

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ecole Nationale Polytechnique
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel
Lafarge Holcim Algeria

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention
du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel

**Amélioration du potentiel de réduction des émissions
SCOPE 3, catégorie 4 "Upstream Transportation and
Distribution" par l'implémentation d'une solution
d'éco conduite.
Application : Logistique de Transport Lafarge Algérie**

Réalisé par :
MAAMES Hayat

Encadré par :
Dr. ZOUAGHI Iskander (ENP)
Mr. FRADJ Reslane (LA)

Soutenu en 08 Juillet 2023, Devant le jury composé de :

M. Yacine KERCHICH : ENP - Président
M. Ali BOUKABOUS : ENP - Examineur
M. Iskander ZOUAGHI : ENP - Promoteur
M. Reslane FRADJ : ENP - Promoteur
M. Hakim OUMACHICHE : ENP - Invité

ENP 2023

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ecole Nationale Polytechnique
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel
Lafarge Holcim Algeria

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention
du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel

**Amélioration du potentiel de réduction des émissions
SCOPE 3, catégorie 4 "Upstream Transportation and
Distribution" par l'implémentation d'une solution
d'éco conduite.
Application : Logistique de Transport Lafarge Algérie**

Réalisé par :
MAAMES Hayat

Encadré par :
Dr. ZOUAGHI Iskander (ENP)
Mr. FRADJ Reslane (LA)

Soutenu en 08 Juillet 2023, Devant le jury composé de :

M. Yacine KERCHICH : ENP - Président
M. Ali BOUKABOUS : ENP - Examineur
M. Iskander ZOUAGHI : ENP - Promoteur
M. Reslane FRADJ : ENP - Promoteur
M. Hakim OUMACHICHE : ENP - Invité

ENP 2023

Dédicaces

À toutes celles et ceux qui me sont chers

À mes parents, pour leur amour, leurs sacrifices, leur dévouement conjoint, j'espère être un jour digne de vous

À ma soeur, pour son exigence, son absence de patience, sa sévérité, son courage, sa ténacité, et tout ce qu'elle m'a transmis et qui a fait de moi la femme que je suis aujourd'hui

À toutes celles et ceux dont nos chemins se sont croisés un jour pour se séparer

À toutes celles et ceux qui ont quitté cette rive pour en rejoindre une autre, en quête d'un avenir plus clément

À toutes celles et ceux dont la parole fut muselé

À toutes celles et ceux qui surent s'aimer, se battre et lutter pour leurs convictions

À toutes celles et ceux dont le courage et le dévouement sont infinis

À toutes celles et ceux qui aurait voulu mais n'ont pas pu suivre ou poursuivre leurs études par contrainte

À toutes celles et ceux qui ont compris que l'entraide est un facteur de l'évolution

À toutes celles et ceux qui prônent la paix, la bienveillance et la tolérance

À toutes celles et ceux qui me sont chers

À toutes les belles personnes que j'ai rencontré durant ma prépa à Bab El Oued, Marya, Ines, Serine, Melissa, Chakib, Rym, Amine et tant d'autres

À toutes celles et ceux qui ont fait de ces 5 dernières année une expérience humaine riche, d'échange, d'entraide, de bonne volonté et d'engagement

À toutes les personnes que j'ai rencontré durant le Hirak, avec lesquelles j'ai partagé une ambition commune et un rêve commun, celui d'une Algérie meilleure pour toutes et tous

À Amira, Fateh, Douaib, Nabil, Djaafer, Imen, Sonia, Lydia, Amine, Halima, Radia,
Rbiha, Karim

À mes amis, qui je le sais seront à mes cotés même si les années et la distance nous séparent, ceux dont la présence sera immuable, Djidji, Narimene, Yaniss, Mehdi, Ahcene

À toutes celles et ceux qui ont fait de Polytechnique une expérience plus agréable, au cluster, à l'ENB, à Space Cake, au CAP, à IEC en particulier Mehdi et Kawter, à Charity Trip en particulier Sofiane Yacine et Melissa nos petits protégés, qui ont bien grandi entre temps, à mes amis : Yousra, Yazid, Mouna, Cam, Moha, Abdou, Ryad, Stifou, Nipou, Khaled, Ines, Wiam, Hakou, Yasmine, Raouf, Selma, Aimad, Chayeb, Mahfoud, Samy, Raouf, Nesrine, Iya, Sofia.

À toi mon ami, Moh, puissions nous nous retrouver

À celles qui me supportent depuis ma tendre enfance Hadia et Yousra, je me demande souvent comment vous avez fait pour me supporter pendant ci longtemps

À Akçil pour tout ce qu'il est, tout ce qu'il représente, tout ce qu'il m'a offert et transmis, pour toutes les fois où il m'a tendu la main de manière désintéressée, sans rien attendre en retour

À toutes les belles personnes qui ont eu la chance de me rencontrer

À mes luttes, mes révoltes, ma force et ma farouche liberté

- *Hayat*

Remerciements

Tous d'abord, je tiens à adresser mes remerciements et toute ma reconnaissance à mon encadrant Monsieur Iskandar ZOUAGHI, pour m'avoir assisté, encourager, pousser de l'avant durant toute la période de mon stage, il a été d'une aide et d'un soutien précieux tout au long du déroulement de ce projet de fin d'études.

