement au changement, car la transition d’une planification intuitive vers une planification algorithmique implique une évolution des pratiques et des repères professionnels.

Dans cette perspective, la digitalisation ne saurait être réduite à un simple vecteur d’automatisation. Elle constitue un levier de transformation organisationnelle et environnementale, capable de traduire des engagements climatiques globaux en actions concrètes à l’échelle des opérations quotidiennes de transport, à condition que les outils déployés intègrent dès leur conception les enjeux de durabilité au même titre que les critères de performance économique.

2.8 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a posé les bases théoriques et méthodologiques sur lesquelles repose l’ensemble du projet. L’analyse des fondements du changement climatique a souligné l’importance du transport dans les émissions mondiales de GES. La présentation du GHG Protocol et de la méthode ADEME des données agrégées constitue le cadre de référence appliqué au chapitre 3. La revue des méthodes d’optimisation des tournées et des outils de digitalisation logistique prépare le terrain pour la conception de la plateforme du chapitre 4.

Chapitre 3

Bilan carbone du transport aval (Scope 3 - Catégorie 9)

3.1 Introduction

Ce chapitre constitue le cœur de la contribution empirique de ce projet. Il présente la démarche suivie pour évaluer l’empreinte carbone du transport aval de TotalEnergies Lubrifiants Algérie, depuis la collecte et le traitement des données brutes jusqu’à l’analyse des résultats et l’identification des leviers de réduction. Chaque étape s’appuie sur des choix méthodologiques documentés et justifiés au regard des référentiels du GHG Protocol (Scope 3, Catégorie 9) [4] et de l’ADEME [5].

3.2 Méthodologie adoptée

L’évaluation du bilan carbone du transport aval de TELA s’inscrit dans le cadre du GHG Protocol, Scope 3, catégorie 9, qui couvre les émissions indirectes liées au transport et à la distribution des produits vendus lorsque les véhicules mobilisés ne sont ni détenus ni contrôlés par l’entreprise [4]. Les formules ADEME retenues sont :

Formule 4 (générale) :

$$\text{Information CO}_2\text{e} = \text{Taux de consommation} \times \text{Distance} \times \text{FE} \times \left[\frac{\text{Unités transportées}}{\text{Unités totales véhicule}} \right]$$

Formule 5 - Donnée agrégée (kgCO₂e/t · km) :

$$\text{Donnée agrégée} = \frac{\text{Consommation (L/km)}}{\text{Capacité max. véhicule (t)}} \times \text{FE diesel (2,655 kgCO}_2\text{e/L)}$$

La table de correspondance consommation × capacité, cœur de l’étape 9, est structurée comme suit :

Listing 3.1. ajouterConsommation() + calculerDonneeAgregée() - DataProcessor.gs

```
const consommationTable = {
  "FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA": {
    1.5: 0.08, 2.5: 0.10, 3.5: 0.12,
    5: 0.16, 7: 0.19, 10: 0.22, 20: 0.38
  },
  "SARL GYK TRANS": {
    /* memes valeurs que Fleche Bleue */
    20: 0.38
  },
  "SARL BEJAIA LOGISTIQUE": {
    20: 0.32 // consommation inferieure (vehicule plus recent)
  }
};

const donneeAgregée = (conso / cmax) * 2.655;
```

Formule 6 - CO₂e par livraison (kgCO₂e) :

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{Donnée agrégée} \times \text{Poids restant sur le camion (t)} \times \text{Distance du segment (km)}$$

L'implémentation Apps Script de la Formule 6 est présentée ci-dessous — noter la mise à jour incrémentale de `poidsRestant` après chaque arrêt :

Listing 3.2. `calculerC02e()` — `DataProcessor.gs` (Formule 6 ADEME)

```
function calculerC02e() {
  for (let i = 1; i < lastRow; i++) {
    const colB = data[i][1];
    const colE = data[i][4];
    if (colB !== '' && colE === '') {
      donneeAgregree = data[i][11];
      poidsRestant = data[i][5];
    }
    if (colE !== '' && donneeAgregree > 0) {
      const C02e = donneeAgregree * poidsRestant * data[i][9];
      output[i - 1][0] = C02e;
      poidsRestant = Math.max(0, poidsRestant - data[i][8]);
    }
  }
}
```



FIGURE 3.1 – *Schéma méthodologique global du chapitre 3 : de la collecte des données au diagnostic carbone - Source : auteurs*

3.3 Traitement et préparation des données

Les données brutes étaient contenues dans deux fichiers Excel distincts (Livraison 2025 et Ke24), présentant des caractéristiques inhospitalières pour un traitement automatisé : lignes vides intercalées, codes dépôt non normalisés, villes de destination dans un ordre non cohérent avec l'ordre réel des tournées. Pour y remédier, un pipeline de traitement automatisé a été développé en Google Apps Script [18], composé de onze fonctions séquentielles accessibles depuis un menu personnalisé intégré dans Google Sheets.

Le menu personnalisé intégré dans Google Sheets permet à tout utilisateur de relancer l'intégralité du pipeline en un clic, sans accès à l'éditeur de code :

Listing 3.3. onOpen() - Menu DataProcessor.gs

```
function onOpen() {  
  SpreadsheetApp.getUi()  
    .createMenu('Traitement des donnees')  
    .addItem('Etape 1 - Nettoyer lignes', 'nettoyerLignesVides')  
    .addItem('Etape 4 - Trier villes', 'trierVillesParDepot')  
    .addItem('Etape 9 - Donnee agregée', 'calculerDonneeAgregée')  
    .addItem('Etape 10 - CO2e', 'calculerCO2e')  
    .addToUi();  
}
```

Le tableau 3.1 recense l'ensemble des variables mobilisées dans le calcul. On note que treize colonnes sont construites ou enrichies au cours du pipeline, depuis la colonne A (origine normalisée) jusqu'à la colonne M (CO₂e calculé). Chaque variable est directement reliée à une étape du traitement et à une composante de la formule de calcul.

TABLE 3.1 – Variables collectées, sources et rôle dans le calcul carbone
Source : auteurs, d'après les données TELA (2025).

Variable / Colonne	Description	Source	Usage dans le calcul
Pt org. du transport	Ville d'origine de la tournée (BLIDA ou ORAN)	Livraison 2025	Identification du dépôt d'expédition
N° du transport	Identifiant unique de chaque tournée camion	Livraison 2025	Clé de regroupement des livraisons
Groupe véhicule	Code du type de camion (converti en capacité max. en tonnes)	Livraison 2025	Calcul de la donnée agrégée (Cmax)
Fin réelle charg.	Date effective de départ du camion	Livraison 2025	Tri chronologique des tournées
N° livraison (BL)	Numéro de bon de livraison par client	Livraison 2025	Liaison avec les poids livrés
Poids net (F)	Masse totale chargée sur le camion (en tonnes)	Livraison 2025	Poids restant pour le calcul CO ₂ e
Nom prestataire	Transporteur (Flèche Bleue, GYK, Bejaia Log.)	Livraison 2025	Détermination du taux de consommation
Ville (destination)	Wilaya de livraison pour chaque arrêt	Livraison 2025	Calcul des segments de distance
Poids livré (I)	Masse délivrée à chaque client (en tonnes)	Feuille 2 (TE_Log)	Mise à jour du poids restant à chaque arrêt
Distance (J)	Distance inter-wilayas segment par segment (km)	Matrice des distances	Variable clé du calcul CO ₂ e
Consommation (K)	Taux de consommation spécifique (L/km)	Prestataires	Composante de la donnée agrégée
Donnée agrégée (L)	kgCO ₂ e/t.km - facteur d'émission ajusté	Calculée (étape 10)	Coefficient de conversion CO ₂ e par tournée
CO ₂ e (M)	Émissions calculées par livraison (kgCO ₂ e)	Calculée (étape 11)	Résultat final du bilan carbone

TABLE 3.2 – Étapes du pipeline de traitement automatisé (Google Apps Script)

Source : auteurs.

#	Fonction Apps Script	Opération réalisée
1	convertirDepot	Remplacement des codes dépôt (H032 → BLIDA, HB83 → ORAN)
2	reorganiserEtTrier	Sélection des 9 colonnes utiles et tri chronologique
3	trierLivraisons	Algorithme <i>Nearest Neighbor</i> : tri des villes par proximité depuis le dépôt
4	REEMPLIR_DISTANCES	Remplissage des distances segment par segment à partir de la matrice inter-wilayas
5	convertirGroupeVehicule	Conversion des codes véhicule (DZLUB20TN → 20 t, etc.)
6	ajouterColonneSommeQte	Sommation des quantités (kg) par bon de livraison
7	remplirPoidsDepuisFeuille2	Jointure par BL : transfert des poids de la Feuille 2 vers la Table 1
8	CONVERTIR_POIDS_EN_TONNES	Conversion des kilogrammes en tonnes (division par 1 000)
9	ajouterConsommation	Attribution du taux de consommation (L/km) selon le prestataire
10	calculerDonneeAgreguee	Application de la formule 5 : $(K/C) \times FE_{\text{diesel}}$ (2,655 kgCO ₂ e/L)
11	calculerCO2e	Calcul des émissions : Donnée agrégée × Poids restant × Distance, avec mise à jour incrémentale

Le tableau 3.2 détaille les onze étapes du pipeline dans leur ordre d'exécution logique. Deux étapes méritent une attention particulière en raison de leur complexité algorithmique.

3.3.1 Algorithme de tri des villes (nearest neighbor)

L'étape 3 reconstitue l'ordre réel de passage des villes au sein d'une tournée. L'algorithme nearest neighbor (plus proche voisin) sélectionne, depuis le dépôt d'origine, la ville la plus proche parmi celles non encore visitées, puis recommence depuis cette nouvelle position jusqu'à épuisement des destinations.

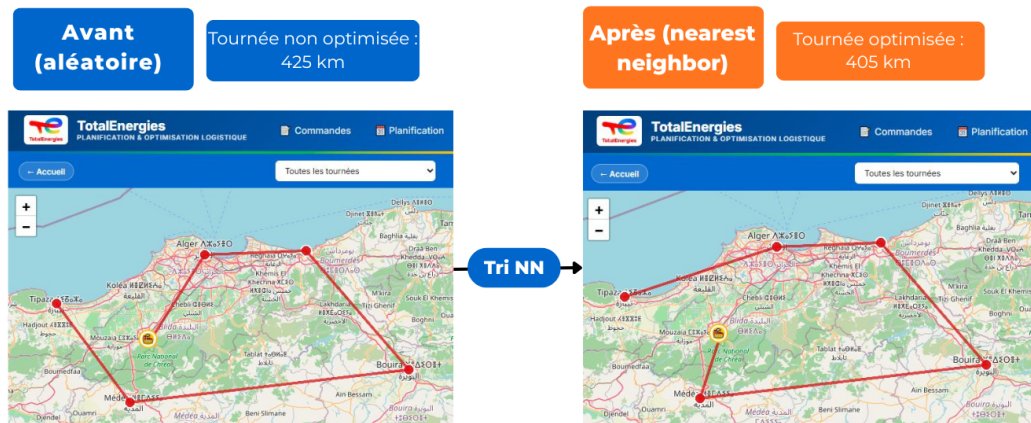


FIGURE 3.2 – Illustration de l'algorithme nearest neighbor : avant et après tri des villes d'une tournée
- Source : auteurs

Le code ci-dessous présente la logique centrale de cette fonction :

Listing 3.4. nearestNeighbor() - DataProcessor.gs

```
function nearestNeighbor(depot, villes) {
  const ordre = [];
  let courant = depot;
  while (villes.length > 0) {
    const prochaine = trouverVilleLaPlusProche(courant, villes);
    ordre.push(prochaine);
    courant = prochaine;
    villes = villes.filter(v => v !== prochaine);
  }
  return ordre;
}
```

3.3.2 Remplissage des distances (matrice inter-wilayas)

L'étape 4 exploite une matrice de distances couvrant les 48 wilayas algériennes. Un dictionnaire de corrections (`ultraNormaliser`) traite automatiquement les graphies multiples, abréviations et suffixes parasites présents dans les fichiers TELA.

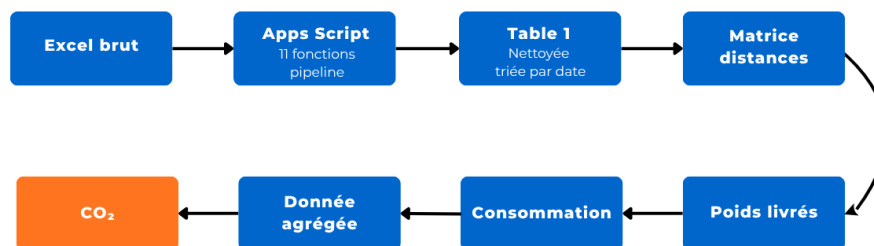


FIGURE 3.3 – Pipeline de traitement des données : du fichier Excel brut à la colonne CO_2e calculée
- Source : auteurs

L'extrait ci-dessous illustre la logique de normalisation appliquée à chaque nom de ville avant toute comparaison avec la matrice des distances :

Listing 3.5. `ultraNormaliser()` - `DataProcessor.gs`

```

function ultraNormaliser(valeur) {
  return valeur
    .toString()
    .normalize('NFD')
    .replace(/[\u0300-\u036f]/g, '')
    .toUpperCase()
    .trim();
}

```

3.4 Inventaire des données transport

L'inventaire des données de transport porte sur l'intégralité de l'année 2025, couvrant l'ensemble des tournées réalisées depuis les deux dépôts (Blida et Oran). Les données collectées incluent les bons de livraison, les tonnages associés, les wilayas de destination, les prestataires et les types de véhicules utilisés. La consolidation de ces informations dans le pipeline de traitement a permis de construire une base structurée, fondation du calcul carbone.

3.4.1 Structure de l'inventaire

Le tableau 3.4 présente un extrait représentatif de la structure de données obtenue après l'application complète du pipeline. Chaque bloc de lignes correspond à une tournée : la première ligne (fond coloré) porte les informations du camion (prestataire, capacité, date, poids net to-

tal), et les lignes suivantes correspondent aux arrêts clients successifs avec leur ville, poids livré, distance de segment et CO₂e associé.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
		N° du transport	Cmax	Fin réelle charg.	Livraison	Poids net (t)	Nom 1	Ville	Poids (t)	Distance (km)	Consommation (L/km)	Donnée agrégée (kgCO ₂ /L.km)	CO ₂ (kgCO ₂)
1													
2		BLIDA 300431728	10,0	6/1/2025		6,6536250000	FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA				0,22	0,05842	
3					3013113555	0,0000000000		GHARDAIA	3,3606000000	450			174,907
4					3013113556	0,0000000000		GHARDAIA	3,2930250000	0			0,000
5		BLIDA 300431710	10,0	6/1/2025		6,9973000000	FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA				0,22	0,05842	
6					3013113554	0,0000000000		BEJAIA	1,5786000000	250			102,190
7					3013113553	0,0000000000		JUEL	5,4187000000	115			36,402
8		BLIDA 300431708	7,0	6/1/2025		4,9011000000	FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA				0,19	0,07207	
9					3013113563	0,0000000000		SETIF	0,2721000000	300			105,970
10					3013113565	0,0000000000		SETIF	2,4508000000	0			0,000
11					3013113562	0,0000000000		SKIKDA	2,1782000000	185			29,043
12		BLIDA 300431573	3,5	6/1/2025		2,1048000000	FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA				0,12	0,09104	
13					3013113558	0,0000000000		ALGER	2,1048000000	45			8,623
14		BLIDA 300431570	3,5	6/1/2025		0,8317900000	FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA				0,12	0,09104	
15					3013113556	0,0000000000		Alger	0,8317900000	45			3,408
16		BLIDA 300431571	3,5	6/1/2025		1,4977900000	FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA				0,12	0,09104	
17					3013113557	0,0000000000		ALGER	1,3203900000	45			6,136
18					3013113558	0,0000000000		BOUMERDES	0,1774000000	50			0,808
19		BLIDA 300431673	20,0	6/1/2025		14,0320000000	FLECHE BLEU ALGERIENNE SPA				0,38	0,05045	
20					3013113559	0,0000000000		TIPAZA	14,0320000000	90			63,713
21		BLIDA 300431674	20,0	6/1/2025		14,0320000000	sarl bejaia logistique				0,32	0,04248	

FIGURE 3.4 – Extrait de la Table 1 après traitement complet du pipeline - Source : capture Google Sheets, données TELA 2025

La logique de déduction incrémentale du poids est visible dans la colonne I (poids livré) : pour chaque arrêt, le poids restant sur le camion est calculé en soustrayant le poids livré au client précédent. Cette mise à jour continue garantit que le CO₂e calculé pour chaque segment reflète la charge réelle du véhicule à ce moment précis de la tournée.

3.5 Résultats et analyse du bilan carbone

Le calcul des émissions constitue l'aboutissement du pipeline de traitement. Il s'appuie sur la formule 6 de l'ADEME, appliquée segment par segment pour chaque livraison identifiée dans la Table 1. La mise en œuvre de ce calcul passe par la construction intermédiaire de deux grandeurs : la consommation spécifique (colonne K) et la donnée agrégée (colonne L).

3.5.1 Consommation spécifique et donnée agrégée

La consommation spécifique (en L/km) est déterminée par un croisement entre le prestataire de transport (Flèche Bleue, GYK ou Bejaia Logistique) et la capacité maximale du camion en tonnes. Les valeurs sont issues d'une table de référence établie à partir des données opérationnelles transmises par les prestataires, dans la continuité des recommandations de l'ADEME pour le transport routier de marchandises [5]. Le tableau 3.3 récapitule l'ensemble des paramètres, facteurs d'émission et hypothèses retenus pour le calcul.

TABLE 3.3 – Paramètres, facteurs d’émission et hypothèses de calcul

Source : auteurs, d’après ADEME (2012) et données TELA.

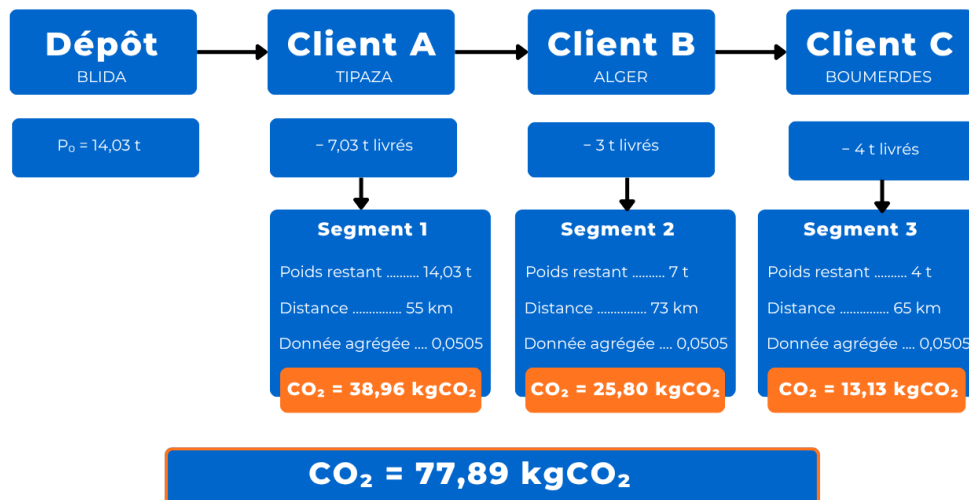
Paramètre	Valeur retenue	Source	Statut	Justification
FE brut diesel	3,18 kgCO ₂ e/kg diesel	TotalEnergies (interne)	Calculé	Conversion en kgCO ₂ e par kg de diesel consommé
Densité du diesel	0,835 kg/L	ADEME - Guide méthodo 2012	Standard	Conversion masse → volume
FE diesel volumique	2,655 kgCO ₂ e/L	Calculé	Calculé	Facteur appliqué dans la donnée agrégée
Conso. Flèche Bleue / GYK - 20 t	0,38 L/km	Prestataire	Référence	Camion lourd 20 t
Conso. Flèche Bleue - 10 t	0,22 L/km	Prestataire	Référence	Camion porteur 10 t
Conso. Flèche Bleue - 7 t	0,19 L/km	Prestataire	Référence	Camion porteur 7 t
Conso. Flèche Bleue - 5 t	0,16 L/km	Prestataire	Référence	Camion porteur 5 t
Conso. Bejaia Logistique - 20 t	0,32 L/km	Prestataire	Référence	Différence liée aux caractéristiques du parc
Conso. Bejaia Logistique - 10 t	0,22 L/km	Prestataire	Référence	Identique pour les porteurs 10 t
Mode de transport	Transport routier (TRM)	TELA - interne	Périmètre	Cohérent avec Scope 3 Cat. 9
Périmètre géographique	Territoire algérien - 48 wilayas	Matrice distances	Périmètre	Couvre l’ensemble du réseau TELA
Période d’étude	Janvier – Décembre 2025	Fichier Livraison 2025	Périmètre	Représentativité annuelle complète

La donnée agrégée est ensuite calculée selon la formule 5 de l’ADEME, en divisant la consommation spécifique par la capacité maximale du véhicule et en multipliant par le facteur d’émission volumique du diesel (2,655 kgCO₂e/L). Cette donnée, exprimée en kgCO₂e/t.km, constitue le coefficient d’émission ajusté propre à chaque couple prestataire-camion. Elle est stockée en colonne L de la Table 1.