Mes incères remerciements vont ensuite à mon encadrant au niveau de Lafarge Algérie, à savoir Reslane FRADJ. Je le remercie de m'avoir challengé, endurcie, accompagné durant les 5 derniers mois, cette expérience professionnelle n'aurait pas été la même, sans lui, je lui en suis très reconnaissante, de m'avoir fait de ce projet de fin d'études une expérience, constructive et enrichissante.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble du personnel de Lafarge Algérie en Particulier : M.Rabah Zehri, M.Said Ouelhadj, Mme Hanene Belaib, M.Mecipsa Aliouane, M.Sami Ould Mouloud, M.Amine Benhadded, M.Mustapha Arab, M.Kheireddine Boumekhla, Mme Amina Kocheida M.Ali Cherif Amri, M.Zinelabidine Ouifi, M.Abdelhak Fethi, M.Salah Zerrouki, M.Mehdi Safar Bati, Mme Lamia Cherif et l'ensemble de son équipe IVMS (M.Hakim Kadri, M.Smail Krim, M.Anis Sekfali, M.Redouane Benammar, M.Adel Lesmar) qui m'ont aidé à accomplir ce travail et ont fourni les meilleures conditions de travail souhaitées.

Je saisis cette occasion pour destiner à nos professeurs du Génie Industriel, ayant contribué à notre formation mes Remerciements les plus sincères, ainsi qu'aux membres du jury qui ont pris la peine d'évaluer ce travail.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, veuille trouver ici le témoignage de ma gratitude et de ma profonde reconnaissance.

Hayat MAAMES

ملخص

ملخص هذا العمل يندرج ضمن إطار استراتيجية تخفيض الانبعاثات الكربونية في لوجستيات النقل البري لصالح لافارج الجزائر، من خلال تنفيذ حلاً للقيادة البيئية. الهدف هو تقدير إمكانية تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من خلال قياس الانبعاثات المتجنبة مقارنةً بحالة مرجعية تعني حالة بدون حل، والطريقة المعتمدة هي طريقة قائمة على الوقود وفقاً لبروتوكول GHG . ينطوي ذلك في المقام الأول على حساب انبعاثات منبع إلى عجلة لسيناريو المرجع، من خلال تقدير استهلاك الوقود لكل رحلة بأقصى قدر من الدقة، مع مراعاة عوامل مختلفة مثل الديناميكية الهوائية للمركبة، ووزن الحمولة، ونوع المسار، وعمر السيارة، بالإضافة إلى خصوصيات الطرق وحركة المرور في كل منطقة في البلاد. وفي المرحلة الثانية، سيتم قياس الانبعاثات من خلال دمج تقليل استهلاك الوقود بعد اختبار القيادة البيئية. في النهاية، يتيح هذا العمل توقع ما يمكن أن تكون عليه انبعاثات النقل والتوزيع في المرحلة العليا، من خلال تشجيع شركات النقل على اعتماد القيادة البيئية في ممارساتها التجارية.

كلمات مفتاحية : غازات الاحتباس الحراري، القيادة البيئية، التنقل المستدام، النقل في المرحلة العليا، الخدمات اللوجستية للنقل، طريقة قائمة على الوقود، تجميع البيانات، تعلم الآلة، التوقع، الانبعاثات المتجنبة، استهلاك الوقود، عوامل الانبعاثات

Abstract

This work is part of Lafarge Algeria's decarbonization strategy for road transport logistics through the implementation of an eco-driving solution. The objective is to estimate the potential reduction of greenhouse gas emissions by measuring the emissions avoided compared to a baseline situation, which represents a situation without a solution. The adopted method is the fuel-based method of the GHG protocol.

The first step involves calculating the Well to Wheel emissions of the baseline scenario by accurately estimating fuel consumption per trip, taking into account various consumption factors such as vehicle aerodynamics, load weight, type of route, vehicle age, as well as regional road characteristics and traffic.

In the second step, emissions will be measured by incorporating the fuel consumption reduction resulting from the eco-driving test. This will enable an evaluation of the emissions from Upstream Transportation and Distribution, encouraging transporters to adopt eco-driving practices in their business operations. The goal is to provide a projection of the potential emissions and incentivize transporters to embrace eco-driving in their professional practices.

Keywords : Greenhouse gases, Eco-driving, Sustainable mobility, Upstream transportation, Transport logistics, Fuel-based method, Clustering, Machine learning, Prediction, Avoided emissions, Fuel consumption, Emission factors

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la stratégie de décarbonisation de la logistique de transport routier, au profit de Lafarge Algérie, par l'implémentation d'une solution d'éco-conduite. L'objectif est d'estimer le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre en mesurant les émissions évitées par rapport à une situation de référence qui correspond à une situation sans solution, la méthode adoptée est fuel based method du GHG protocol. Cela passe dans un premier temps par le calcul des émissions Well to Wheel du scénario de référence, en estimant la consommation de carburant par trajet au plus juste, en prenant en comptes différents facteurs de consommation, aérodynamisme du véhicule, poids de chargement, type de parcours, âge véhicule, ainsi que les spécificités routières et le trafic routier de chaque région du pays. Et dans un second temps on mesurera les émissions en intégrant la réduction de la consommation de carburant à l'issue du test sur l'éco-conduite. Au final ce travail permet une projection sur ce que pourrait être les émissions issues du Upstream Transportation and Distribution en incitant les transporteurs à adopter l'éco-conduite dans leurs pratiques métiers.