3.5.2 Logique de calcul incrémentale

La fonction `calculerCO2e` (étape 11 du pipeline) parcourt l’ensemble des lignes de la Table 1 et applique la logique suivante : lorsqu’une ligne de type « camion » est détectée (colonne B non vide et colonne E vide), la donnée agrégée et le poids net sont initialisés. Pour chaque ligne de type « livraison » (colonne E non vide), le CO₂e est calculé en multipliant la donnée agrégée par le poids restant et par la distance du segment. Le poids restant est ensuite réduit du poids effectivement livré à ce client, avant de passer au segment suivant.

Cette logique présente un avantage méthodologique important : elle tient compte de la diminution progressive de la charge du camion au fil de la tournée. Ainsi, les premières livraisons — effectuées avec un camion plein — se voient attribuer des émissions supérieures à celles des dernières livraisons, où le camion est moins chargé. Cette granularité est plus réaliste que la simple répartition proportionnelle du CO₂e total sur l’ensemble des clients d’une tournée.

FIGURE 3.5 – Schéma de la logique de calcul incrémentale du CO₂e par tournée - Source : auteurs

3.6 Analyse des résultats

L'analyse des résultats du bilan carbone s'organise en quatre niveaux : une présentation des indicateurs globaux, une décomposition par dépôt et par prestataire, une analyse géographique par wilaya de destination, et une analyse temporelle de l'évolution mensuelle des émissions. L'ensemble de ces résultats est consolidé et visualisé dans le tableau de bord Power BI [19] développé dans le cadre de ce projet.

3.6.1 Indicateurs globaux

TABLE 3.4 – Résultats globaux du bilan carbone du transport aval TELA (2025)
Source : tableau de bord Power BI TELA.

Indicateur	Valeur absolue
CO ₂ e total	497,49 tCO ₂ e
Distance totale parcourue	894 000 km
Intensité carbone moyenne	0,55 kgCO ₂ e/km
Nombre de camions (tournées)	≈ 4 000
Nombre de livraisons (arrêts)	≈ 9 000
Taux de remplissage moyen	68,64 %
Dépôt Blida — CO ₂ e	398,75 tCO ₂ e
Dépôt Oran — CO ₂ e	98,74 tCO ₂ e

Le bilan carbone du transport aval de TELA pour l'année 2025 s'établit à 497,49 tCO₂e, pour un kilométrage total de 894 000 km parcourus par environ 4 000 camions effectuant près de 9 000 arrêts clients. L'intensité carbone moyenne ressort à 0,55 kgCO₂e/km, ce qui reflète la combinaison de camions à forte capacité (20 tonnes) sur des distances moyennes à longues, avec un taux de remplissage moyen de 68,64 %.

3.6.2 Répartition par dépôt et par prestataire

La décomposition par dépôt révèle une forte asymétrie : le dépôt de Blida concentre environ 80 % des émissions totales (398,75 tCO₂e), contre 20 % pour le dépôt d'Oran (98,74 tCO₂e). Cette répartition s'explique par la taille du réseau de clients desservis depuis Blida, qui couvre une zone géographique beaucoup plus étendue incluant les wilayas du sud (Ghardaïa, Ouargla), structurellement émettrices en raison des longues distances parcourues. La figure 3.6 illustre la répartition des émissions entre les deux dépôts.

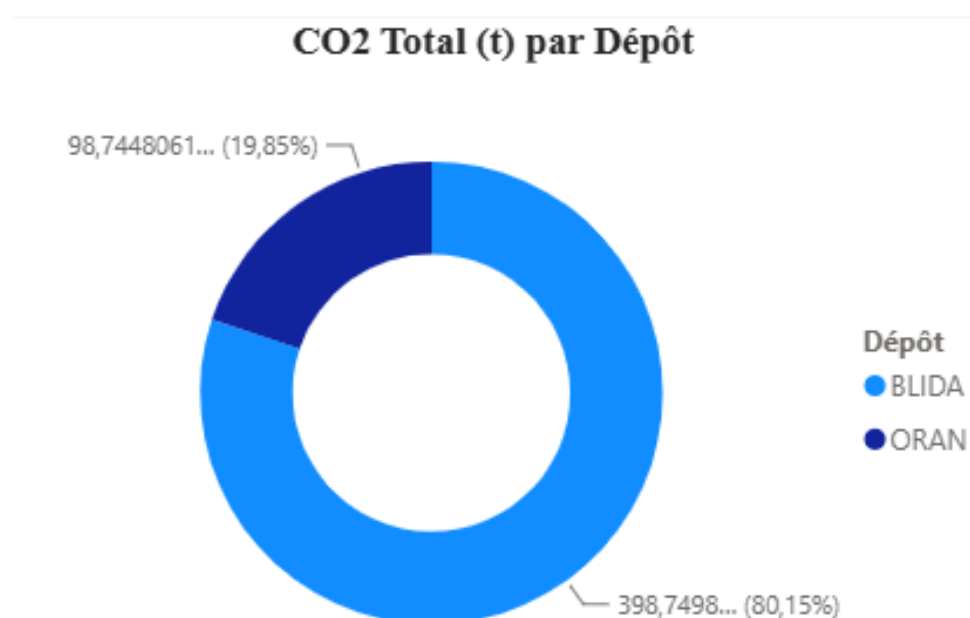


FIGURE 3.6 – CO₂e total (t) par dépôt - Diagramme en anneau - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs

La figure 3.7 retrace l'évolution mensuelle des émissions par prestataire sur l'année 2025.

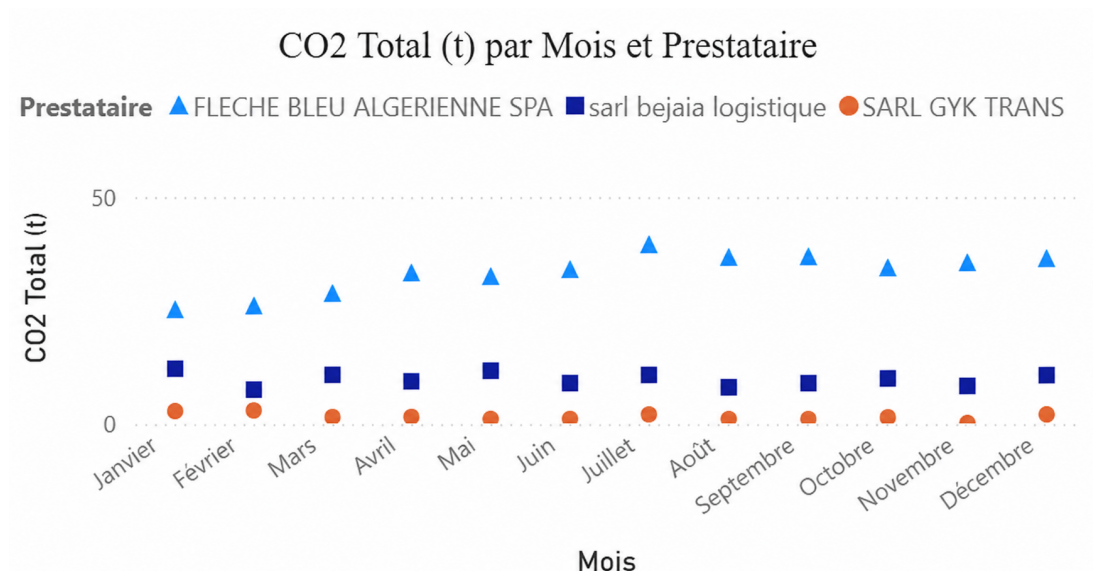


FIGURE 3.7 – Évolution mensuelle du CO_2e (kg) par prestataire - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs

L'analyse par prestataire montre que Flèche Bleue Algérienne SPA est le plus grand contributeur aux émissions, en cohérence avec son rôle de transporteur principal et sa flotte de camions 20 tonnes. La tendance mensuelle révèle une saisonnalité marquée, avec un pic d'émissions au second semestre (juillet-octobre), corrélé à l'augmentation de la demande commerciale observée sur cette période.

3.6.3 Analyse géographique : émissions par wilaya

Le graphique présente les dix wilayas les plus émettrices en CO_2e total, ce qui permet d'identifier deux logiques distinctes à l'œuvre dans la structure des émissions.

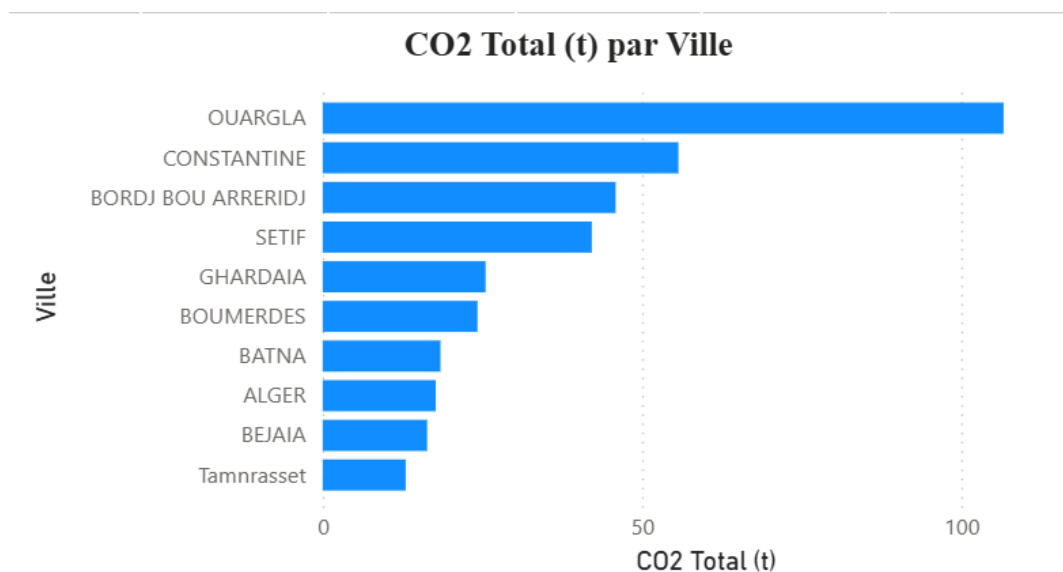


FIGURE 3.8 – CO_2e total (kg) par wilaya de destination - Graphique en barres horizontales - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs

D'après ce tableau de bord, Ouargla est la wilaya la plus émettrice de CO₂e (≈ 106 t), principalement en raison de son éloignement du dépôt de Blida. Constantine, Bordj Bou Arreridj et Sétif suivent, leurs émissions résultant à la fois de distances importantes et d'un volume élevé de livraisons. Les autres wilayas affichent des émissions plus modérées : pour les destinations proches, comme Alger et Boumerdès, celles-ci sont principalement liées à une forte fréquence de livraisons, tandis que pour les wilayas éloignées, elles sont davantage influencées par la distance parcourue. Ce tableau de bord met ainsi en évidence que les émissions de CO₂e dépendent principalement de deux facteurs : la distance de transport et le volume des livraisons, orientant les actions d'optimisation vers la consolidation des chargements et l'optimisation des tournées.

3.6.4 Analyse temporelle : évolution mensuelle des émissions

L'analyse mois par mois des émissions CO₂e révèle une dynamique saisonnière claire, avec des niveaux qui varient entre 53,75 t en février (mois le plus faible de l'année) et 74,71 t en juillet (pic annuel), soit un écart de près de 39 % entre les deux extrêmes.

TABLE 3.5 – Indicateurs mensuels du bilan carbone TELA (2025)

Source : tableau de bord Power BI TELA.

Mois	CO ₂ e (t)	Distance (km)	CO ₂ e/km	Nb camions	Nb livr.	Taux rempl. (%)
Janvier	55,34	74 000	0,75	317	749	68,75
Février	53,75	65 000	0,82	297	731	65,43
Mars	58,52	69 000	0,85	315	767	67,17
Avril	61,89	72 000	0,85	296	719	67,57
Mai	67,26	74 000	0,90	307	662	69,71
Juin	66,58	72 000	0,93	315	582	71,74
Juillet	74,71	88 000	0,85	355	737	67,91
Août	65,80	78 000	0,85	340	790	67,80
Septembre	63,00	76 000	0,87	340	744	69,17
Octobre	66,09	77 000	0,86	336	748	68,60
Novembre	61,64	70 000	0,88	309	653	69,81
Décembre	69,54	79 000	0,88	355	766	69,73

L'ensemble de ces analyses géographiques, temporelles et par prestataire a été centralisé dans un tableau de bord Power BI interactif, permettant de naviguer entre les différentes dimensions du bilan carbone en temps réel. La figure 3.9 présente ce tableau de bord dans sa globalité.

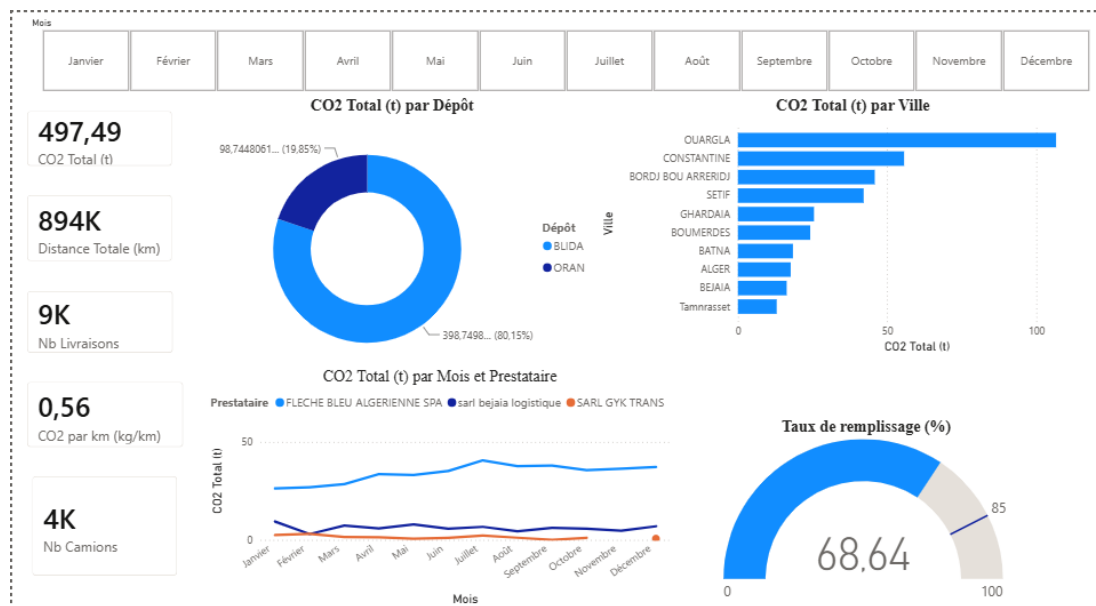


FIGURE 3.9 – Tableau de bord Power BI complet - Vue d'ensemble du bilan carbone TELA 2025 - Source : auteurs

3.7 Diagnostic et leviers de réduction

L'analyse des résultats du bilan carbone permet de formuler un diagnostic précis des sources d'inefficacité et d'identifier les leviers opérationnels les plus à même de réduire l'empreinte carbone du transport aval de TELA.

3.7.1 Diagnostic principal : le taux de remplissage comme levier central

Le taux de remplissage moyen de 69 % observé en 2025 constitue le principal indicateur de sous-optimisation logistique. À titre de comparaison, les standards sectoriels recommandés pour le transport routier de marchandises se situent entre 80 % et 90 % [9]. Un gain de 10 points de pourcentage sur ce taux permettrait théoriquement de livrer le même volume de produits avec environ 11 à 12 % de tournées en moins, ce qui se traduirait mécaniquement par une réduction proportionnelle des kilomètres parcourus et des émissions de CO₂e.

Ce constat est illustré par la Figure 3.10, qui présente le taux de remplissage moyen observé sur l'année 2025 par rapport à l'objectif cible de 85

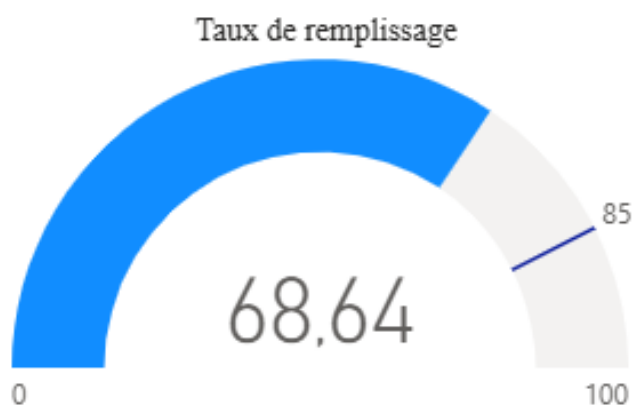


FIGURE 3.10 – *Taux de remplissage annuel 2025 - Graphique en gauge - Source : tableau de bord Power BI TELA 2025 - Source : auteurs*

3.7.2 Leviers identifiés

Tableau 3.6 - Synthèse des leviers de réduction des émissions CO₂e identifiés pour TELA - Source : auteurs

Levier identifié	Potentiel	Impact attendu	Mode d'activation
Optimisation des tournées (VRP)	Élevé	Réduction du kilométrage parcouru à chaque tournée	Algorithme 2-opt intégré dans la plateforme (Chap. 4)
Amélioration du taux de remplissage	Élevé	Passage de 69 % à 85 % → -18 % de CO ₂ e estimé	Regroupement des commandes par zone et par date
Consolidation des livraisons sahariennes	Moyen	Réduction des trajets longue distance à charge partielle	Ghardaïa, Ouargla : forte empreinte kilométrique
Passage à des camions de plus grande capacité	Moyen	Moins de trajets pour le même volume livré	Conditionné par la demande locale et l'accessibilité
Substitution partielle au bio-carburant	Faible-Moyen	Réduction du facteur d'émission diesel	Non encore disponible chez les prestataires TELA
Réduction des tournées sous-chargées (<50 %)	Élevé	Suppression des tournées à faible taux de remplissage	Identification dans le tableau de bord Power BI

Le tableau 3.6 synthétise les six principaux leviers de réduction identifiés à l'issue de l'analyse. Le levier à potentiel le plus élevé est l'optimisation combinée des tournées et du regroupement des commandes, qui constitue précisément l'objet du chapitre 4. La quantification du gain potentiel est estimée sur la base d'une simulation : en portant le taux de remplissage de 69 % à 85 %.