Mots clés : Gas à effet de serre, Eco-conduite, Upstream Transportation, Logistique de transport, Fuel Based Method, Well to Wheel, Émissions évitées, Consommation carburant, Facteurs d'émissions

Table des matières

Table des figures	
Liste des tableaux	
Liste des sigles et acronymes	
Introduction générale	17
1 Étude de l'existant	22
1.1 Marché du ciment et position du groupe Holcim	24
1.2 Lafarge Algérie	28
1.2.1 Niveau stratégique	32
1.2.2 Niveau opérationnel	34
1.2.3 Résultats de l'analyse	53
1.3 Durabilité comme impératif	54
1.3.1 Empreinte carbone	56
1.3.2 Engagement de LA en faveur du climat	57
1.4 Énoncé de la Problématique	59
2 État de l'art	62
2.1 Cadre conceptuel lié au calcul d'émissions	63
2.1.1 Différence entre empreinte carbone et les émissions évitées	66
2.1.2 Facteurs d'émission liées à la consommation direct d'énergie	67
2.1.3 Potentiel de réchauffement planétaire	68
2.1.4 Facteurs d'émissions combustibles	69
2.1.5 Emissions Well to Wheel	71
2.2 Concepts liées à la solution	75
2.2.1 Transport et approvisionnement	75
2.2.2 Clustering et échantillonnage	80
2.2.3 Modélisation et prédiction	89
2.2.4 SCOPE 3 Catégories	97
3 Solutions et Contribution	100
3.1 Conception d'un système de transport éco énergétique	103
3.2 Consommation et facteurs d'émissions	104
3.2.1 Facteurs de surconsommation de carburant	104

Table des matières

3.2.2	Déterminants de la consommation	105
3.2.3	Facteurs de résistance au mouvement	106
3.2.4	Facteurs d'émissions véhicule Poids Lourd	107
3.3	L'Eco-conduite comme levier de réduction des émissions de GES	115
3.3.1	L'enjeu de l'éco-conduite	116
3.3.2	Principes de l'éco-conduite	116
3.3.3	Récidive comportementale	118
3.4	Interdépendance causale des indicateurs de performance de la maintenance et de l'implémentation de l'éco-conduite	119
3.4.1	Usure des véhicules	119
3.4.2	Fréquence de maintenance	122
3.5	Modélisation, Prédiction et Prévision	123
3.5.1	Estimation des paramètres du modèle K-means	123
3.5.2	Résultats du clustering	129
3.5.3	Échantillonnage	130
3.5.4	Prédiction de la consommation de carburant	131
3.5.5	Calcul des émissions	135
3.6	Test sur l'éco-conduite et prévision	137
3.6.1	Principes fondamentaux et avantages de l'éco-conduite	137
3.6.2	Déroulement et Résultat du Test	138
3.7	Emissions évitées	143
3.7.1	Reporting	145
3.7.2	Nature de l'usage d'une solution décarbonnée	154
	Conclusion et Perspectives	157
	Bibliographie	159
	Annexes	161

Table des figures

1	PVCCI par pays	18
2	Objectifs fixés pour le SCOPE 3 par le groupe Holcim à horizon 2030 . . .	20
1.1	Production de ciment dans le monde	24
1.2	Production de ciment par pays (2014-2021)	25
1.3	Evolution de l'offre et la demande du ciment en Algérie en millions de tonnes(Département marketing LA)	26
1.4	Répartition des employés et des sites de LafargeHolcim à travers les régions du monde (Rapport Lafarge Holcim- Building for Growth) 2021	27
1.5	Historique Lafarge Algérie	29
1.6	Evolution de l'offre par acteur et de la demande nationale de ciment en Millions de tonnes en Algérie	33
1.7	Analyse SWOT de Lafarge Algérie	34
1.8	Organigramme de la direction Supply Chain de LA	35
1.9	Cartographie processus Supply Chain de LA	40
1.10	Cartographie du niveau 1 du marco-processus Supply Chain	42
1.11	Cartographie du niveau 2 du macro-processus Supply Chain	43
1.12	Cartographie du niveau 3 du processus de Planification	44
1.13	Cartographie du niveau 3 du processus d'Approvisionnement	46
1.14	Cartographie du niveau 3 du processus de Production	47
1.15	Cartographie du niveau 3 du processus de Distribution	49
1.16	Analyse des 5 forces de Porter de Lafarge Algérie	53
1.17	Émissions GES global par secteur d'activité (2020)	55
1.18	Empreinte Carbone Holcim	56
1.19	Emissions relatives aux différents SCOPE de Lafarge Algérie	57
1.20	SBTi Target Holcim groupe	58
2.1	Contribution relative de chaque gaz à l'effet de serre	64
2.2	Émissions CO2 annuelles pour la combustion fossile	65
2.3	Différence entre une empreinte carbone (gauche) et les émissions évitées (droite) (GHS protocol)	66
2.4	: Représentation graphique des différents outils d'évaluation selon deux paramètres : les enjeux environnementaux considérés et le périmètre couvert (Risch et al.n.d.)	73
2.5	Modalités d'échantillonnage	82
2.6	K-Means clustering	87