3.7.3 Limites de l'inventaire

Plusieurs limites méritent d'être signalées pour assurer la transparence de la démarche. Premièrement, les distances utilisées dans la matrice inter-wilayas sont des distances routières estimées et non des distances GPS réelles relevées pour chaque tournée. Cette approximation est courante dans les bilans carbone fondés sur des données agrégées [5], mais peut introduire des écarts pour les wilayas dont le réseau routier est peu direct. Deuxièmement, les taux de consommation des véhicules sont issus de tables de référence fournies par les prestataires et non de mesures télémétriques réelles, ce qui constitue une hypothèse simplificatrice inhérente à la méthode de niveau 2 de l'ADEME. Troisièmement, les poids livrés (colonne I) sont reconstitués à partir des

bons de livraison et non pesés en temps réel, ce qui peut générer de légères imprécisions pour les tournées avec retours de marchandises.

Ces limites sont inhérentes à toute démarche de bilan carbone fondée sur des données déclaratives et agrégées, et ne remettent pas en cause la fiabilité globale des résultats obtenus, qui constituent une première base de référence solide pour le pilotage environnemental de TELA.

3.8 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté la démarche complète d'évaluation du bilan carbone du transport aval de TELA pour l'année 2025. La méthode des données agrégées de l'ADEME, combinée au pipeline de traitement automatisé développé en Google Apps Script, permet une mesure rigoureuse, reproductible et opérationnellement pertinente des émissions de Scope 3, Catégorie 9. Les résultats établissent une baseline carbone quantifiée et identifient les principaux leviers de réduction, constituant le socle du chapitre suivant.

Chapitre 4

Conception et mise en œuvre de la
plateforme de planification logistique

4.1 Introduction

Ce chapitre présente la conception et la mise en œuvre de la plateforme de planification logistique développée pour TotalEnergies Algérie (TELA). Il s'articule autour de quatre axes complémentaires : l'expression des besoins issus de l'analyse du processus actuel, l'architecture technique de la solution, la formalisation et la justification de l'algorithme d'optimisation, puis la présentation détaillée de l'implémentation et des fonctionnalités clés.

La plateforme a été conçue pour répondre à un double enjeu opérationnel et stratégique : automatiser la constitution des tournées de livraison afin de maximiser le taux de remplissage des camions du transporteur Flèche Bleue Algérie, tout en préservant l'expertise humaine des planificateurs grâce à des mécanismes d'édition interactive. L'objectif n'est donc pas de remplacer la décision métier, mais de fournir une base de planification robuste, traçable et modifiable, capable de réduire le temps de traitement quotidien et d'améliorer l'utilisation de la flotte.

4.2 Expression des besoins

Cette section présente l'analyse du processus de planification actuellement en vigueur chez TELA, identifie les principales lacunes opérationnelles qui en découlent, et formalise le cahier des charges fonctionnel et non fonctionnel de la plateforme proposée.

4.2.1 Analyse du processus actuel

La planification quotidienne des livraisons de lubrifiants TotalEnergies en Algérie repose actuellement sur un processus essentiellement manuel, articulé autour d'outils bureautiques classiques, notamment la messagerie électronique et les tableurs Excel, ainsi que sur l'expertise individuelle des agents planificateurs. Le déroulement typique d'une journée peut être résumé comme suit :

- réception des commandes clients par les agents commerciaux, via téléphone, messagerie électronique ou portail interne, puis consolidation manuelle dans un fichier de travail ;
- tri et regroupement manuel des commandes par zone géographique, généralement la wilaya, en s'appuyant sur la connaissance terrain de l'agent ;
- affectation des regroupements à un camion du parc de transport, en estimant visuellement la charge et le respect des capacités véhicules ;
- communication des feuilles de route aux chauffeurs sous format papier ou par messagerie, sans système centralisé de suivi ;
- archivage manuel en fin de journée, sans constitution systématique d'un historique exploitable.

Ce processus, bien qu'éprouvé, présente plusieurs faiblesses structurelles qui limitent l'efficacité opérationnelle et la traçabilité des opérations logistiques. Le dépôt de Blida, principal centre de distribution de TELA, approvisionne 45 wilayas d'Algérie réparties en cinq régions logistiques : Centre, Ouest, Est, Extrême-Est et Sud. Cette couverture est assurée au moyen d'une flotte couvrant cinq gabarits de véhicules, soit 3,5 t, 5 t, 7 t, 10 t et 20 t. La combinaison entre nombre de commandes, destinations, contraintes clients et capacités véhicules rend la planification manuelle particulièrement sensible aux erreurs et difficile à optimiser globalement.

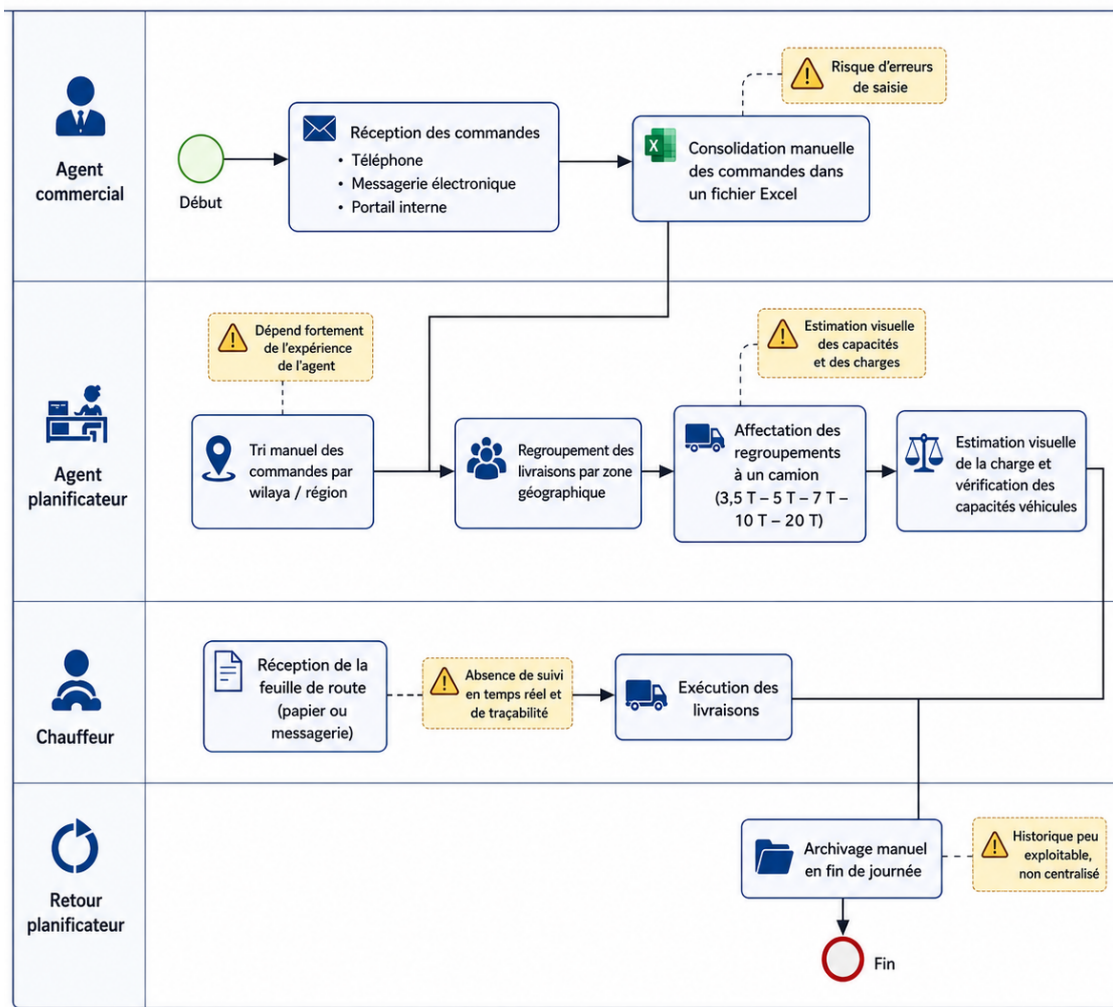


FIGURE 4.1 – Processus actuel de planification chez TELA - Source : auteurs

4.2.2 Lacunes identifiées

L'analyse approfondie du processus actuel, complétée par des entretiens menés avec les équipes de TELA, a permis d'identifier plusieurs catégories de lacunes opérationnelles. Le tableau 4.1 synthétise ces constats et leur impact métier.

TABLE 4.1 – Lacunes du processus actuel et impact opérationnel

Source : auteurs.

Lacune identifiée	Manifestation concrète	Impact opérationnel
Saisie manuelle	Re-saisie systématique des commandes dans un tableur	Risque d’erreurs de saisie et temps de traitement allongé
Absence de regroupement systématique	Décisions de groupage basées sur l’expérience individuelle, non reproductibles	Tournées sous-remplies, avec un taux de remplissage moyen estimé à 68,63 %
Pas d’optimisation des trajets	Ordre de visite des wilayas défini intuitivement	Distances parcourues supérieures à l’optimum atteignable
Règles métier implicites	Contraintes spécifiques, notamment les clients PL Interdit, appliquées de mémoire	Erreurs occasionnelles et non-conformités contractuelles
Absence d’historique automatique exploitable	Pas de capitalisation structurée des tournées passées	Pas de pilotage par indicateurs et pas de détection de tendances
Pas de traçabilité des actions	Aucun journal des modifications de planification	Imputabilité difficile en cas d’incident

4.2.3 Cahier des charges fonctionnel

À partir de l’analyse précédente, les besoins de la plateforme sont formalisés sous forme de besoins fonctionnels (BF) et de besoins non fonctionnels (BNF) numérotés. Cette numérotation permet d’assurer une traçabilité fine entre les exigences exprimées et les fonctionnalités effectivement livrées, détaillées en section 4.5.

TABLE 4.2 – Besoins fonctionnels de la plateforme

Source : auteurs.

Réf.	Besoin fonctionnel
BF-01	Saisir une commande avec validation automatique des références produits et clients depuis les référentiels existants.
BF-02	Détecter les doublons potentiels lors de la saisie et alerter l'utilisateur.
BF-03	Lancer une planification automatique générant des tournées optimisées sur le poids transporté.
BF-04	Subdiviser automatiquement les commandes dont le poids excède la capacité maximale d'un camion, soit 20 t.
BF-05	Appliquer la règle métier « Clients PL Interdit » : toute tournée contenant un client de cette catégorie doit utiliser un véhicule de capacité inférieure ou égale à 3,5 t.
BF-06	Permettre l'édition manuelle des tournées proposées : ajout ou retrait de commandes, changement de véhicule et réordonnancement des visites par glisser-déposer.
BF-07	Valider individuellement ou globalement les tournées et archiver les tournées validées dans un historique pérenne.
BF-08	Visualiser géographiquement les tournées proposées sur une carte.
BF-09	Afficher un tableau de bord avec les principaux indicateurs : commandes, tournées, distance, poids livré, évolution mensuelle, répartition par région et classements clients/wilayas.
BF-10	Filtrer le tableau de bord par mois, trimestre ou année, avec sélection précise de la période.
BF-11	Exporter l'historique des livraisons au format Excel pour intégration avec d'autres outils métier.

TABLE 4.3 – Besoins non fonctionnels de la plateforme

Source : auteurs.

Réf.	Besoin non fonctionnel
BNF-01	Accessibilité web : aucune installation client requise, accès via navigateur.
BNF-02	Performance : temps de planification inférieur à une minute pour un volume représentatif d'environ 100 commandes.
BNF-03	Robustesse : garantie de l'unicité des identifiants de tournées, même lorsque plusieurs utilisateurs accèdent simultanément au système.
BNF-04	Ergonomie : interface conforme à la charte visuelle TotalEnergies, notamment les couleurs, la typographie et la hiérarchie visuelle.
BNF-05	Tolérance aux erreurs : les données corrompues doivent être ignorées proprement plutôt que de provoquer l'échec complet de la plateforme.
BNF-06	Évolutivité : architecture modulaire facilitant l'ajout de nouvelles règles métier ou de nouveaux indicateurs.
BNF-07	Coût d'exploitation nul : appui exclusif sur l'écosystème Google Workspace déjà accessible à l'entreprise, sans infrastructure supplémentaire à provisionner ni à maintenir.
BNF-08	Traçabilité : toutes les actions utilisateurs sont enregistrées dans un journal d'audit horodaté avec identité de l'auteur.

4.3 Architecture de la solution

Cette section décrit l'architecture de la plateforme. Elle expose la vue d'ensemble du système en couches, détaille le rôle de chacune d'elles, présente les modules fonctionnels qui composent l'application, et justifie les choix technologiques effectués au regard des contraintes du projet.

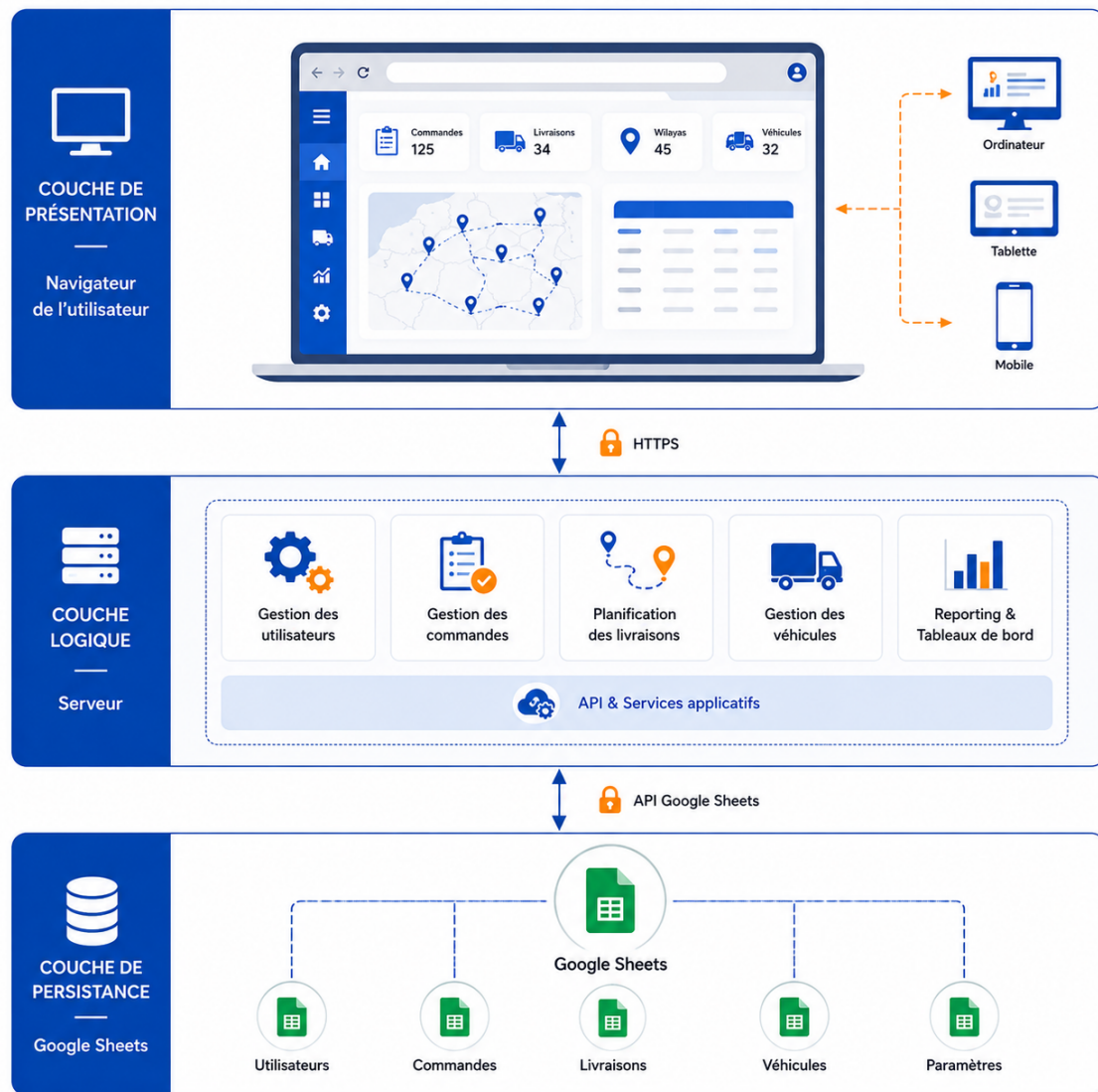


FIGURE 4.2 – Architecture de la solution - Source : auteurs

Le développement a été effectué sur Google Apps Script pour des raisons pratiques. Cet environnement permet de coder, tester et déployer une application web sans configuration de serveur, ce qui a considérablement raccourci la phase de mise en place et facilité les itérations successives. Il offre par ailleurs une intégration directe avec Google Sheets, facilement alimentable depuis les fichiers Excel déjà utilisés par l'entreprise, ainsi qu'un accès à l'application depuis n'importe quel navigateur sans installation préalable.

4.3.1 Description des couches

4.3.1.1 Couche de présentation

L'interface de l'application est organisée sous forme d'une page web unique dont le contenu se met à jour dynamiquement selon les actions de l'utilisateur, sans rechargement complet de la page. Ce fonctionnement permet une navigation fluide entre les différentes sections de l'outil sans interruption visuelle. L'application récupère les données nécessaires depuis la couche logique à la demande et affiche les résultats en temps réel. L'identité visuelle s'aligne sur la charte

graphique TotalEnergies, notamment par l'utilisation d'une palette de couleurs bleu, jaune et rouge, ainsi que de composants visuels personnalisés.

4.3.1.2 Couche logique métier

La couche logique regroupe l'ensemble des traitements et calculs effectués côté serveur. Elle est organisée en trois fichiers principaux :

- **Transport wilaya.gs** : contient l'algorithme de planification, le regroupement géographique, l'optimisation de l'ordre des visites, l'affectation des camions, les calculs de poids à partir des palettes et les fonctions d'initialisation des feuilles de référence ;
- **WebApp.gs** : assure la communication entre l'interface utilisateur et le serveur pour la saisie de commande, la planification, l'édition des tournées, la validation et la consultation du tableau de bord ;
- **Carte.gs** : fournit les données géographiques et la mise en correspondance entre les wilayas et les coordonnées GPS pour le rendu de la carte interactive.

La numérotation unique des tournées est gérée par un compteur centralisé qui garantit qu'aucun doublon d'identifiant ne peut survenir, même si plusieurs agents utilisent l'application simultanément.

4.3.1.3 Couche de persistance

La persistance des données est assurée par un classeur Google Sheets unique structuré en dix feuilles, organisées en trois catégories :

- feuilles transactionnelles : données opérationnelles du quotidien, modifiables en cours de journée ;
- feuilles référentielles : données stables de configuration, telles que les clients, produits, distances et régions ;
- feuilles en mode journal cumulatif : feuilles auxquelles on ajoute des lignes sans écraser les données existantes, afin de garantir l'intégrité de l'historique.

TABLE 4.4 – Structure des feuilles de persistance

Source : auteurs.

Feuille	Type	Contenu / rôle
Commandes	Transactionnelle	Catalogue des commandes saisies avec statut En attente, Planifiée, Annulée ou Supprimée.
Planification	Tableau de travail	Tournées proposées et validées de la session courante ; cette feuille peut être réécrite entre deux sessions.
Historique Livraisons	Journal cumulatif	Archive pérenne des tournées validées ; les données ne sont jamais écrasées, seuls des ajouts sont effectués.
Logs	Journal cumulatif	Journal d’audit horodaté des actions utilisateur ; les entrées s’accumulent sans modification des lignes existantes.
REF Clients	Référentiel	Liste des clients avec matricule, raison sociale et wilaya.
REF Produits	Référentiel	Liste des produits avec masse par palette et nombre d’items par palette.
Distances Wilayas	Référentiel	Matrice de distances inter-wilayas utilisée par l’optimisation 2-opt.
Régions	Référentiel	Correspondance wilaya-région logistique : Centre, Ouest, Est, Extrême-Est et Sud.
Clients PL Interdit	Référentiel	Liste des clients soumis à la contrainte de capacité inférieure ou égale à 3,5 t.
Paramètres	Configuration	Paramètres globaux, notamment dépôt, seuils et options d’exécution.

4.3.2 Modules fonctionnels

L’application est organisée en trois modules principaux accessibles depuis le menu d’accueil. Chaque module correspond à une responsabilité métier distincte.