Table des figures

3.1	Contribution de chaque levier à la décarbonation du fret (The Shift Project)	101
3.2	Schéma récapitulatif des facteurs de résistance au mouvement	106
3.3	Camion de type Maraîcher en mouvement sous infrarouge	111
3.4	Pneus roulant à haute vitesse sous infrarouge (DIT before you drive LA) .	120
3.5	Fréquence maintenance consommables	122
3.6	Résultats de l'échantillonnage sur la consommation de carburant	130
3.7	Moyenne de consommation par type de trajet (par cluster)	131
3.8	Régression MCO	132
3.9	Nettoyage de la base de données réalisation 2022	134
3.10	Exportation des données à partir de Power BI Desktop	135
3.11	Circuit correspondant au trajet choisi pour le test d'éco-conduite	139
3.12	Inspection pression pneus cocotte test	140
3.13	Rapport de vitesse du circuit test	140
3.14	Rapport d'évaluation conducteurs	141
3.15	Rapport d'activité globale du circuit test	141
3.16	Rapport de consommation du circuit test	143
3.17	Vision agrégée sur l'ensemble de la durée de vie de la solution (gauche) et annuelle (droite) (NZI Pilier B)	145
3.18	Arbre de décision résumant les contextes et situations de références associé	151
3.19	Vision agrégée de 2022-2030 de la différence des émissions entre les deux scénario avec et sans solution	153
3.20	Illustration de la différence entre effet décarbonant (émissions évitées) et nature décarbonée de l'usage adressé	155
21	Les contributions relatives des différentes causes du forçage radiatif entre 1750 et 2005	162
22	Répartition du parc national automobile selon le genre et la Wilaya-2018 (ONS)	163
23	Répartition du parc national automobile selon le genre et la Wilaya-2019 (ONS)	164
24	Kilométrage de chaque type de route et vitesse moyenne de circulation par Wilaya	165
25	Features du modèle K-means	166
26	Intégration des données	168
27	Courbe du coude qui casse pour déterminer le nombre optimal de classes .	169
28	Script algorithme K-means	174
29	Mesure de l'inertie inter-class et intra-class	175
30	Intégration des données d'échantillonnage	176
31	Résultats du modèle de Régression Linéaire Simple	178
32	Résultats du modèle d'Arbre de décision	179
33	Résultats du modèle de Régression Polynomiale	180
34	Résultats du modèle de Régression Polynomiale	181
35	Résultats du modèle CastBoost	182
36	Résultats du modèle AdaBoost	183
37	Résultats du modèle xgBoost	184

Table des figures

38	Résultats du modèle RandomForest	187
39	Modèle de prédiction pour les données de consommation de carburant pour le reste des rotations 2022	188
40	Aperçu du résultats de prédiction pour les 44 premières rotations	188
41	Configuration du réseau Autoroutier dans l'horizon 2025 (Réseaux routier et autoroutier en Algérie)	190

Liste des tableaux

1.1	Gamme de produits ciment	31
1.2	Répartition de la capacité de production entre les 3 usines LA	47
2.1	Principales différences entre l’empreinte carbone et les émissions évitées (Net Zero Initiative)	67
2.2	Potentiel de réchauffement planétaire par gaz (GIEC, 2007)	69
2.3	Facteurs d’émission des combustibles liquides, combustion seule (ADEME)	70
2.4	Facteurs d’émission des combustibles liquides, combustion seule (ADEME)	70
2.5	Facteurs d’émission des combustibles liquides (amont + combustion) (ADEME)	71
2.6	Description des différents périmètres existant dans l’étude des véhicules, d’après (Picherit, 2010)	72
2.7	Seuil de gêne et de saturation des différents types de voies en UVP/jour . .	78
2.8	Description de chaque niveau de LOS (Dr. Tom V. Mathew, IIT Bombay – 2014)	79
3.1	Émissions d’échappement de CO_2 de divers carburants de transport	108
3.2	Comparaison des résultats des modèles de prédiction	134
3.3	Reporting des émissions Upstream Transportation pour l’année 2022 . . .	137

Liste des sigles et acronymes

ADEME	<i>Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie</i>
ANOVA	<i>Analyse Of Variance</i>
ACV	<i>Analyse en Cycle de Vie</i>
CL	<i>Coordination Logistique</i>
DEPD	<i>Direction de Etudes et de la Prospective de Douanes</i>
DDP	<i>Delivered Duty Paid</i>
EEMA	<i>Emissions évitées de type moindre augmentation</i>
EER	<i>Emissions évitées de type réduction</i>
EU ETS	<i>European Union Emissions Trading System</i>
FE	<i>Facteur d'émission</i>
FMC	<i>First movers Coalition</i>
GES	<i>Gaz à Effet de Serre</i>
GIEC	<i>Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat</i>
GHGP	<i>Green House Gas Protocol</i>
IVMS	<i>In vehicle monitoring system</i>
LA	<i>Lafarge Algérie</i>
LCM	<i>Lafarge Ciment Msila</i>

LCO	<i>Lafarge Ciment Oggaz</i>
LDA	<i>Lafarge Distribution Algérie</i>
LLA	<i>Lafarge Logistique Algérie</i>
LOS	<i>Level of Service</i>
MAD	<i>Mise à Disposition</i>
PL	<i>Poids Lourd</i>
PVCCI	<i>Potential Vulnerability to Climate Change Indicator</i>
ONS	<i>Office Nationale des Statistiques</i>
SBTI	<i>Science-based Target Initiative</i>
SC	<i>Supply Chain</i>
SANDOP	<i>Sales and Operations Planning</i>
UVP	<i>Unité de Véhicule Particulier</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
WTW	<i>Well to Wheel</i>

Introduction générale

Les entreprises d'aujourd'hui adoptent différentes stratégies au regard des enjeux de développement durable, sous l'impulsion d'une contestation sociale ou motivé par un engagement morale et éthique, mais si cela s'avère vrai dans certains cas, ces raisons n'expliquent pas ce phénomène de conversion générale des entreprises dans tous secteurs et de différentes tailles au développement durable, les entreprises y trouvent forcément un intérêt et une profitabilité économique. En effet les entreprises adoptent des stratégies différentes en considérant les caractéristiques économiques et technologiques de leurs activités et de leurs marchés. C'est dépendamment de la configuration du marché dans laquelle l'entreprise se situe, qu'elle trouve un intérêt à opérer cette conversion.

L'évolution de la nature de la demande, l'intérêt que suscite le développement durable chez les consommateurs poussent les entreprises à adopter des mécanismes de gestion de l'obsolescence morale comprenant ainsi un registre pro-actif que l'on peut qualifier d'innovation par les valeurs. Certaines se contentent de véhiculer un discours pour soigner leur image de marque et sont parfois accusées de greenwashing, tandis que d'autres mettent en place des leviers d'action pour répondre à leur besoin en durabilité et assurer leur pérennité. Cependant en fonction du contexte le développement durable gagne plus ou moins en importance, les résultats d'une étude montre qu'il y a une corrélation entre l'intégration des enjeux de développement durable dans les stratégies d'entreprise et le contexte sociaux-économique dans lequel elles évoluent, elle révèle un engagement à la baisse du point de vue environnemental, dans le contexte de pays en développement ces comportements sont favorisés par l'absence de réglementation contraignante et la fragilité du tissu économique qui dissuadent les entreprises à se soucier du développement durable, dans ces contextes le développement économique prime sur le reste.

Or si l'on se penche de plus près sur les indicateurs de vulnérabilité au risque climatique, nous pouvons facilement comprendre que les pays en développement ont tout intérêt à se soucier de la question climatique, bien qu'ils ne soient pas les premiers responsables du réchauffement climatiques, ils sont les premiers exposés à ses risques. Dans le classement des pays les plus exposés au risque climatique, l'Algérie occupe la 32ème position pour ce qui est de l'indicateur PVCCI [1].

La vulnérabilité au réchauffement climatique est une évaluation de la vulnérabilité au réchauffement climatique utilisée pour des processus tels que l'adaptation au réchauffement climatique, les évaluations du risque climatique ou pour déterminer une justice climatique. Le concept a été défini dans le troisième rapport du GIEC comme « le degré

Introduction générale

auquel un système est sensible et incapable de faire face aux effets néfastes du réchauffement climatique, y compris dans la variabilité et les extrêmes climatiques.»

Le PVCCI est un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique, c'est un indicateur qui prend en comptes les effets dynamiques. Tourné vers le futur bien qu'établi à partir de données passées, il est construit sur la base d'une distinction entre deux sortes de risques dus au changement climatique : les risques liés aux chocs progressifs et ceux relatifs à l'intensification des chocs récurrents. Les scores de performance sont distribués de 0 à 100. Le score le plus faible traduit la meilleure situation.