TABLE 4.5 – Modules fonctionnels de la plateforme

Source : auteurs.

Module	Responsabilité métier et fonctionnalités
Planificateur	Saisie et gestion des commandes, lancement de la planification automatique, édition manuelle des tournées proposées, validation individuelle ou globale, et visualisation cartographique des tournées.
Tableau de bord	Suivi des indicateurs de performance avec sélection de période et visualisations graphiques.
Logs d’audit	Traçabilité complète de toutes les actions effectuées dans l’application, avec filtrage par type d’action, période et utilisateur.

4.3.3 Choix technologiques

Chaque choix technologique structurant a fait l’objet d’une évaluation au regard de plusieurs critères : adéquation au besoin, simplicité d’intégration, maturité, coût et performance. Le tableau 4.6 récapitule les principaux choix retenus.

TABLE 4.6 – Choix technologiques et justifications

Source : auteurs.

Technologie	Rôle	Justification	Alternatives écartées
Google Apps Script	Moteur côté serveur	Déploiement sans configuration serveur, intégration directe avec Sheets et accès via navigateur.	Node.js avec API Sheets ; Python Flask.
Google Sheets	Persistance	Édition manuelle possible, partage natif et sauvegarde automatique.	Solutions moins accessibles pour une phase initiale.
HTML / CSS / JavaScript	Interface utilisateur	Compatibilité directe avec l’environnement Apps Script, sans chaîne de compilation complexe.	Frameworks nécessitant une compilation.
Chart.js	Graphiques	Bibliothèque éprouvée, légère et simple à intégrer.	Solutions plus complexes.
Leaflet	Cartographie	Solution gratuite, sans inscription ni clé d’API requise.	Google Maps, nécessitant une clé d’API.
SortableJS	Glisser-déposer	Bibliothèque légère, simple à intégrer et compatible avec les appareils mobiles.	Solutions plus lourdes ou moins abouties.
SheetJS	Export Excel	Compatible avec l’exécution côté navigateur et les formats Excel.	Génération côté serveur plus complexe.

4.4 Algorithme de planification et optimisation du taux de remplissage

Cette section constitue le cœur scientifique du chapitre. Elle formalise mathématiquement le problème d’optimisation à résoudre, justifie le choix de l’heuristique retenue, détaille chacune des quatre phases de l’algorithme par un pseudocode rigoureux, présente l’intégration des règles métier spécifiques, et conclut par les résultats de validation expérimentale.

4.4.1 Contraintes non modélisées et périmètre du système

Plusieurs contraintes propres aux conditions réelles de conduite ont été volontairement écartées du périmètre de modélisation, en raison de leur caractère hautement variable et difficilement prévisible :

- les horaires de départ des véhicules, susceptibles de varier selon la disponibilité des chauffeurs et les aléas de chargement ;
- les temps d’arrêt à chaque point de livraison, qui dépendent du type de colis, de l’accessibilité du lieu et du comportement du destinataire ;
- les conditions de circulation, notamment les embouteillages, travaux et restrictions temporaires ;
- les pauses réglementaires imposées aux chauffeurs selon la durée de conduite ;
- les contraintes météorologiques pouvant affecter la vitesse de déplacement ou l’accessibilité de certaines zones.

Ces facteurs relèvent d’une couche opérationnelle dynamique qui nécessiterait l’intégration de données temps réel, telles que des données GPS ou des API de trafic, et dépasse le cadre de ce travail. Les distances utilisées dans le modèle sont des distances géographiques brutes entre les points de livraison, telles que communiquées par TELA. Cette simplification constitue une limite reconnue du système, et son dépassement est envisagé comme perspective d’amélioration future.

4.4.2 Formulation du problème

Le problème de planification adressé est une variante du *Vehicle Routing Problem with Capacity constraints* (CVRP), enrichie de contraintes métier spécifiques au contexte TELA. Il s’inscrit dans le cadre général de l’optimisation sous contraintes, où l’objectif est de maximiser ou minimiser une fonction objective soumise à un ensemble de contraintes portant sur les variables de décision.

Dans notre cas, les variables de décision sont de deux natures. D’une part, des variables d’affectation binaires $x_{ij} \in \{0, 1\}$ indiquent si la commande c_i est affectée ou non à la tournée T_j . D’autre part, des variables d’ordre σ_j représentent la séquence de visite des wilayas au sein de chaque tournée.

On reconnaît trois types de contraintes :

- contraintes d’égalité : chaque commande doit être affectée à exactement une tournée ;

- contraintes d'inégalité : la capacité de chaque véhicule ne doit pas être dépassée, et la règle PL Interdit impose un plafond de 3,5 t lorsque la tournée contient un client restreint ;
- contraintes bornées : les variables binaires x_{ij} sont naturellement bornées entre 0 et 1, ce qui définit un espace de décision fini.

4.4.2.1 Données du problème

- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$: ensemble des commandes à livrer sur la journée ;
- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$: ensemble des véhicules disponibles, chacun de capacité $Q(v_j)$ exprimée en tonnes ;
- D : dépôt unique, situé à Blida ;
- W : ensemble des 45 wilayas couvertes ;
- $d : W \times W \rightarrow \mathbb{R}^+$: matrice des distances inter-wilayas ;
- $p(c_i)$: poids de la commande c_i en tonnes ;
- $w(c_i)$: wilaya de destination de la commande c_i ;
- $client(c_i)$: client associé à la commande c_i ;
- $R \subset C$: sous-ensemble des commandes appartenant à des clients « PL Interdit ».

4.4.2.2 Variables de décision

- $x_{ij} \in \{0, 1\}$: la commande c_i est-elle affectée à la tournée T_j ?
- σ_j : permutation des wilayas visitées par la tournée T_j .

4.4.2.3 Contraintes

1. Affectation unique :

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (4.1)$$

2. Capacité véhicule :

$$\sum_i p(c_i) x_{ij} \leq Q(v_j), \quad \forall j \quad (4.2)$$

3. Règle PL Interdit :

$$\exists c_i \in R \text{ tel que } x_{ij} = 1 \Rightarrow Q(v_j) \leq 3,5 \quad (4.3)$$

4. Atomicité client-wilaya : les commandes d'un même client vers une même wilaya sont affectées à la même tournée, quel que soit le produit commandé.
5. Cohérence régionale : une tournée est entièrement contenue dans une même région logistique, à l'exception des tournées Sud qui peuvent agglomérer plusieurs régions selon les seuils.

4.4.2.4 Fonction objectif

L'objectif principal est de maximiser le taux de remplissage moyen pondéré des tournées, en privilégiant un usage efficient de la capacité de la flotte :

$$\max \tau = \frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} \frac{\sum_i p(c_i) x_{ij}}{Q(v_j)} \quad (4.4)$$

La distance totale parcourue intervient comme objectif secondaire : pour un ensemble donné de tournées maximisant τ , l'ordre de visite des wilayas est optimisé via 2-opt afin de minimiser la distance individuelle de chaque tournée.

4.4.3 Complexité et choix de l'approche heuristique

Le CVRP est un problème NP-difficile. La résolution exacte, par exemple via une approche de type *Branch-and-Cut*, devient rapidement impraticable au-delà de quelques dizaines de commandes. Pour un volume représentatif de l'usage TELA, compris entre 50 et 200 commandes quotidiennes, un temps de résolution exact se chiffrerait en heures, ce qui contrevient explicitement au besoin non fonctionnel BNF-02.

Trois grandes familles d'heuristiques étaient candidates :

- heuristiques constructives gloutonnes, telles que Clarke-Wright Savings ou Sweep : rapides, mais sensibles à la qualité du tri initial et difficiles à enrichir de contraintes métier complexes ;
- métaheuristiques, telles que le recuit simulé, les algorithmes génétiques ou la recherche tabou : capables de produire des solutions de très bonne qualité, mais nécessitant un calibrage fin et un temps d'exécution plus significatif ;
- approches hybrides en deux phases, de type *Cluster-First / Route-Second* : elles décomposent le problème en un sous-problème de regroupement puis un sous-problème d'optimisation de trajet par groupe, ce qui facilite l'intégration de contraintes métier dans la phase de regroupement.

L'approche *Cluster-First / Route-Second* a été retenue pour trois raisons principales. Premièrement, elle est lisible métier : elle reflète la logique des planificateurs humains qui regroupent d'abord les commandes par zone géographique avant d'organiser l'ordre de visite. Deuxièmement, elle est adaptable aux contraintes spécifiques telles que la règle PL Interdit ou le regroupement client-wilaya. Troisièmement, elle offre une performance suffisante pour respecter le seuil d'une minute sur les volumes opérationnels nominaux.

4.4.4 Vue d'ensemble : Cluster-First / Route-Second

La première grande étape de l'algorithme est un clustering des commandes, c'est-à-dire un regroupement automatique des points de livraison en ensembles cohérents. Les commandes à destination d'une même région logistique, puis d'une même wilaya, sont rassemblées avant d'être affectées à un même camion. Contrairement à un clustering statistique classique, comme l'algorithme *k-means*, notre approche utilise une logique déterministe fondée sur des critères métier : wilaya de destination, appartenance à une région logistique et règles de compatibilité. Cette approche garantit que les groupes formés restent interprétables et auditables par les équipes opérationnelles.

Une fois les tournées constituées, l'ordre de visite des wilayas au sein de chaque tournée est optimisé par l'algorithme 2-opt. Il s'agit d'une méthode d'amélioration locale : à partir d'un

trajet initial, l'algorithme cherche à supprimer les croisements inutiles en inversant des sous-séquences de visites. Pour une tournée à quatre wilayas, si le trajet $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ présente un croisement géographique, l'algorithme teste par exemple $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$ et conserve cette inversion si elle réduit la distance totale.

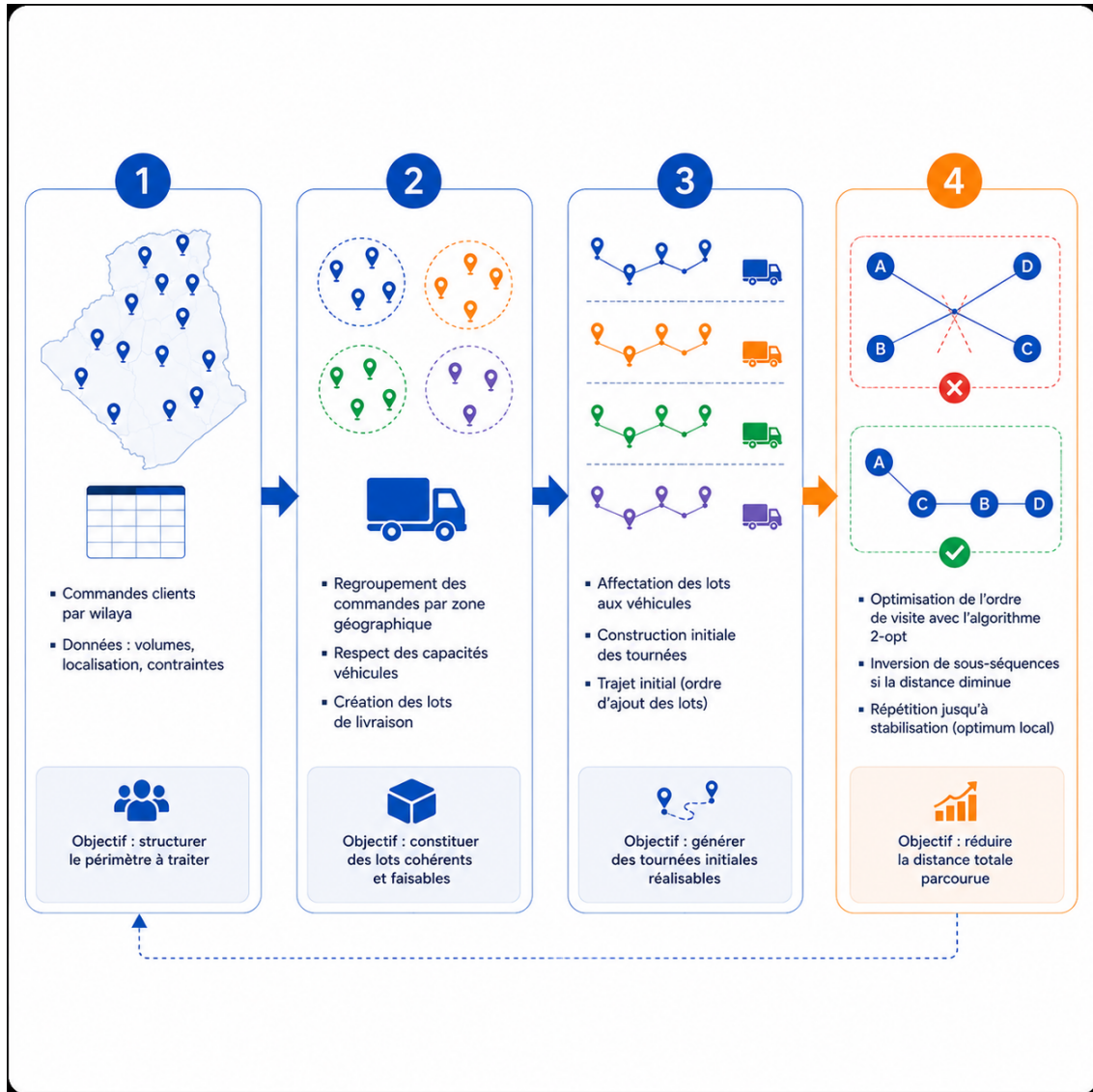


FIGURE 4.3 – Vue d'ensemble de l'algorithme de planification - Source : auteurs

L'algorithme se déroule en quatre phases séquentielles : subdivision des commandes lourdes, constitution des lots clients, construction des tournées et optimisation 2-opt. Les sections suivantes détaillent chacune de ces phases.

4.4.5 Phase 1 – Subdivision des commandes lourdes

Une commande individuelle peut avoir un poids supérieur à la capacité du plus grand véhicule disponible, soit 20 t. Dans ce cas, elle doit obligatoirement être subdivisée en plusieurs sous-commandes acheminées par plusieurs camions. Cette phase de pré-traitement garantit qu'aucune commande résiduelle ne dépasse une borne de capacité.

Pseudocode 4.1. Subdivision des commandes lourdes

```
Algorithme : splitHeavyOrders
Entree  : C = {commandes}, maxCap = 20 t
Sortie  : C' = {commandes eventuellement subdivisees}

C' <- ensemble vide
Pour chaque commande c de C faire
  Si poids(c) <= maxCap alors
    Ajouter c a C'
  Sinon
    nbFull <- plancher(poids(c) / maxCap)
    poidsRest <- poids(c) - nbFull * maxCap
    Pour k de 1 a nbFull faire
      Ajouter sousCommande(c, k, maxCap) a C'
    Fin pour
    Si poidsRest > 0 alors
      Ajouter sousCommande(c, nbFull + 1, poidsRest) a C'
    Fin si
  Fin si
Fin pour
Retourner C'
```

Listing 4.1. Logique d'exécution de la fonction `splitHeavyOrders()`

```

SplitHeavyOrders

function splitHeavyOrders(orders, trucks) {
  var maxCapNormal = trucks[0].capacityTN;
  // Capacité du plus petit camion (3.5T typiquement) pour les clients à accès PL interdit
  var smallCap = trucks.reduce(function(min, t) {
    return Math.min(min, t.capacityTN);
  }, Infinity);
  var result = [];

  orders.forEach(function(o) {
    // Si client à accès PL interdit, on impose le cap du petit camion (3.5T)
    var maxCap = o.isSmallTruckOnly ? smallCap : maxCapNormal;

    if (o.poids_t <= maxCap) {
      result.push(o);
      return;
    }

    // Combien de camions pleins ?
    var nbFull = Math.floor(o.poids_t / maxCap);
    var remW = o.poids_t - nbFull * maxCap;

    // Cas spécial : pile pleine sans reste
    if (remW <= 0.001) {
      var palPerPart = Math.round(o.palettes / nbFull);
      var qtyPerPart = Math.round(o.qty / nbFull);
      for (var k = 0; k < nbFull; k++) {
        result.push(buildSubOrder(o, k, nbFull, maxCap, palPerPart, qtyPerPart, true));
      }
      return;
    }

    // Cas général : nbFull camions pleins + 1 reste
    // Répartition proportionnelle des palettes et quantité
    var palFull = Math.round(o.palettes * (maxCap / o.poids_t));
    var qtyFull = Math.round(o.qty * (maxCap / o.poids_t));
    var palRem = o.palettes - palFull * nbFull;
    var qtyRem = o.qty - qtyFull * nbFull;

    for (var k = 0; k < nbFull; k++) {
      result.push(buildSubOrder(o, k, nbFull + 1, maxCap, palFull, qtyFull, true));
    }
    // Sous-commande reste (recombinable)
    result.push(buildSubOrder(o, nbFull, nbFull + 1, remW, palRem, qtyRem, false));
  });

  return result;
}

```

La fonction `createSubOrder` génère une sous-commande dérivée de la commande initiale, identifiée par un suffixe, portant un poids donné et un nombre de palettes proportionnel. Le numéro original de la commande est préservé pour la traçabilité, ce qui permet à un agent de retrouver la commande d'origine dans l'historique.

4.4.6 Phase 2 – Constitution des lots

La phase 2 regroupe les commandes d'un même client vers une même wilaya en un seul lot, quel que soit le produit commandé. Ce regroupement est justifié par une logique opérationnelle

simple : un chauffeur ne doit jamais effectuer deux passages distincts chez le même client dans la même wilaya lors d’une même tournée. Chaque lot ainsi constitué est traité comme une unité indivisible lors de la construction des tournées.

Pseudocode 4.2. Constitution des lots clients

```

Algorithme : buildClientLots
Entree   : C' = {commandes subdivisees}
Sortie   : L = {lots}

M <- table vide
Pour chaque commande c de C' faire
    cle <- (client(c), wilaya(c))
    Si M[cle] n'existe pas alors
        M[cle] <- nouveau lot associe a (client, wilaya)
    Fin si
    Ajouter c a M[cle]
    M[cle].poidsTotal <- M[cle].poidsTotal + poids(c)
Fin pour

L <- ensemble vide
Pour chaque lot l de M faire
    Si poids(l) > maxCap alors
        Ajouter splitHeavyLot(l) a L
    Sinon
        Ajouter l a L
    Fin si
Fin pour
Retourner L

```

Listing 4.2. Logique d’exécution de la fonction buildClientLots()

```

BuildClientLots

function buildClientLots(orders) {
  var byKey = {};
  orders.forEach(function(o) {
    // wilayaKey présent = commande issue d'un split isolé → lot dédié
    // sinon, on regroupe par (wilaya, matricule client)
    var key = o.wilayaKey || (o.wilaya + '|' + o.matricule);
    if (!byKey[key]) {
      byKey[key] = {
        wilaya      : o.wilaya,
        matricule    : o.matricule,
        client       : o.client,
        orders       : [],
        weight       : 0,
        palettes     : 0,
        isolated     : !!o.wilayaKey,
        isSmallTruckOnly : false
      };
    }
    byKey[key].orders.push(o);
    byKey[key].weight += o.poids_t;
    byKey[key].palettes += o.palettes;
    // Si AU MOINS une commande du lot est restreinte → tout le lot est restreint
    if (o.isSmallTruckOnly) byKey[key].isSmallTruckOnly = true;
  });
  return Object.keys(byKey).map(function(k) {
    byKey[k].weight = Math.round(byKey[k].weight * 100000) / 100000;
    return byKey[k];
  });
}

```

Un lot dont le poids total excède la capacité maximale d'un véhicule est lui-même subdivisé. Ses commandes sont triées par taille décroissante, puis groupées dans des sous-lots de poids inférieur ou égal à la capacité maximale, selon une stratégie *First-Fit Decreasing*.

4.4.7 Phase 3 – Construction des tournées

La phase 3 affecte les lots aux véhicules disponibles selon une stratégie *Best-Fit Decreasing* enrichie de logiques métier. Les lots sont d'abord regroupés par région logistique, puis traités région par région.