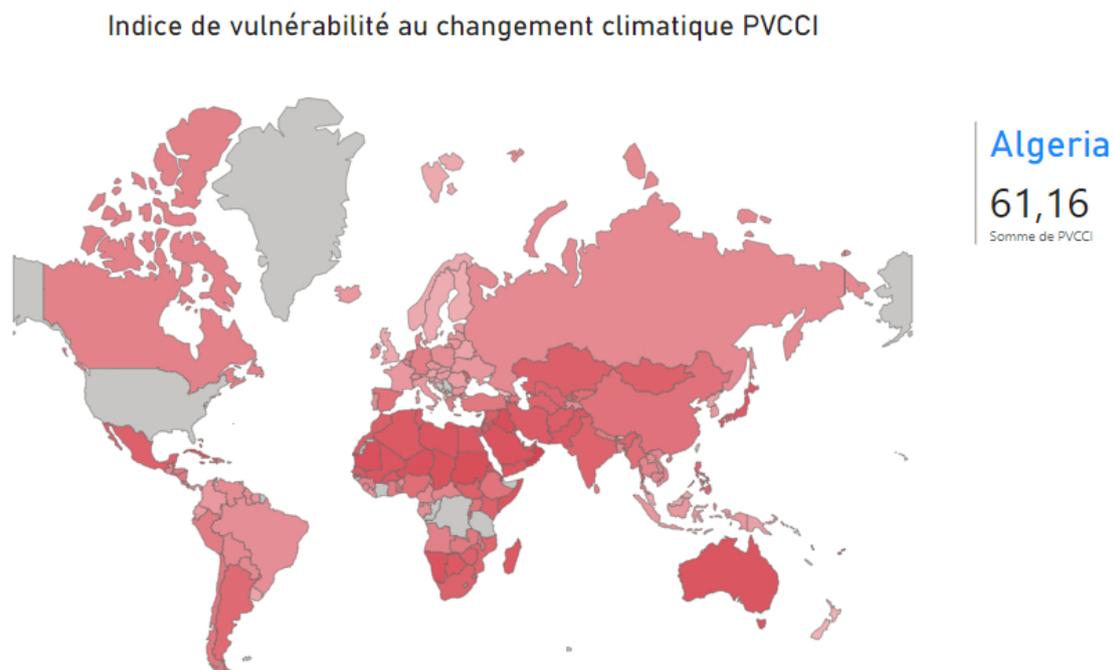


FIG. 1 : PVCCI par pays

La vulnérabilité aux réchauffement climatique, constitue en effet un risque majeur de perturbation des chaînes d'approvisionnement, et des opérations commerciales, Holcim a pris le devant en se positionnant autant que leader de la transition car le groupe intègre les enjeux de développement durable dans sa stratégie et prend très au sérieux ses risques inhérents à la crise climatique qui menacent directement la pérennité de ses activités.

A titre d'exemple, le fleuve Mississippi qui représente une importante voie navigable pour la distribution. Le bassin fluvial a une longue histoire de sécheresses et d'inondations qui ont affecté ses activités économiques (par exemple, les inondations d'avril 2011 et la sécheresse en 2021) [2]. Les niveaux d'eau élevés et bas peuvent entraver les calendriers de transport prévus, ce qui entraîne des retards. Il en résulte des interruptions d'activité et des des coûts supplémentaires.

La vulnérabilité du système de transport aux risques climatiques est amplifiée, compte tenu de l'augmentation probable des précipitations et de la fonte des glaciers, selon le dernier rapport du GIEC la plupart des ports seront impraticables d'ici 2050 si l'intelligence

collective n'est pas mise au profit d'un redressement qui nous situerait dans un scénario à moins 2°C. En effet les niveaux d'eau élevés devraient être plus fréquents dans les scénarios à 2°C et 4°C d'ici 2050.

Par conséquent, à long terme, la variabilité sécheresse-inondation sera un défi considérable. Et tant d'autres défis devront être relevés. Comme l'intermittence des énergies renouvelables, l'optimisation des rendements énergétiques, la réduction de l'empreinte carbone, la gestion durable de ressources en prévision de l'épuisement de leur épuisement, la valorisation des déchets, l'allongement du cycle de vie des produits, la réduction de la dépendance énergétique aux combustibles fossiles. Il existe en effet plusieurs risques qui menacent le monde d'aujourd'hui et l'industrie de demain.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une démarche visant à cerner l'environnement de Lafarge Algérie et identifier des leviers d'actions qui peuvent rapidement être actionnés dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre sur la SCOPE 3 et plus précisément en ce qui concerne *Upstream Transportation and Distribution*.

Lafarge Algérie est un acteur clé de l'économie et de l'industrie en Algérie, animée par une volonté croissante de réduire son impact sur l'environnement, ses objectifs en termes de durabilité s'inscrit dans le déploiement d'une stratégie groupe Holcim en terme de réduction des émissions de GES, par conséquent LA s'engage à réduire les émissions SCOPE 3 liées au transport et de la distribution en aval de 24,3% par tonne de matériaux transportés d'ici 2030 (voir figure 2). Pour ce faire, toutes les pistes d'amélioration de la performance environnementale doivent être envisagées, comme l'adoption de combustibles alternatifs au gazole, l'adoption des Green VRP pour l'optimisation des tournées de véhicules, l'augmentation du % en backhauling qui consiste à rechercher et à planifier des rotations supplémentaires pour les trajets de retour des véhicules, de manière à maximiser leur utilisation et à réduire les retours à vide, le basculement vers camion électrique, voir d'autres types de motorisations qui s'alimentent en bio-carburant ou en hydrogène vert...etc.

Toutes ces pistes permettent des gains de performances en terme de réalisation d'objectifs de neutralité carbone, mais nécessitent des coûts d'investissement colossaux, c'est dans la perspective de proposer une alternative smart et peu coûteuse que l'éco-conduite se présente comme un levier de réduction des émissions à fort potentiel, qui permet de réaliser d'une part une rentabilité financière et d'autre part de réduire les émissions de GES progressivement, en attendant d'intégrer des solutions complémentaires qui permettraient des gains plus importants.

Pour répondre efficacement à une problématique encore faut il la formuler correctement, l'apport d'une solution n'a de valeur ajoutée que si elle répond à un problème concret, hors et cela fera l'objet d'une démonstration tout au long du travail qui suit, la consommation de carburant pour le transport est supérieure à la moyenne de consommation des standards constructeurs. Cela engendre à la fois un coût de surconsommation pour les transporteurs ainsi que pour LA. En conséquence de cette surconsommation, les émissions SCOPE 3 sont plus élevées qu'elles ne devraient l'être. Si l'enjeu serait de réduire les émissions de GES, il faudrait dans un premier temps identifier les sources et les causes



FIG. 2 : Objectifs fixés pour le SCOPE 3 par le groupe Holcim à horizon 2030

de surconsommation énergétique, apporter une solution au problème compte tenue des contraintes, et envisager par la suite des perspectives d'amélioration continue.