Pseudocode 4.3. Construction des tournées par région

```

Algorithme : buildTournées
Entree   : L = {lots}, V = {véhicules}
Sortie   : T = {tournées}

T <- ensemble vide
Pour chaque region r de Regions faire
  Lr <- lots de L dont la wilaya appartient a r
  Trier Lr par poids décroissant
  Tant que Lr n'est pas vide faire

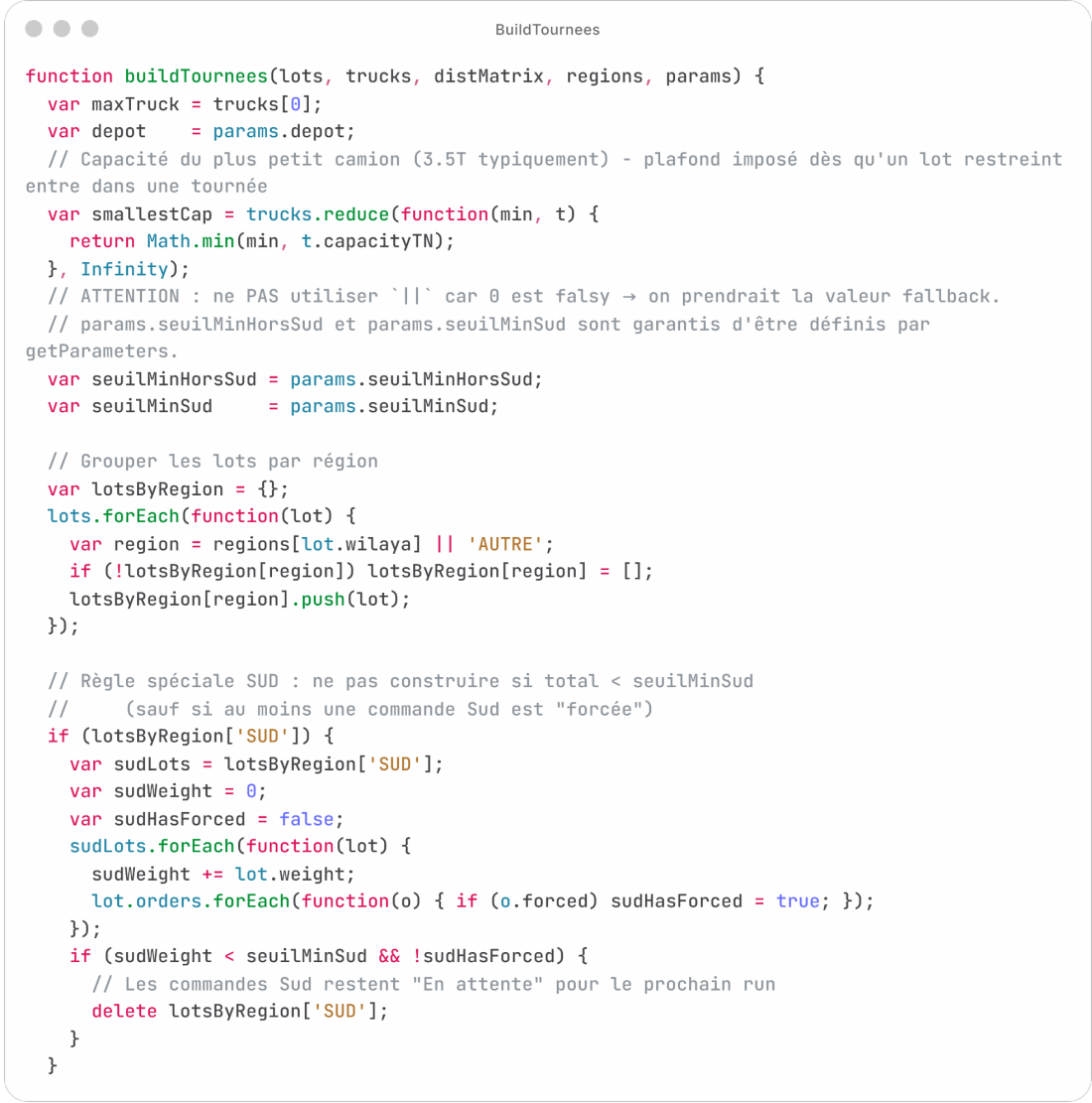
```

```

l <- lot le plus lourd de Lr
v <- findBestTruck(l, V)
tau <- nouvelle tournée avec vehicule v et lot initial l
Retirer l de Lr
Tant qu'il existe un lot compatible avec tau faire
  l' <- findNearestFittingLot(tau, Lr)
  Ajouter l' a tau
  Retirer l' de Lr
Fin tant que
Ajouter tau a T
Fin tant que
Fin pour
Retourner T

```

Listing 4.3. Logique d'exécution de la fonction `buildTournees()`



```

function buildTournees(lots, trucks, distMatrix, regions, params) {
  var maxTruck = trucks[0];
  var depot = params.depot;
  // Capacité du plus petit camion (3.5T typiquement) - plafond imposé dès qu'un lot restreint
  // entre dans une tournée
  var smallestCap = trucks.reduce(function(min, t) {
    return Math.min(min, t.capacityTN);
  }, Infinity);
  // ATTENTION : ne PAS utiliser `||` car 0 est falsy → on prendrait la valeur fallback.
  // params.seuilMinHorsSud et params.seuilMinSud sont garantis d'être définis par
  // getParameters.
  var seuilMinHorsSud = params.seuilMinHorsSud;
  var seuilMinSud = params.seuilMinSud;

  // Grouper les lots par région
  var lotsByRegion = {};
  lots.forEach(function(lot) {
    var region = regions[lot.wilaya] || 'AUTRE';
    if (!lotsByRegion[region]) lotsByRegion[region] = [];
    lotsByRegion[region].push(lot);
  });

  // Règle spéciale SUD : ne pas construire si total < seuilMinSud
  // (sauf si au moins une commande Sud est "forcée")
  if (lotsByRegion['SUD']) {
    var sudLots = lotsByRegion['SUD'];
    var sudWeight = 0;
    var sudHasForced = false;
    sudLots.forEach(function(lot) {
      sudWeight += lot.weight;
      lot.orders.forEach(function(o) { if (o.forced) sudHasForced = true; });
    });
    if (sudWeight < seuilMinSud && !sudHasForced) {
      // Les commandes Sud restent "En attente" pour le prochain run
      delete lotsByRegion['SUD'];
    }
  }
}

```

La fonction `findNearestFittingLot` sélectionne, parmi les lots restants compatibles avec la tournée en cours, celui dont la wilaya est la plus proche d'une wilaya déjà desservie par la tournée. Un lot est compatible avec une tournée si le poids résiduel disponible est suffisant, si

la contrainte PL Interdit est respectée, et si la wilaya du lot est compatible avec la région de la tournée.

4.4.8 Phase 4 – Optimisation 2-opt

La dernière phase optimise l'ordre de visite des wilayas dans chaque tournée par une recherche locale 2-opt classique. Le principe consiste à examiner toutes les paires (i, j) de la séquence et à évaluer le gain apporté par l'inversion du sous-segment compris entre i et j . Si l'inversion réduit la distance totale, elle est conservée ; le processus itère jusqu'à ce qu'aucune inversion ne soit plus bénéfique.

Notre variante est dite « TSP ouvert » : la tournée ne revient pas au dépôt après la dernière livraison. Le camion regagne le dépôt indépendamment, et la dernière arête n'est pas comptabilisée dans le calcul de distance. Le gain d'inversion d'un segment se formule comme suit :

$$\Delta = d(w_{i-1}, w_j) + d(w_i, w_{j+1}) - d(w_{i-1}, w_i) - d(w_j, w_{j+1}) \quad (4.5)$$

Si $\Delta < 0$, l'inversion est conservée.

Pseudocode 4.4. Optimisation 2-opt en TSP ouvert

```

Algorithme : twoOptRoute
Entree   : route = (w1, w2, ..., wn), d, depot D
Sortie   : route optimisee localement

amelioration <- Vrai
Tant que amelioration faire
    amelioration <- Faux
    Pour i de 1 a n - 1 faire
        Pour j de i + 1 a n faire
            delta <- gainInversion(route, i, j, d, D)
            Si delta < 0 alors
                Inverser route[i..j]
                amelioration <- Vrai
            Fin si
        Fin pour
    Fin pour
Fin tant que
Retourner route
    
```

Listing 4.4. Logique d'exécution de la fonction twoOptRoute()

```

TwoOptRoute

function twoOptRoute(wilayas, distMatrix, depot) {
  if (wilayas.length <= 2) return wilayas;
  var route = wilayas.slice();
  var improved = true;
  while (improved) {
    improved = false;
    for (var i = 0; i < route.length - 1; i++) {
      for (var j = i + 1; j < route.length; j++) {
        var a1 = i === 0 ? depot : route[i - 1];
        var b1 = route[i];
        var a2 = route[j];
        // Chemin ouvert : si on inverse jusqu'à la dernière wilaya,
        // il n'y a PAS d'arrêt vers la suite (camion s'arrête là).
        var hasNext = j < route.length - 1;
        var b2 = hasNext ? route[j + 1] : null;

        var dBefore = getDist(distMatrix, a1, b1);
        var dAfter  = getDist(distMatrix, a1, a2);
        if (hasNext) {
          dBefore += getDist(distMatrix, a2, b2);
          dAfter  += getDist(distMatrix, b1, b2);
        }

        if (dAfter < dBefore - 0.01) {
          route = route.slice(0, i)
                      .concat(route.slice(i, j + 1).reverse())
                      .concat(route.slice(j + 1));
          improved = true;
        }
      }
    }
  }
  return route;
}

```

La complexité d'une itération est $O(n^2)$. En pratique, le nombre d'itérations avant convergence reste faible pour les tailles de tournées rencontrées, généralement comprises entre trois et huit wilayas par tournée. Il convient cependant de rappeler qu'un optimum local 2-opt n'est pas nécessairement un optimum global; des heuristiques plus puissantes, comme 3-opt ou Lin-Kernighan, pourraient produire de meilleurs résultats au prix d'une complexité accrue.

4.4.9 Intégration des règles métier

Au-delà des contraintes classiques du CVRP, deux règles métier spécifiques à TELA ont été intégrées au cœur de l'algorithme : la règle « Clients PL Interdit » et la logique de priorisation

par âge des commandes.

4.4.9.1 Règle « Clients PL Interdit »

Pour des raisons opérationnelles, notamment des accès difficiles ou des contraintes contractuelles, certains clients ne peuvent être livrés que par des véhicules dont le poids total autorisé en charge est inférieur ou égal à 3,5 t. La liste de ces clients est gérée dans la feuille référentielle **Clients PL Interdit**. L'algorithme intègre cette contrainte par un mécanisme de plafond dynamique de capacité : dès qu'un lot appartenant à un client PL Interdit est ajouté à une tournée, le plafond de capacité de cette tournée est rétrogradé à 3,5 t pour tous les ajouts ultérieurs.

Concrètement, lorsqu'un lot d'un client restreint est jugé compatible avec une tournée, l'attribut booléen **hasRestricted** de la tournée passe à vrai. Toutes les vérifications ultérieures de compatibilité prennent alors en compte ce plafond rétrogradé. Un lot normal peut toujours être ajouté à condition que le poids total de la tournée reste inférieur ou égal à 3,5 t.

4.4.9.2 Priorisation par âge des commandes

Pour garantir l'écoulement des commandes en attente et éviter l'accumulation de commandes non livrées, l'algorithme implémente une logique de commandes forcées. Toute commande dont la date de saisie remonte à plus d'un nombre de jours configurable, par exemple J, J+1 ou J+7, est intégrée prioritairement dans la planification du jour, indépendamment du seuil minimum de remplissage défini pour la région concernée. Cette logique se traduit par deux ensembles distincts traités séquentiellement par l'algorithme : d'abord les commandes forcées, qui doivent partir, puis les commandes éligibles selon les seuils.

4.4.10 Validation et performances

La validation de l'algorithme a été menée selon deux axes complémentaires : des tests de performance sur des jeux de données de tailles croissantes pour vérifier le respect du besoin BNF-02, et une comparaison indicative avec la planification manuelle pratiquée chez TELA.

TABLE 4.7 – Performance de l'algorithme sur trois jeux de tests représentatifs

Source : auteurs.

Scénario	Commandes	Tournées	Remplissage moyen	Temps
Petit, smoke test	10	3	97,21 %	0,8 s
Moyen, cas réel TELA	50	12	95,32 %	1,9 s
Grand, stress test	200	47	91,53 %	8,3 s

Ces résultats ont été obtenus sur des jeux de données représentatifs générés à partir des distributions de commandes observées dans l'historique TELA : répartition par wilaya, profils de poids et de palettes, et mix de clients standards et restreints. Sur les trois scénarios, le besoin BNF-02 est respecté pour les volumes opérationnels nominaux. Au-delà, le temps croît de manière approximativement quadratique, ce qui reste compatible avec un usage hors temps réel pour le stress test à 200 commandes.

TABLE 4.8 – Comparaison indicative de la planification manuelle et de l’algorithme proposé

Source : auteurs.

Indicateur	Planification manuelle	Plateforme algorithmique	Gain
Taux de remplissage moyen, étude comparative	$\approx 69,73 \%$	95,57 %	+26 points
Temps de planification pour 50 commandes	≈ 45 min	2 s	$\times 1\,350$
Erreurs PL Interdit par mois	≈ 3	0	-100 %
Traçabilité des décisions	Aucune	Journal d’audit complet	–

Au-delà des gains chiffrés, plusieurs bénéfices qualitatifs méritent d’être soulignés : la reproductibilité des décisions de planification, la capitalisation dans l’historique de livraisons qui alimente le tableau de bord, et le maintien de l’expertise des planificateurs grâce aux fonctionnalités d’édition manuelle des tournées proposées.

4.5 Implémentation et fonctionnalités clés

Cette section présente les fonctionnalités effectivement livrées par la plateforme, leur lien avec les besoins fonctionnels formalisés en section 4.2.3, et les principaux choix qui ont structuré le développement.

4.5.1 Architecture frontend et expérience utilisateur

L’interface de l’application est organisée autour d’un menu d’accueil qui donne accès aux trois espaces fonctionnels distincts dès la connexion de l’utilisateur.

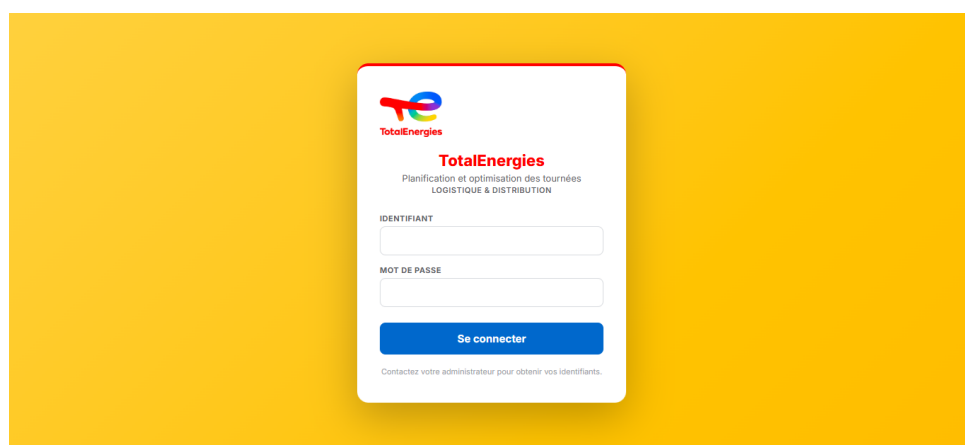


FIGURE 4.4 – Écran d’authentification de la plateforme - Source : auteurs

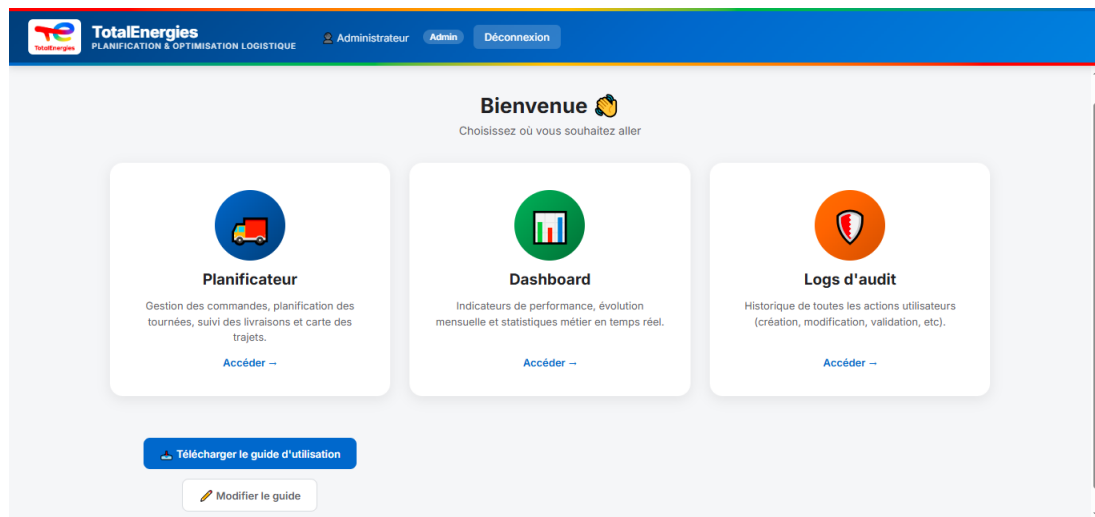


FIGURE 4.5 – Menu d'accueil de la plateforme - Source : auteurs

Cette organisation en trois espaces présente plusieurs avantages : elle organise la complexité fonctionnelle de l'application en sphères clairement séparées, elle facilite l'apprentissage en ne présentant à l'utilisateur que l'espace sollicité, et elle supporte une politique de droits d'accès différenciée selon le profil de l'utilisateur connecté.

Trois rôles sont définis dans la plateforme :

- administrateur : accès complet aux trois modules, ainsi qu'aux fonctions de configuration et de maintenance des référentiels ;
- planificateur : accès au module de planification et au tableau de bord, sans accès au journal d'audit ;
- lecteur : accès en consultation au tableau de bord uniquement, destiné aux responsables ou parties prenantes souhaitant suivre les indicateurs sans intervenir dans la planification.

Le menu d'accueil s'adapte dynamiquement au rôle de l'utilisateur connecté : seuls les modules auxquels il a accès lui sont présentés, ce qui simplifie l'interface et réduit le risque d'actions non autorisées.

4.5.2 Saisie et gestion des commandes

Le module de saisie implémente les besoins BF-01 et BF-02. Lors de la création d'une commande, l'application calcule automatiquement le poids à partir du nombre de palettes saisi et de la masse par palette du produit sélectionné dans le référentiel **REF Produits**. Cette automatisation supprime une source classique d'erreurs de saisie.

Pour chaque commande, un mécanisme de détection de doublons est déclenché. Si une commande existante du même client pour le même produit est encore au statut « En attente », une fenêtre de confirmation informe l'utilisateur des commandes concernées. Les commandes déjà planifiées ou archivées ne déclenchent pas l'alerte, car un même client peut légitimement recommander un produit après une livraison précédente.