Ce travail tente d'esquisser une réponse à la question qui suit :

”Comment réduire de manière efficace et durable les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du transport de marchandises, tout en garantissant l'efficacité logistique et en répondant aux besoins croissants de mobilité des marchandises ?”

Cette problématique soulève la question de la recherche de solutions concrètes pour réduire les émissions de GES dans le transport de marchandises, en tenant compte des défis logistiques et des demandes croissantes en matière de mobilité. Elle met l'accent sur l'importance d'identifier des mesures efficaces, durables et équilibrées qui permettent de concilier la réduction des émissions avec les exigences de l'activité économique.

Cette question principale se déclinera à son tour en trois (3) sous questions :

1. Comment identifier les facteurs d'émissions liées à la combustion des combustibles liquides ?
2. Comment estimer au plus juste les émissions de GES compte tenue de la complexité multifacteurs de la consommation de carburant ?
3. Comment estimer au plus juste les émissions évitées en adoptant l'éco-conduite ?

Afin de répondre à cette question, et de bien mener notre mission au sein de l'entreprise, notre travail s'est articulé autour de trois (3) chapitres et structurés de la façon suivante :

- Le premier chapitre fait office d'une analyse de l'existant, présentant d'abord le marché du ciment et le contexte économique et social qui caractérise l'Algérie. Ainsi qu'une analyse du niveau stratégique et organisationnel.
- Le second chapitre quant à lui, présentera un état de l'art sur les différents concepts liés à la problématique (notion d'émissions, facteurs d'émissions, émissions évitées,

pouvoir de réchauffement climatique, émissions WTW), les concepts liées à la solution (transport routier de marchandise, estimation des vitesses de circulation, indice de congestion routière, échantillonnage, modèle de machine learning employé...etc).

- Le troisième chapitre porte sur la solution proposée, la méthodologie adoptée pour le calcul des émissions, le choix du référentiel de calcul, l'estimation des déterminants trajets de la consommation de carburants (vitesse, indice de congestion routière, LOS), identification de groupe homogène par rapport à la distribution des données, pour la réalisation d'un échantillonnage ciblé et représentatif, estimation de la consommation de carburant à travers l'entraînement d'un modèle d'apprentissage supervisé sur les variables qui expliquent la consommation de carburant (Poids de chargement, vitesse moyenne, type de trajet, type de camion...etc), calcul d'émissions, résultats du test sur l'éco-conduite.

Chapitre 1

Étude de l'existant

Introduction

L'industrie cimentière joue un rôle crucial dans notre société en fournissant le matériau essentiel pour la construction d'infrastructures et de bâtiments. Cependant, en tant que l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre, cette industrie est également confrontée à un défi majeur en matière de durabilité environnementale. La décarbonisation du secteur cimentier revêt une importance capitale pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cela implique non seulement la mise en œuvre de technologies innovantes et de pratiques plus respectueuses de l'environnement dans les processus de production, mais également la transformation du transport de marchandises, un maillon clé de la chaîne de valeur de cette industrie. Dans ce contexte, Lafarge Algérie, autant qu'entreprise cimentière joue un rôle crucial en tant qu'acteur majeur du marché. Sa position privilégiée lui permet d'exercer une influence significative sur ses fournisseurs en matière d'adoption de stratégies qui font sens avec les enjeux de développement durable. En adoptant des standards élevés et en se positionnant comme un précurseur en Algérie d'une stratégie bas carbone, elle encourage non seulement ses concurrents à s'aligner sur ses standards mais surtout ses fournisseurs à adopter des pratiques métiers plus respectueuses de l'environnement, l'entreprise peut catalyser un changement positif et proactif à travers toute la chaîne d'approvisionnement. En ce sens l'intégration des parties prenantes de la chaîne de valeur, y compris les fournisseurs de services de transport, dans le déploiement d'une stratégie bas carbone est essentiel à sa réussite. La coopération avec les différents acteurs et l'établissement de partenariats solides sont essentielles pour surmonter les obstacles et mettre en œuvre des solutions efficaces. Le processus de transition vers une économie plus verte nécessite une collaboration étroite et une vision partagée entre tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement. On comprend que le pouvoir de négociation de l'entreprise joue un rôle crucial dans la promotion de pratiques métiers plus soucieuses de l'environnement. En usant de son influence l'entreprise peut encourager l'adoption de pratiques éco-responsables.

Le chapitre qui suit, vient justement mettre en évidence les éléments cités plus haut, à travers une présentation dans premier temps du marché mondial et national du ciment, ainsi que ses principaux producteurs. Nous ferons un zoom sur le groupe mondial Holcim ainsi que ses chiffres clés et ses objectifs en terme de réduction des émissions de GES. Par la suite nous aborderons une analyse SWOT et une analyse de l'offre et de la demande sur le marché local, pour justement cerner l'environnement concurrentielle et positionner Lafarge Algérie par rapport à ce marché. Dans un second temps, nous nous intéresserons évidemment de plus près au fonctionnement de la structure qui nous accueille, le département Supply Chain. En expliquant le rôle de chaque service dans la création de la valeur qui permet à LA d'occuper sa position dominante sur le marché. L'analyse des 5 forces de Porter interviendra comme un argument d'appui par rapport à la faisabilité de l'implémentation d'une solution chez un tiers (dans notre contexte les fournisseurs de transport).