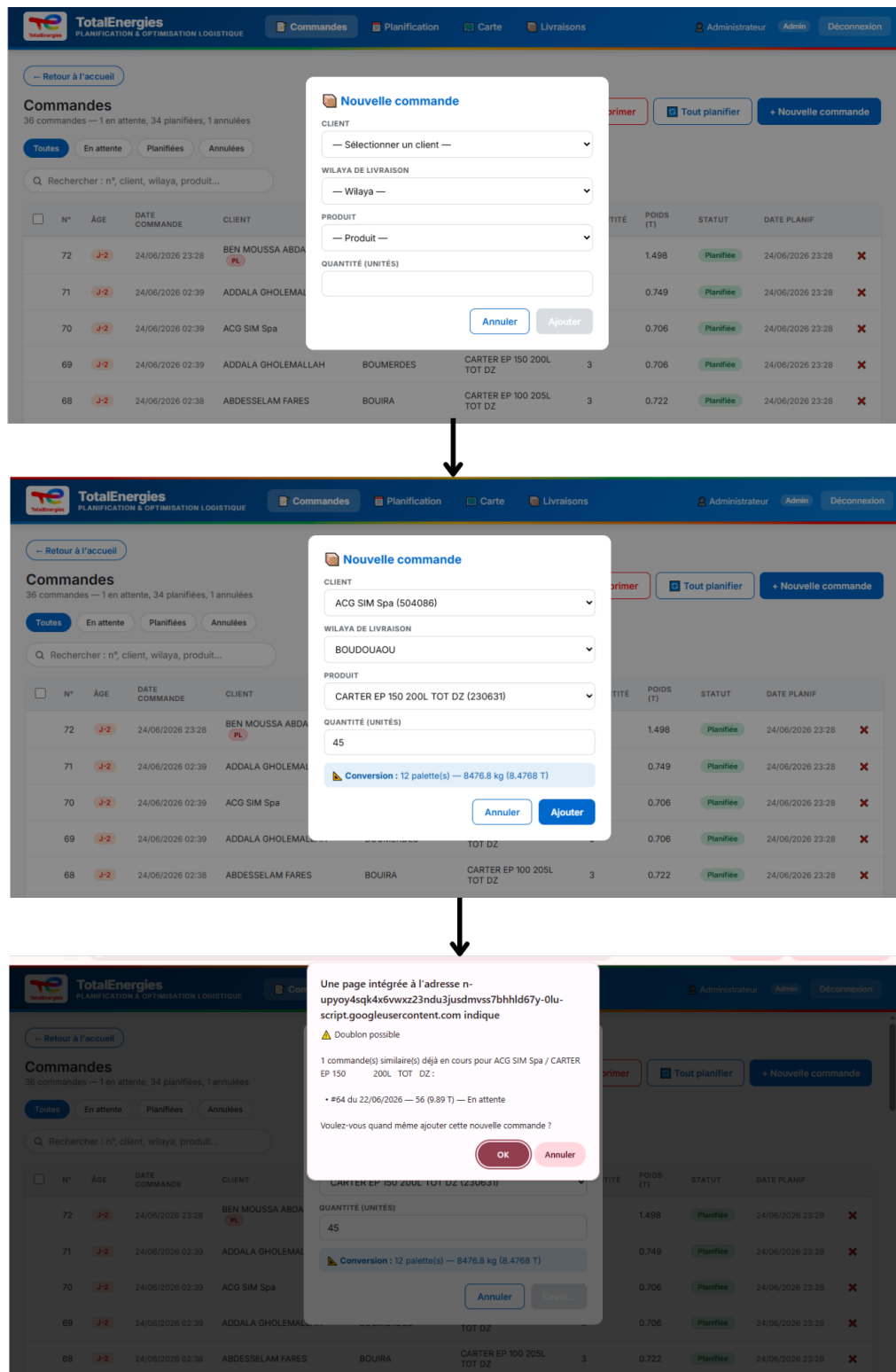


FIGURE 4.6 – Fenêtre de saisie de commande et détection de doublons - Source : auteurs

Le tableau récapitulatif des commandes propose un filtre par statut et une recherche portant sur le numéro de commande, le client, la wilaya, le produit ou le matricule. La recherche est insensible aux accents et à la casse.

4.5.3 Planification et édition interactive des tournées

Une fois les commandes saisies, le bouton « Lancer la planification » déclenche l'algorithme décrit en section 4.4. Les tournées générées sont présentées à l'utilisateur avec un statut initial « Proposée ». L'utilisateur peut alors :

- valider individuellement une tournée si elle correspond à ses attentes ;
- annuler une tournée pour remettre ses commandes en attente ;
- éditer une tournée pour ajuster son contenu ;
- valider globalement toutes les tournées proposées en une seule action.

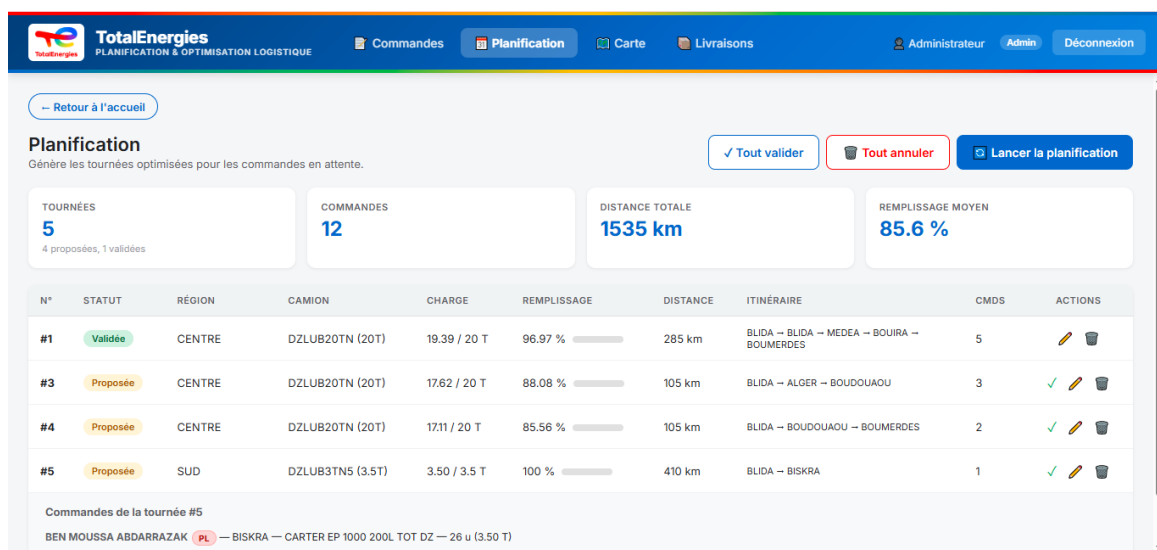


FIGURE 4.7 – Vue de planification : tournées proposées et indicateurs visuels - Source : auteurs

Le mode d'édition, activé par l'icône crayon d'une tournée proposée, ouvre une fenêtre permettant le changement du véhicule affecté, l'ajout de commandes non encore planifiées, le retrait de commandes pour les remettre en attente, et le réordonnancement par glisser-déposer des commandes à l'intérieur de la tournée. Ce dernier mécanisme permet à l'utilisateur d'imposer un ordre de visite spécifique, ce qui désactive automatiquement l'optimisation 2-opt pour cette tournée. L'algorithme respecte ainsi la décision humaine sans perdre sa capacité d'optimisation automatique pour les tournées non modifiées.

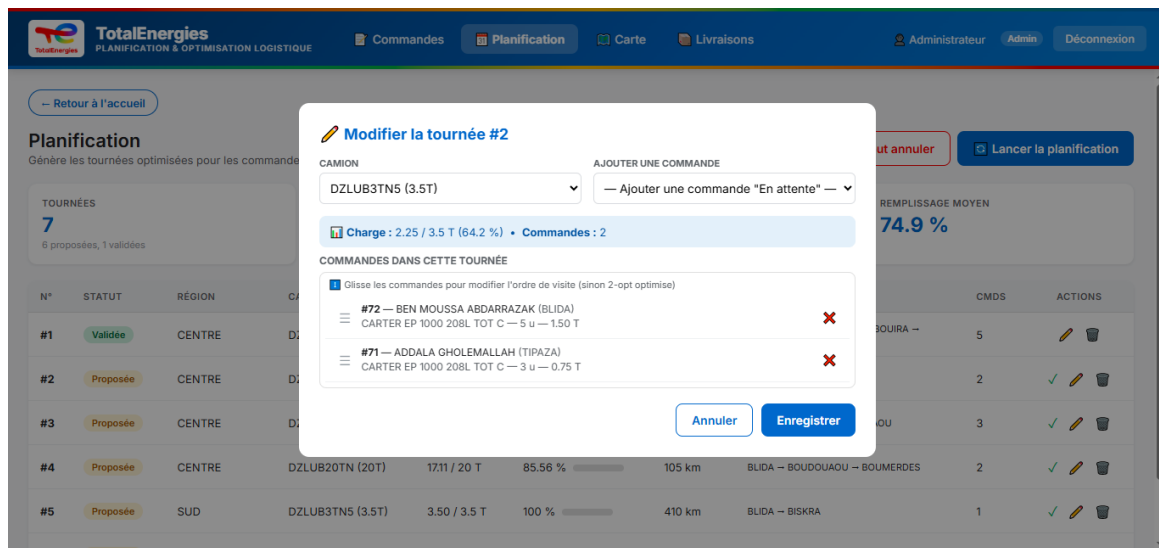


FIGURE 4.8 – Édition manuelle d’une tournée avec réordonnancement par glisser-déposer - Source : auteurs

Chaque modification d’une tournée fait l’objet d’un contrôle de capacité côté serveur. Si la modification entraîne un dépassement de la capacité du véhicule, l’opération est refusée, sauf confirmation explicite de l’utilisateur ; dans ce cas, le dépassement est tracé dans le journal d’audit pour imputabilité ultérieure.

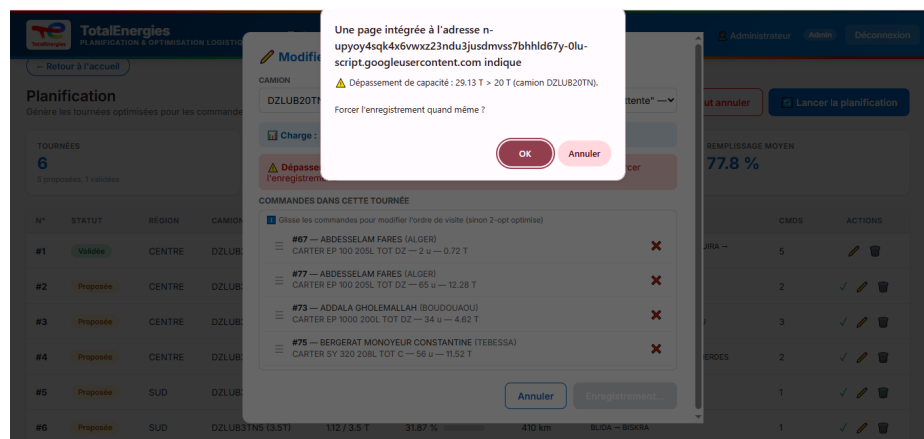


FIGURE 4.9 – Erreur de dépassement de capacité - Source : auteurs

4.5.4 Visualisation cartographique des tournées

Le module carte, correspondant au besoin BF-08, affiche sur une carte interactive l’ensemble des tournées générées. Chaque tournée est représentée par une polyligne colorée reliant les marqueurs des wilayas visitées, depuis le dépôt de Blida. Les marqueurs sont positionnés sur les chefs-lieux des wilayas, dont les coordonnées GPS sont définies dans le module `Carte.gs`.

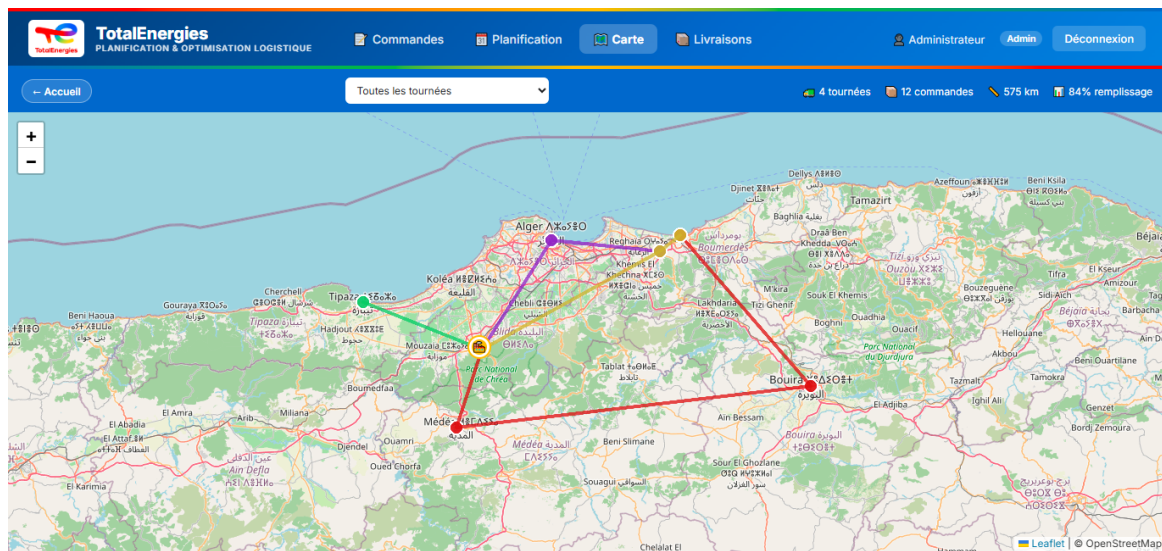


FIGURE 4.10 – Représentation cartographique des tournées - Source : auteurs

4.5.5 Tableau de bord et analyse de performance

Le tableau de bord, correspondant aux besoins BF-09 et BF-10, constitue la dimension analytique de la plateforme. Il agrège les données issues de la feuille **Historique Livraisons** et calcule en temps réel un ensemble d'indicateurs métier. Quatre cartes principales présentent les indicateurs clés : nombre de commandes livrées, nombre de tournées, distance totale parcourue et poids total livré, chaque indicateur étant accompagné d'une variation en pourcentage par rapport à la période précédente.

Le sélecteur de période propose trois granularités complémentaires :

- mois : choix précis parmi les mois ayant au moins une livraison, avec affichage par défaut du mois en cours ;
- trimestre : choix parmi les quatre trimestres calendaires pour les années disposant de données ;
- année : agrégat annuel pour l'année calendaire en cours.

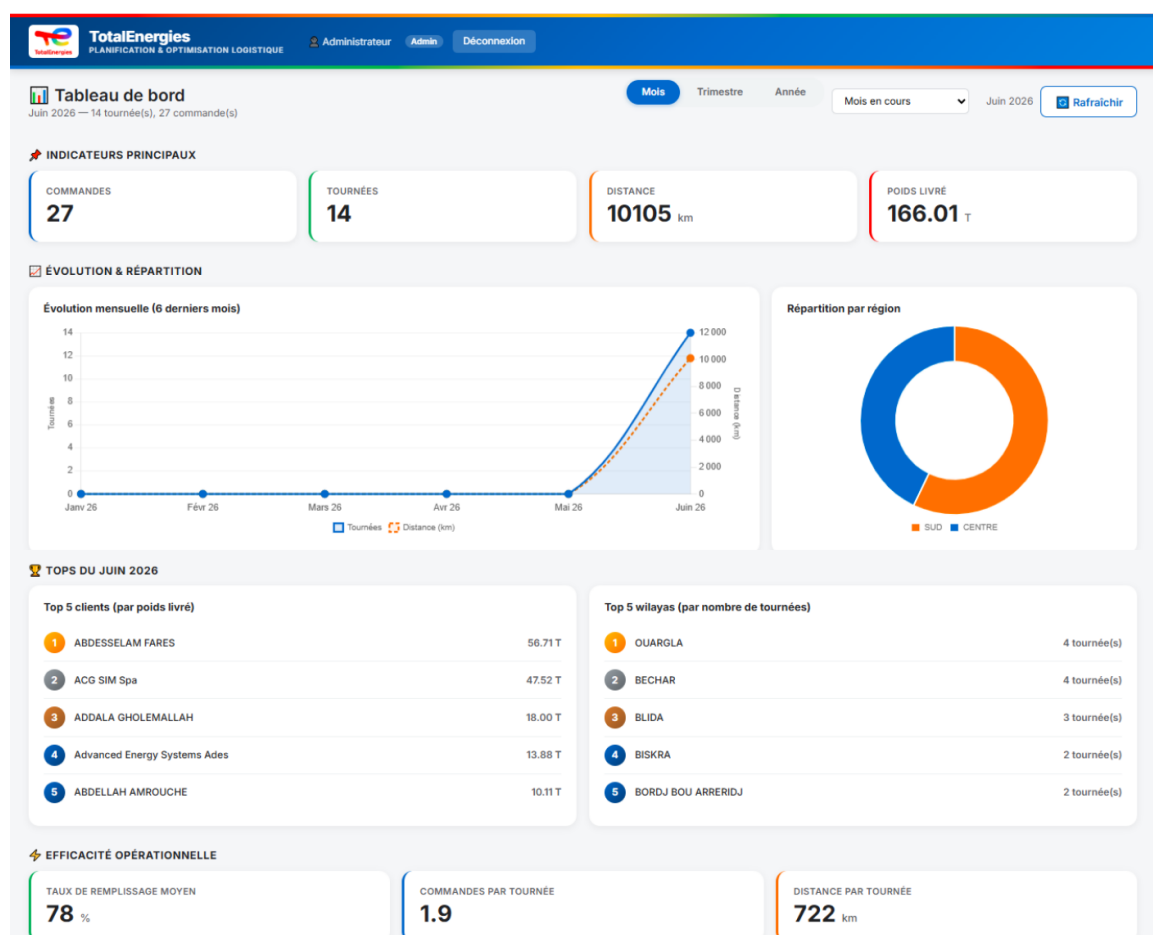


FIGURE 4.11 – Tableau de bord : indicateurs principaux et visualisations - Source : auteurs

Deux graphiques complètent les indicateurs : une courbe d'évolution mensuelle sur six mois avec deux axes, nombre de tournées et distance totale, et un diagramme en anneau de la répartition des tournées par région logistique. Trois indicateurs d'efficacité opérationnelle finalisent la vue : taux de remplissage moyen, commandes par tournée et distance moyenne par tournée. Ils sont suivis de classements Top 5 par client, en poids livré, et par wilaya, en nombre de tournées.

L'indicateur de taux de remplissage moyen est central : il quantifie directement la valeur ajoutée de l'algorithme par rapport à la planification manuelle, en exprimant la proportion moyenne de capacité véhicule effectivement utilisée. C'est cet indicateur qui doit être suivi en priorité par les responsables logistiques pour évaluer l'efficacité de la flotte.

4.5.6 Traçabilité : journal d'audit

Le journal d'audit, correspondant au besoin BNF-08, trace dix-sept types d'actions distinctes, depuis la connexion utilisateur jusqu'à la suppression d'une ligne d'historique. Chaque entrée comporte un horodatage à la seconde, l'identité de l'utilisateur, le type d'action et un descriptif des détails, par exemple : « Tournée #15 modifiée – Retiré : 22, 23 – Ajouté : 31 – Ordre manuel appliqué ».

Cette traçabilité répond à plusieurs besoins : la sécurité opérationnelle, en indiquant qui a fait quoi et quand ; la formation continue, en permettant de comprendre les décisions passées ; et l'audit externe, en assurant la conformité aux processus internes de TELA.

DATE	UTILISATEUR	TYPE	DÉTAILS
26/06/2026 02:47	Administrateur	TOURNEE_MODIFIEE	Tournée #1 • Ajouté : 75
26/06/2026 02:47	Administrateur	TOURNEE_ANNULEE	Tournée #4 (1 cmd remises en attente)
26/06/2026 02:47	Administrateur	PLANIFICATION_LANCEE	4 tournée(s) — 4 commande(s) planifiée(s)
26/06/2026 02:47	Administrateur	COMMANDE_AJOUTEE	ACG SIM Spa / CARTER EP 150 200L TOT DZ / 56 u
26/06/2026 02:46	Administrateur	COMMANDE_AJOUTEE	ADDALA GHOLEMALLAH / CARTER EP 1000 208L TOT C / 45 u
26/06/2026 02:46	Administrateur	TOURNEES_TOUTES_VALIDEES	3 tournée(s)
26/06/2026 02:41	Administrateur	TOURNEE_ANNULEE	Tournée #5 (1 cmd remises en attente)
26/06/2026 02:41	Administrateur	TOURNEE_ANNULEE	Tournée #6 (1 cmd remises en attente)
26/06/2026 02:40	Administrateur	TOURNEE_ANNULEE	Tournée #7 (1 cmd remises en attente)
26/06/2026 02:39	Administrateur	TOURNEE_VALIDEE	Tournée #1

FIGURE 4.12 – Journal d’audit horodaté des actions utilisateurs - Source : auteurs

4.5.7 Garanties d’intégrité

Plusieurs mécanismes garantissent l’intégrité des données manipulées par la plateforme.

4.5.7.1 Identifiants uniques de tournées

Chaque tournée validée se voit attribuer un identifiant unique, incrémental et persistant d’une session à l’autre, géré par un compteur centralisé qui garantit qu’aucun doublon ne peut survenir même en cas d’utilisation simultanée par plusieurs agents. Une procédure de correction permet également de rectifier rétroactivement d’éventuels identifiants historiques incohérents.

4.5.7.2 Historique en mode journal cumulatif

La feuille **Historique Livraisons** ne reçoit que des ajouts : l’application n’y écrase jamais une ligne existante. Toute modification d’une tournée n’affecte que la feuille de travail **Planification**, et la feuille d’historique n’est alimentée qu’au moment de la validation définitive. Cette règle garantit que les données archivées ne peuvent pas être altérées accidentellement, ce qui facilite les audits ultérieurs.

4.5.7.3 Tolérance aux données corrompues

Les fonctions de lecture des données historiques sont conçues pour ignorer les lignes corrompues, telles que les cellules en erreur, dates invalides ou références manquantes, plutôt que d’échouer entièrement. Cette robustesse répond à BNF-05 et permet à la plateforme de continuer à fonctionner même en présence de données partiellement abîmées.

4.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté l'intégralité du cycle de conception et de mise en œuvre de la plateforme de planification logistique livrée à TotalEnergies Algérie. À partir d'une analyse fine du processus manuel actuel et de ses lacunes, un cahier des charges fonctionnel précis a été formalisé en onze besoins fonctionnels et huit besoins non fonctionnels, chacun ayant pu être tracé jusqu'à une fonctionnalité effectivement livrée.

L'architecture retenue, fondée sur Google Apps Script, a permis de démarrer et d'opérer rapidement sans configuration serveur, tout en offrant une intégration native avec les fichiers et outils déjà utilisés par TELA. Le cœur algorithmique, formalisé dans le cadre de l'optimisation sous contraintes, combine une phase de regroupement géographique, *Cluster-First*, et une phase d'optimisation locale du trajet, *Route-Second*, via l'algorithme 2-opt. Cette décomposition en deux objectifs découplés, d'abord maximiser le taux de remplissage puis minimiser la distance, reflète les priorités opérationnelles de TELA et a été justifiée par trois critères : adaptabilité aux contraintes métier, lisibilité des décisions et performance suffisante.

Les gains apportés par la plateforme sont quantifiables à plusieurs niveaux : hausse significative du taux de remplissage moyen, réduction forte du temps de planification, élimination des erreurs liées aux règles métier, et constitution d'un patrimoine de données analytiques exploitable pour le pilotage. Au-delà des chiffres, la plateforme préserve l'expertise des planificateurs humains grâce à ses mécanismes d'édition interactive, et formalise une traçabilité fine des actions opérationnelles.

Plusieurs pistes d'évolution se dégagent à l'issue de ces travaux. À court terme, il serait pertinent d'enrichir le moteur d'optimisation par l'intégration d'une fenêtre temporelle multi-jours, d'affiner la fonction objectif pour pondérer simultanément remplissage et distance, et d'industrialiser l'authentification. À moyen terme, la couche analytique pourrait être étendue avec un module de comparaison entre planification manuelle et algorithmique sur données réelles, ainsi qu'un calcul d'impact environnemental, notamment les émissions de CO₂e évitées.

Chapitre 5

Validation expérimentale et évaluation de l'impact de la plateforme

5.1 Introduction

Ce chapitre constitue la phase de validation de l’ensemble du travail réalisé dans ce projet. Après avoir établi le bilan carbone de référence du transport aval de TELA au chapitre 3, puis conçu la plateforme de planification optimisée au chapitre 4, il s’agit désormais de mesurer objectivement l’impact réel de la solution sur les émissions de CO₂e, sur l’efficacité logistique et sur les coûts d’exploitation.

La démarche adoptée est celle d’une expérimentation contrôlée. Le mois de décembre 2025, identifié comme le mois le plus émetteur depuis le dépôt de Blida, a été sélectionné comme cas de validation. Toutes les commandes de ce mois ont été re-planifiées jour par jour via la plateforme, puis les indicateurs clés ont été recalculés selon la même méthodologie ADEME que celle appliquée au bilan de référence. Ce choix méthodologique garantit une comparaison rigoureuse et équitable entre la situation historique et la situation optimisée.

5.2 Protocole de validation expérimentale

Le protocole de validation a été défini de manière à garantir la reproductibilité et la comparabilité des résultats. Il repose sur le principe du test A/B : à données de livraison identiques, on compare les résultats de la planification manuelle historique, correspondant à la situation avant optimisation, à ceux de la planification algorithmique, correspondant à la situation après optimisation. Dans les deux cas, le même modèle de calcul CO₂e est appliqué systématiquement.

TABLE 5.1 – Paramètres du protocole de validation expérimentale

Source : auteurs.

Paramètre	Valeur retenue
Périmètre géographique	Dépôt de Blida – 45 wilayas desservies.
Période testée	Décembre 2025, mois le plus émetteur.
Volume de commandes traité	Toutes les commandes de décembre, planifiées jour par jour.
Méthode de référence, avant	Bilan carbone historique calculé au chapitre 3 selon la méthode ADEME.
Méthode optimisée, après	Même calcul ADEME appliqué aux tournées générées par la plateforme.
Indicateur principal	CO ₂ e total émis, exprimé en tCO ₂ e, Scope 3 catégorie 9.
Indicateurs secondaires	Poids total livré, nombre de camions et taux de remplissage moyen.
Outil de mesure	Tableau de bord Power BI développé au chapitre 3.
Condition de réussite	Réduction d’au moins 2 % des émissions CO ₂ e et taux de remplissage supérieur ou égal à 85 %.

Le choix de décembre comme mois de validation n’est pas anodin. Il s’agit du mois présentant le volume de commandes le plus élevé, soit 766 livraisons, et les émissions absolues les plus importantes, soit 38,79 tCO₂e pour le dépôt de Blida. Valider la solution sur ce cas de charge

maximale permet donc d’évaluer la robustesse de la plateforme dans une situation exigeante, représentative d’un pic d’activité opérationnelle.

5.3 Fonctionnement de la plateforme sur le cas de validation

La validation expérimentale a été conduite en utilisant la plateforme de planification décrite au chapitre 4, déployée sur le dépôt de Blida. Le processus a consisté à saisir l’ensemble des commandes de décembre 2025 dans le module de gestion des commandes, puis à lancer la planification automatique pour chaque journée, en respectant l’ordre chronologique des dates de commande.

5.3.1 Saisie et organisation des commandes

Les commandes de décembre ont été organisées selon leur date de création, reproduisant ainsi la séquence réelle à laquelle elles auraient été traitées par un planificateur. Pour chaque journée, les commandes en attente ont été soumises à l’algorithme de planification, qui a produit un ensemble de tournées optimisées. L’agent a ensuite eu la possibilité de les réviser via l’interface d’édition interactive avant validation.

ID	Date	Matricule	Client	Wilaya	Material Numb	Quantite	Nb Palettes	Poids(kg)	Poids (T)	Statut
2	30/12/2025	01/12/2025	507 255 SARL EL ARABIA	ALGER	230 651 DYNATRANS AC 10W 200L T	3		529,8	0,5298	
3	30/12/2025	01/12/2025	100 246 TOYOTA ALGERIE SPA	ALGER	230 593 QUARTZ INEO MDC 5W30 3B5L	25		523,8	0,5238	
4	30/12/2025	01/12/2025	505 984 SARL EL ARABIA	ALGER	230 651 DYNATRANS AC 10W 200L T	2		1236,2	1,2362	
5	30/12/2025	01/12/2025	505 984 SARL EL ARABIA	ALGER	230 653 DYNATRANS AC 50 200L TO	2		349,2	0,3492	
6	30/12/2025	01/12/2025	505 984 SARL EL ARABIA	ALGER	230 639 COOLELF AUTO SUPRA -26°C 200	4		359,6	0,3596	
7	30/12/2025	02/12/2025	504 725 MAKHLOUFI Lahcene	SETIF	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	40		844,8	0,8448	
8	30/12/2025	02/12/2025	504 725 MAKHLOUFI Lahcene	SETIF	219 755 RUBIA TIR 7400 15W40 3B5L TC	240		15435,2	15,4352	
9	30/12/2025	02/12/2025	509 270 EURL EL MASSAFI IMPORT EXPOI SETIF	SETIF	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	88		3174,24	3,17424	
10	30/12/2025	02/12/2025	100 398 SCOL COMTOIR DU LUBRIFIANT S ALGER	ALGER	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	16		7300,8	7,3008	
11	30/12/2025	02/12/2025	100 398 SCOL COMTOIR DU LUBRIFIANT S ALGER	ALGER	230 648 RUBIA FLEET HD 400 15W40 200L	16		15435,2	15,4352	
12	30/12/2025	02/12/2025	100 398 SCOL COMTOIR DU LUBRIFIANT S ALGER	ALGER	230 624 RUBIA S 40 200L TOT D	4		2806,4	2,8064	
13	30/12/2025	02/12/2025	100 398 SCOL COMTOIR DU LUBRIFIANT S ALGER	ALGER	219 778 EVOL 900 SXR 5W40 3B5L EL	30		707,96	0,70796	
14	30/12/2025	02/12/2025	100 398 SCOL COMTOIR DU LUBRIFIANT S ALGER	ALGER	219 755 RUBIA TIR 7400 15W40 3B5L TC	10		393	0,393	
15	30/12/2025	02/12/2025	100 259 EURL BEAI	BOUMERDES	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	88		101,8	0,1018	
16	30/12/2025	02/12/2025	503 454 Société National de Génie Civil &	LAGHOUEAT	230 651 DYNATRANS AC 10W 200L T	2		132,26	0,13226	
17	30/12/2025	02/12/2025	115 868 SARL Lynx Parts Import/Export	BORDJ BOU ARRER	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	40		15435,2	15,4352	
18	30/12/2025	02/12/2025	115 868 SARL Lynx Parts Import/Export	BORDJ BOU ARRER	230 624 RUBIA S 40 200L TOT D	40		349,2	0,3492	
19	30/12/2025	02/12/2025	508 707 SARL TELLI TRANSPORT	OUARGLA	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	12		7016	7,016	
20	30/12/2025	02/12/2025	508 707 SARL TELLI TRANSPORT	OUARGLA	230 639 COOLELF AUTO SUPRA -26°C 200	4		7079,6	7,0796	
21	30/12/2025	02/12/2025	510 274 LEAD ENERGY GROUP	Alger	230 622 RUBIA S 10W 200L TOT I	8		2104,8	2,1048	
22	30/12/2025	02/12/2025	510 274 LEAD ENERGY GROUP	Alger	230 639 COOLELF AUTO SUPRA -26°C 200	4		844,8	0,8448	
23	30/12/2025	02/12/2025	111 241 HES INC ALGERIA DIVISION	ALGER	230 629 AZOLLA ZS 68 200L TOT	5		1400	1,4	
24	30/12/2025	02/12/2025	505 863 KAROUAI ADEL TOP LUB	OUARGLA	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	28		844,8	0,8448	
25	30/12/2025	02/12/2025	505 863 KAROUAI ADEL TOP LUB	OUARGLA	219 755 RUBIA TIR 7400 15W40 3B5L TC	60		875	0,875	
26	30/12/2025	02/12/2025	505 863 KAROUAI ADEL TOP LUB	OUARGLA	219 792 RUBIA TIR 7400 15W40 20L TC	64		4911,2	4,9112	
27	30/12/2025	02/12/2025	100 419 ETS BOUTEGHMEZ NAZIMEDDINE BATNA	ALGER	230 626 RUBIA TIR 7400 15W40 200L TC	32		1128,64	1,12864	

FIGURE 5.1 – Saisie des commandes de décembre 2025 - Source : capture Google Sheets

Cette étape de saisie a également permis de vérifier la cohérence des référentiels utilisés par la plateforme : clients, wilayas, produits, masses par palette et contraintes PL Interdit. Les anomalies éventuelles ont été corrigées avant le lancement des simulations afin que les résultats mesurent bien l’effet de l’algorithme de planification, et non celui d’une différence de qualité des données.

5.3.2 Planification algorithmique et résultats intermédiaires

Pour chaque journée de décembre, l’algorithme *Cluster-First / Route-Second* a généré des tournées en moins d’une minute, conformément à l’exigence BNF-02 définie au chapitre 4. Le résultat brut proposé par l’algorithme a systématiquement atteint un taux de remplissage supérieur à 85 %, confirmant l’efficacité de la stratégie *Best-Fit Decreasing* appliquée au niveau de la construction des tournées.

N°	DATE COMMANDE	DATE PLANIF	ID CLIENT	CLIENT	WILAYA	PRODUIT	QUANTITÉ	PALETTES	POIDS (T)
3013126983	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	119248	SARL GCM KADEM	BLIDA	RUBIA S 10W 200L TOT DZ	8	0	3.379
3013126984	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	119248	SARL GCM KADEM	BLIDA	RUBIA TIR 7400 15W40 200L TOT DZ	10	0	1.360
3013126921	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	506673	SARL SPSM	ALGER	#N/A	180	0	1.258
3013126921	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	506673	SARL SPSM	ALGER	RUBIA TIR 7400 15W40 200L TOT DZ	28	0	0.761
3013126975	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	—	EURL Q M CENTRAL TRADING	ALGER	RUBIA TIR 7400 15W40 200L TOT DZ	44	0	3.386
3013126976	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	—	EURL Q M CENTRAL TRADING	ALGER	RUBIA S 10W 200L TOT DZ	4	0	0.768
3013126987	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	—	STELLANTIS BOUDOUKHANA AUTOBIS	ALGER	#N/A	3	0	2.095
3013126987	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	—	STELLANTIS BOUDOUKHANA AUTOBIS	ALGER	COOLELF AUTO SUPRA -26°C 3BSL TOT 1DZ	5	0	2.100
3013126973	21/12/2025 23:00	23/06/2026 00:19	100259	EURL BEAI	BOUMERDES	RUBIA TIR 7400 15W40 200L TOT DZ	88	0	0.692

FIGURE 5.2 – Module de planification : tournées proposées par l’algorithme pour le 15 décembre 2025
- Source : capture plateforme TELA

La validation journalière a été conduite de manière homogène : lancement automatique, contrôle visuel des tournées, ajustements éventuels par l’agent, puis validation définitive. Cette procédure garantit que les tournées optimisées restent exploitables par les équipes terrain et ne constituent pas uniquement une solution théorique.

5.4 Résultats de la planification optimisée

Une fois la totalité des commandes de décembre planifiées via la plateforme, les données des tournées ont été exportées au format Excel et intégrées dans le tableau de bord Power BI développé au chapitre 3. Les émissions CO₂e ont été recalculées selon la même formule ADEME que celle utilisée dans le bilan de référence : donnée agrégée multipliée par le poids restant et par la distance. Cette formule a été appliquée aux nouveaux segments issus de la planification optimisée.

La figure 5.3 présente un extrait du fichier Excel exporté par la plateforme, utilisé comme entrée du tableau de bord Power BI pour le recalcul des émissions.

Livraisons_2026-06-26 [Mode protégé] - Excel (Produit sans licence)

Bozza, Mohamed Ramzi

Fichier Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide Rechercher des outils adaptés Partager

ID Tournée

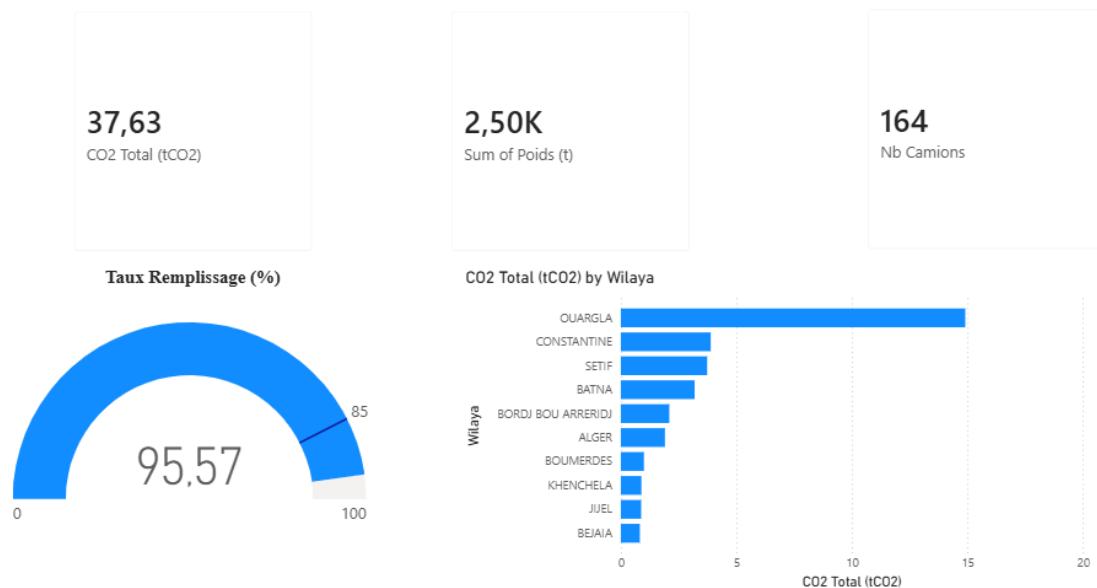
ID Tournée	Groupe véhicule	Date planification	ID Commande	Date commande	ID Client	Nom client	Wilaya	Produit	Quantité	Poids (T)
179	DZLUB3_5TN	23/06/2026 01:00	3013126842	21/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	#N/A		4 0.351
			3013126892	21/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	QUARTZ 5000 15W40	385L TOT DZ	120 0.177
			3013126892	21/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	EVOL. 500 TS 15W40	385L ELF DZ	60 0.351
			3013126892	21/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	RUBIA S 10W	200L TOT DZ	4 0.354
			3013126893	21/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	#N/A		4 0.349
			3013126974	21/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	#N/A		120 9.432
			3013127041	22/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	RUBIA S 40	20L TOT 1DZ	32 1.588
			3013127041	22/12/2025 23:00	506639	REMADLIA MOHAMED	TIPAZA	QUARTZ 5000 15W40	200L TOT DZ	8 0.702
178	DZLUB3_5TN	23/06/2026 01:00	3013127076	23/12/2025 23:00	113300	TOYOTA ALGERIE SPA	ALGER	QUARTZ 5000 15W40	200L TOT DZ	5 3.500
177	DZLUB3_5TN	23/06/2026 01:00	3013127076	23/12/2025 23:00	113300	TOYOTA ALGERIE SPA	ALGER	QUARTZ 5000 15W40	200L TOT DZ	5 3.500
176	DZLUB3_5TN	23/06/2026 01:00	3013127077	23/12/2025 23:00	113300	TOYOTA ALGERIE SPA	ALGER	QUARTZ 5000 15W40	200L TOT DZ	6 0.636
			3013127076	23/12/2025 23:00	113300	TOYOTA ALGERIE SPA	ALGER	QUARTZ 5000 15W40	200L TOT DZ	2 0.936
			3013127042	23/12/2025 23:00	113300	TOYOTA ALGERIE SPA	ALGER	QUARTZ 5000 15W40	200L TOT DZ	12 0.614
175	DZLUB20TN		3013126924	21/12/2025 23:00		NPS BAHRAINFOR OIL AND GAS WELLS S OUARGLA		AZOLLA ZS 68	200L TOT DZ	30 5.240
			3013126924	21/12/2025 23:00		NPS BAHRAINFOR OIL AND GAS WELLS S OUARGLA		AZOLLA ZS 68	200L TOT DZ	10 8.419
174	DZLUB20TN		3013126971	21/12/2025 23:00	100407	ATTOUSSI NABIL	EL OUED	#N/A		60 5.613
			3013126971	21/12/2025 23:00	100407	ATTOUSSI NABIL	EL OUED	COOLELF AUTO SUPRA -26°C 385L TOT		60 2.303
			3013126711	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	CARTER EP 220	200L TOT DZ	5 0.763
			3013126712	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	COOLELF AUTO SUPRA -26°C 200L TOT		4 1.036
			3013126712	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	RUBIA TIR 7400 15W40	200L TOT DZ	5 0.088
			3013126756	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	#N/A		6 0.064
			3013126757	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	RUBIA TIR 7400 15W40	200L TOT DZ	8 0.131
			3013126757	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	CARTER EP 220	200L TOT DZ	12 0.228
			3013126757	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	AZOLLA ZS 68	200L TOT DZ	15 0.132
			3013126757	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	COOLELF AUTO SUPRA -26°C 200L TOT		10 0.198
			3013126758	15/12/2025 23:00	117508	Advanced Energy Systems Aides	OUARGLA	RUBIA TIR 7400 15W40	200L TOT DZ	2 0.175

Livraisons

Prêt

FIGURE 5.3 – Extrait du fichier Excel exporté par la plateforme d'optimisation - Source : auteurs

La figure 5.4 présente le tableau de bord Power BI après intégration des tournées optimisées, affichant les indicateurs clés de la situation post-optimisation.

FIGURE 5.4 – Dashboard Power BI post-optimisation : CO_{2e} total 37,63 tCO_{2e} et taux de remplissage 95,57 % - Source : auteurs

Les principaux résultats obtenus après optimisation sont présentés dans le tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Comparaison synthétique des résultats avant et après optimisation

Source : auteurs.

Indicateur	Avant	Après
CO ₂ e total émis	38,79 tCO ₂ e	37,63 tCO ₂ e
Nombre de tournées, ou camions mobilisés	271	164
Taux de remplissage moyen	69,73 %	95,57 %
Poids net total livré	2 503 t	2 503 t

Ces résultats sont meilleurs que la situation de référence sur tous les indicateurs simultanément. Ils dépassent également la cible de taux de remplissage de 85 % fixée comme objectif dans le cahier des charges, ce qui valide l'efficacité de l'algorithme dans un contexte opérationnel réel.

5.5 Analyse comparative avant / après

5.5.1 Tableau de bord comparatif

Le tableau 5.3 présente une comparaison exhaustive des principaux indicateurs entre la situation de référence, correspondant à la planification manuelle historique, et la situation optimisée, correspondant à la plateforme algorithmique, pour décembre 2025 depuis le dépôt de Blida.

TABLE 5.3 – Comparaison avant/après planification optimisée – Décembre 2025, dépôt Blida

Source : auteurs.

Indicateur	Avant manuel	Après plateforme	Variation
CO ₂ e total	38,79 tCO ₂ e	37,63 tCO ₂ e	-1,16 t, soit -3,0 %
Nombre de tournées	271	164	-107 tournées, soit -39,5 %
Poids net total livré	2 503 t	2 503 t	Inchangé
Taux de remplissage moyen	69,73 %	95,57 %	+25,84 points
Nombre de camions mobilisés	271	164	-107 camions

5.5.2 Analyse des gains par dimension

5.5.2.1 Dimension environnementale

La réduction de 1,16 tCO₂e, soit -3,0 %, représente l'effet direct de la meilleure mutualisation des chargements. Bien que modeste en valeur absolue sur un seul mois, cette réduction est obtenue uniquement par la réorganisation algorithmique des tournées, sans modification de flotte, de carburant ou d'infrastructure. Ramenée à l'année, et en supposant une intensification

progressive de l’usage de la plateforme, cette performance laisse entrevoir un potentiel de réduction annuelle significative sur le seul dépôt de Blida. Il s’agit donc d’une économie directement mesurable, reproductible à chaque cycle de planification.

5.5.2.2 Dimension logistique

Le taux de remplissage de 95,57 % constitue la démonstration la plus directe de l’efficacité algorithmique. La cible opérationnelle de 85 % fixée dans le cahier des charges est non seulement atteinte, mais dépassée de plus de dix points. La réduction du nombre de tournées de 39,5 %, soit 107 camions en moins, confirme que la mutualisation systématique des commandes, rendue possible par l’algorithme *Best-Fit Decreasing*, élimine une part importante des tournées sous-chargées qui caractérisaient le processus manuel.

5.5.2.3 Dimension opérationnelle

Le gain de temps lié à l’automatisation de la planification est notable. Là où un agent consacrait environ trois heures par jour à l’organisation manuelle des tournées, la plateforme génère une planification exploitable en moins de cinq secondes, puis laisse une phase de validation et d’ajustement manuel réduite à moins de trente minutes. Ce gain de productivité libère du temps de travail pour des tâches à plus forte valeur ajoutée, telles que le suivi des livraisons, la gestion des anomalies et la relation clients.

5.6 Mise en perspective : que représente 1 tonne de CO₂e évitée ?

La réduction obtenue grâce à la plateforme s’élève à 1,16 tCO₂e sur le seul mois de décembre 2025, depuis le dépôt de Blida. Pour donner une dimension concrète à ce chiffre, il est utile de rappeler ce que représente une tonne de CO₂e dans la vie quotidienne, et par extension ce que signifie en éviter 1,16 en un seul mois uniquement par la réorganisation algorithmique des tournées.

TABLE 5.4 – Équivalences concrètes d’une tonne de CO₂e évitée

Sources : ADEME, Our World in Data, Carbon Footprint Ltd, CDER Algérie et WWF.

Équivalence pour 1 tCO ₂ e	Domaine	Source indicative	Commentaire
Un vol Paris–Alger émet environ 0,25 tCO ₂ e par passager en classe économique.	Transport aérien	ADEME, calculatrice Bilan Carbone 2023	La réduction obtenue équivaut à environ quatre à cinq allers-retours Alger–Paris évités.
Une tonne de CO ₂ e représente environ un an de consommation de viande bovine pour une personne.	Alimentation et agriculture	Our World in Data, Food emissions dataset	L’économie mensuelle dépasse l’ordre de grandeur d’une empreinte alimentaire annuelle spécifique.
Une tonne de CO ₂ e correspond à environ cinq mois de chauffage au gaz naturel d’un appartement de 70 m ² .	Énergie domestique	CDER Algérie, factures gaz types 2023	1,16 tCO ₂ e évitées représentent près de six mois de chauffage d’un foyer.
Une tonne de CO ₂ e correspond à environ 10 000 km en voiture essence à 100 gCO ₂ e/km.	Usage automobile	ADEME, guide des facteurs d’émission 2023	1,16 tCO ₂ e évitées correspondent à environ 11 600 km de voiture retirés de la route.
Une tonne de CO ₂ e correspond à l’absorption annuelle d’environ 50 arbres adultes.	Reboisement	WWF, rapport Forêts et Carbone 2022	1,16 tCO ₂ e évitées correspondent à l’absorption annuelle d’environ 58 arbres adultes.

Ces équivalences montrent que 1,16 tCO₂e évitée n’est pas un chiffre abstrait : elle représente l’ordre de grandeur de six mois de chauffage d’un foyer, de 11 600 km de voiture retirés de la route, ou encore de l’absorption annuelle de 58 arbres adultes. Cette réduction a été obtenue en un seul mois, uniquement par la réorganisation algorithmique des tournées, sans changement de flotte, de carburant ou d’infrastructure.

En projetant ce gain sur l’ensemble de l’année, soit $12 \times 1,16$ tCO₂e, la plateforme permettrait d’éviter près de 14 tCO₂e annuelles depuis le seul dépôt de Blida. Cette projection doit rester indicative, car elle suppose une stabilité des volumes et des profils de livraison, mais elle donne un ordre de grandeur du potentiel de décarbonation accessible par optimisation opérationnelle.

5.7 Discussion des résultats et limites

5.7.1 Forces de la solution

Les résultats obtenus confirment que la plateforme répond à son double objectif : réduire l’empreinte carbone du transport aval de TELA tout en améliorant son efficacité opérationnelle. Plusieurs forces structurelles de la solution expliquent ces performances :

- l’algorithme *Cluster-First / Route-Second* s’est révélé particulièrement adapté au contexte TELA, où les distances inter-wilayas hétérogènes et les règles métier nécessitaient une approche en deux phases clairement séparées ;
- l’interface d’édition interactive a facilité l’adoption par les planificateurs, qui conservent la maîtrise finale des décisions tout en bénéficiant d’une base algorithmique solide ;
- l’intégration native dans l’écosystème Google Workspace de TELA a permis un déploiement sans infrastructure supplémentaire, réduisant le délai de mise en production et les coûts d’exploitation ;
- la traçabilité complète des actions, via le journal d’audit, répond aux exigences de gouvernance et facilite l’analyse post-événement en cas de litige ou d’incident de livraison.

Ce compromis entre automatisation et intervention humaine est essentiel dans un contexte où la connaissance terrain reste précieuse. La plateforme agit ainsi comme un outil d’aide à la décision plutôt que comme un système fermé imposant une solution non modifiable.

5.7.2 Limites identifiées

Malgré des résultats encourageants, plusieurs limites doivent être mentionnées pour garantir l’honnêteté scientifique de la démarche :

- la validation n’a porté que sur un mois, décembre 2025, et un seul dépôt, Blida. Bien que ces paramètres soient représentatifs du cas de charge maximal, une généralisation à l’ensemble de l’année et au dépôt d’Oran reste à confirmer expérimentalement ;
- les distances utilisées dans le calcul CO₂e sont issues d’une matrice théorique inter-wilayas. Les distances réelles, mesurées par GPS sur le terrain, peuvent s’en écarter, notamment dans les zones où le réseau routier est indirect ou en mauvais état ;
- le taux de consommation des véhicules est fixé à partir de données déclarées par les prestataires, et non mesuré par télémétrie. Les variations de charge, de relief ou de conditions de circulation ne sont donc pas prises en compte dans le modèle actuel ;
- la réduction du nombre de tournées implique que certaines livraisons, auparavant réalisées rapidement en tournée isolée, doivent désormais attendre d’être regroupées avec d’autres commandes. Ce délai potentiel doit être géré contractuellement avec les clients afin de ne pas dégrader la qualité de service.

Ces limites ne remettent pas en cause les résultats obtenus, mais elles encadrent leur interprétation. Elles indiquent surtout les directions prioritaires pour une industrialisation plus complète de la solution.

5.8 Recommandations et perspectives

Sur la base des résultats obtenus et des limites identifiées, plusieurs recommandations opérationnelles et stratégiques peuvent être formulées pour la poursuite et l’extension du projet.

TABLE 5.5 – Recommandations opérationnelles et stratégiques

Source : auteurs.

Réf.	Recommandation	Horizon	Justification
R1	Migrer le prototype élaboré vers une webapp locale.	Court terme	Améliorer la sécurité des données et la rapidité d’exécution.
R2	Améliorer le déploiement de la plateforme sur le dépôt d’Oran.	Court terme, moins de 3 mois	Couvrir un périmètre représentant environ 14 % des émissions totales.
R3	Intégrer un flux automatique depuis SAP.	Moyen terme, 3 à 6 mois	Éliminer la re-saisie manuelle et réduire le risque d’erreur.
R4	Développer une optimisation multi-dépôts.	Moyen terme, 6 à 12 mois	Permettre le pooling en zone frontalière entre dépôts.
R5	Ajouter un suivi GPS des tournées en temps réel.	Moyen terme	Affiner le modèle CO ₂ e et comparer distances théoriques et distances réelles.
R6	Étendre le bilan carbone au transport amont, Scope 3 catégorie 4.	Long terme, plus de 12 mois	Construire un bilan GHG plus exhaustif sur la chaîne logistique.

Ces recommandations s’inscrivent dans une trajectoire progressive d’amélioration continue, allant de la consolidation des acquis immédiats, notamment le déploiement Oran et l’intégration SAP, à une ambition plus large : positionner TELA comme un acteur engagé dans la décarbonation de sa chaîne logistique en Algérie.

5.9 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a démontré, par une expérimentation contrôlée sur le cas le plus contraignant de l’année, à savoir décembre 2025 depuis le dépôt de Blida, que la plateforme de planification logistique développée dans le cadre de ce projet génère des améliorations mesurables sur l’ensemble des dimensions évaluées.

Les résultats peuvent se résumer en trois chiffres clés :

- 3,0 % d’émissions CO₂e, soit -1,16 tCO₂e sur un seul mois ;
- 39,5 % de tournées effectuées, soit 107 camions mobilisés en moins ;
- 95,57 % de taux de remplissage moyen, pour une cible initiale de 85 %.

Ces résultats valident simultanément l’efficacité de l’algorithme d’optimisation, la pertinence de la méthodologie de calcul carbone adoptée, fondée sur l’approche ADEME et le Scope 3,

ainsi que la valeur ajoutée de l’approche intégrée développée tout au long de ce projet : bilan carbone, plateforme d’optimisation et tableau de bord de suivi.

Au-delà des chiffres, ce projet démontre qu’il est possible, dans le contexte des entreprises industrielles algériennes, de conjuguer performance logistique et responsabilité environnementale sans investissement infrastructure lourd, à condition de s’appuyer sur une démarche rigoureuse de mesure, d’analyse et d’optimisation. TotalEnergies Lubrifiants Algérie dispose désormais d’un outil opérationnel, d’un tableau de bord de pilotage et d’une méthodologie reproductible pour inscrire la décarbonation de son transport aval dans une dynamique d’amélioration continue.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce projet, mené au sein de TotalEnergies Lubrifiants Algérie, répondait à une double ambition : rendre visible l'empreinte carbone du transport aval, puis agir concrètement sur les leviers opérationnels permettant de la réduire. Il ne s'agissait donc pas uniquement de produire un diagnostic environnemental, mais de construire une démarche complète reliant mesure, optimisation et pilotage.

La première contribution de ce travail est l'établissement du bilan carbone du transport aval, correspondant au Scope 3, catégorie 9. La baseline obtenue pour l'année 2025 s'élève à 497,49 tCO₂e, calculées segment par segment selon la méthode des données agrégées de l'ADEME. Ce niveau de granularité a permis d'identifier les principaux foyers d'émissions : les wilayas sahariennes, principalement sous l'effet de la distance, et les wilayas du nord, davantage sous l'effet du volume livré. Le taux de remplissage moyen de 68,64 % a également révélé une marge d'optimisation structurelle importante. L'ensemble de cette analyse est désormais automatisé et reproductible à chaque nouveau cycle de données.

La seconde contribution est la conception et la validation d'une plateforme de planification algorithmique. L'algorithme *Cluster-First / Route-Second*, formalisé dans le cadre de l'optimisation sous contraintes et enrichi par les règles métier spécifiques de TELA, s'est attaqué directement à la marge d'amélioration identifiée dans le diagnostic initial. Validée sur le mois de décembre 2025 dans des conditions opérationnelles représentatives, la solution a permis d'obtenir trois résultats majeurs : une réduction de 3,0 % des émissions CO₂e, une diminution de 39,5 % du nombre de tournées effectuées, et un taux de remplissage moyen porté à 95,57 %, dépassant la cible de 85 % fixée dans le cahier des charges.

La cohérence de ce travail réside précisément dans l'articulation entre ces deux volets. Les tournées optimisées par la plateforme sont réinjectées dans le même modèle ADEME que celui utilisé pour établir la baseline, ce qui rend la comparaison rigoureuse et la réduction carbone directement mesurable. TELA dispose ainsi non seulement d'un outil de planification opérationnel, mais également d'un instrument de pilotage environnemental intégré à son activité quotidienne.

Les perspectives d'amélioration sont clairement identifiées. À court terme, il conviendra de migrer le prototype vers une webapp locale, d'étendre le déploiement au dépôt d'Oran et d'intégrer des distances GPS réelles afin d'affiner le modèle carbone. À plus long terme, l'approche développée dans ce projet, fondée sur la séquence mesurer, optimiser et tracer, constitue un modèle répliquable pour toute entreprise cherchant à traduire ses engagements de décarbonation en décisions logistiques concrètes.

Bibliographie

- [1] GIEC (IPCC), *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report*. Genève : IPCC, 2023. Disponible sur : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [2] International Energy Agency (IEA), *CO₂ Emissions in 2023*. Paris : IEA, 2023. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- [3] République Algérienne Démocratique et Populaire, *Contribution Déterminée au niveau National (CDN) – Mise à jour 2021*. Ministère de l'Environnement, Alger, 2021. Disponible sur : <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Alg%C3%A9rie%20CDN%202021.pdf>
- [4] World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. Washington DC : WRI, 2011. Disponible sur : <https://ghgprotocol.org/scope-3-standard>
- [5] ADEME, *Information CO₂e des prestations de transport – Application de l'article L. 1431-3 du code des transports. Guide méthodologique*. Angers : ADEME, octobre 2012.
- [6] TotalEnergies SE, *Document d'enregistrement universel 2025 – Rapport annuel et financier*. Paris : TotalEnergies SE, 2026. Disponible sur : https://totalenergies.com/system/files/documents/totalenergies_document-enregistrement-universel-2025_2026_fr.pdf
- [7] TotalEnergies Algérie, *Présentation des activités en Algérie*. Document institutionnel, Alger : TotalEnergies Algérie, 2024.
- [8] TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA), *Données internes de reporting transport et logistique – Année 2025*. Document interne, non publié, Blida : TELA, 2025.
- [9] CHOPRA Sunil et MEINDL Peter, *Supply Chain Management : Strategy, Planning, and Operation*, 6^e édition. Pearson Education, 2016.
- [10] Nations Unies, *Accord de Paris dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. New York : Nations Unies, 2015. Disponible sur : <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [11] République Algérienne Démocratique et Populaire, *Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable*. Journal Officiel de la République Algérienne, n° 43, 20 juillet 2003.
- [12] Organisation Internationale de Normalisation (ISO), *ISO 50001 :2018 – Systèmes de management de l'énergie – Exigences et recommandations pour la mise en œuvre*. Genève : ISO, 2018. Disponible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/69426.html>
- [13] DANTZIG George B. et RAMSER John H., *The truck dispatching problem*. *Management Science*, vol. 6, n° 1, p. 80–91, 1959. Disponible sur : <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- [14] TOTH Paolo et VIGO Daniele (Eds.), *Vehicle Routing : Problems, Methods, and Applications*, 2^e édition. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2014. Disponible sur : <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594>

- [15] CLARKE G. et WRIGHT J. W., *Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points*. *Operations Research*, vol. 12, n° 4, p. 568–581, 1964. Disponible sur : <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- [16] LIN S. et KERNIGHAN B. W., *An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem*. *Operations Research*, vol. 21, n° 2, p. 498–516, 1973. Disponible sur : <https://doi.org/10.1287/opre.21.2.498>
- [17] GAREY Michael R. et JOHNSON David S., *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York : W. H. Freeman and Company, 1979.
- [18] Google LLC, *Google Apps Script – Documentation développeur*. Mountain View : Google LLC, 2023. Disponible sur : <https://developers.google.com/apps-script>
- [19] Microsoft Corporation, *Power BI – Documentation officielle*. Redmond : Microsoft Corporation, 2023. Disponible sur : <https://learn.microsoft.com/fr-fr/power-bi/>
- [20] ADEME, *Base Empreinte® – Base de données nationale des facteurs d’émission*. Angers : ADEME, 2023. Disponible sur : <https://base-empreinte.ademe.fr/>
- [21] ADEME, *Guide des facteurs d’émissions – Calculateur Bilan Carbone® 2023*. Angers : ADEME, 2023. Disponible sur : <https://bilans-ges.ademe.fr/>
- [22] POORE H. et RITCHIE H., *Food, Greenhouse Gas Emissions Across the Supply Chain*. Our World in Data, 2023. Disponible sur : <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions>
- [23] WWF International, *Living Planet Report 2022 – Building a Nature-Positive Society*. Gland : WWF International, 2022. Disponible sur : <https://www.worldwildlife.org/pages/living-planet-report-2022>