En dernier lieu, on reviendra sur la notion de durabilité telle qu'elle est conçue chez Holcim groupe et Lafarge Algérie et en quoi la solution proposée s'aligne avec ses objectifs de réduction des émissions CO_2

1.1 Marché du ciment et position du groupe Holcim

Le marché mondial du ciment a atteint 363,2 milliards de dollars en 2022. Selon une étude, ce marché devrait atteindre 518,5 milliards de dollars US d'ici 2028, avec un taux de croissance (CAGR) de 6,22% entre 2023 et 2028. Le marché mondial du ciment n'a cessé de croître durant ces dernières années. Cette croissance est tirée par une demande de plus en plus forte et indépendante des crises économiques. L'augmentation de la population mondiale et l'urbanisation rapide entraînent une demande croissante pour la construction de bâtiments résidentiels et commerciaux. Ceci, ainsi qu'une augmentation significative du remodelage, de la rénovation et de la reconstruction d'infrastructures et le développement de mégaprojets d'infrastructure dans plusieurs pays, catalysent la demande de ciment dans le monde entier. En outre, la tendance émergente de la famille nucléaire entraîne un besoin croissant d'espaces résidentiels, ce qui a une influence positive sur le marché. L'introduction de technologies avancées dans le processus de fabrication du ciment renforce également la croissance de ce marché.

Plusieurs perspectives très favorables pour le marché du ciment voient le jour, l'utilisation croissante du ciment vert dans la construction de bâtiments écologiques et durables afin de réduire les émissions nocives et de soutenir la santé de l'environnement crée également des perspectives positives pour le marché. L'escalade de matériaux préfabriqués, y compris les blocs, les panneaux de toiture et les tuiles, offre des opportunités de croissance lucratives aux fabricants. Ceci en conjonction avec l'expansion des projets publics dans divers pays qui investissent de plus en plus dans l'amélioration de l'infrastructure existante. A chaque seconde dans le monde, sont coulés 146 000 kilos de ciment, soit 4,6 milliards de tonnes par an. Ce chiffre ne cesse d'augmenter si on se réfère à l'évolution de la production mondiale de ciment qui est en augmentation quasi constante depuis plus de 20 ans. En effet, la production du ciment est passée de 1500 Millions de Tonnes en 2000 à 4500 Millions de Tonnes en 2015. La Chine reste, et de loin, le premier producteur avec 57,5% du total mondial, suivi par l'Inde, les USA et le Vietnam. La production se chiffre aujourd'hui à 4100 Millions de tonnes comme le montre la figure suivante :

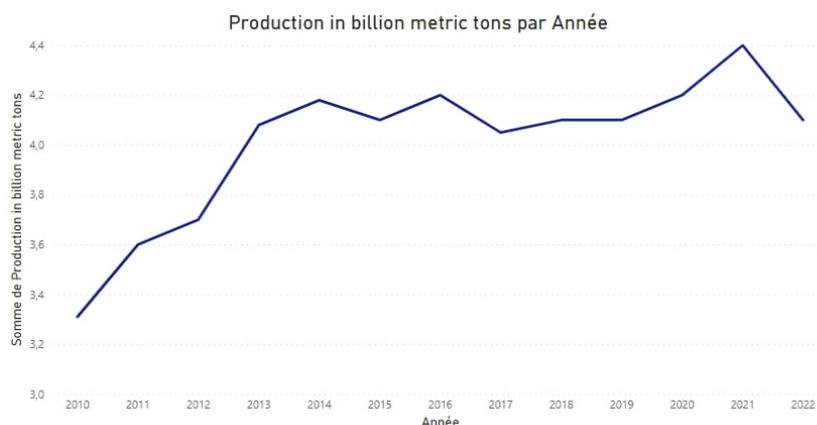


FIG. 1.1 : Production de ciment dans le monde

Chapitre 1. Étude de l'existant

L'une des caractéristiques les plus importantes de l'industrie du ciment est d'avoir une production essentiellement locale. En effet, 90% du ciment consommé dans le monde est utilisé dans les pays producteurs, une optique envisagée dans l'objectif de minimiser les coûts de transport. Le coût de transport routier du ciment est assez élevé, la distance entre les cimenteries et les clients ne doit pas dépasser 300 Km pour être rentable, toutefois, le ciment peut être expédié à plus faible coût sur de grandes distances par bateau. Le lieu d'implantation d'une cimenterie et le coût du transport ont une grande incidence sur la compétitivité de l'entreprise. Toujours en compétition et afin de remédier à ce problème, les cimentiers installent leurs unités de production à proximité des réserves de calcaire et d'argile offrant ainsi un accès aisé à une source d'énergie fiable. Ci-dessous, sont présentés les 10 plus grands producteurs de ciment dans le monde entre 2015 et 2019.

Pays	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Chine	2,480	2,350	2,410	2,000	2,200	2,200	2,400	2,500
Inde	260	300	290	290	300	320	295	330
Vietnam	60.50	67.40	70	78.80	90.20	95	98	100
États-Unis	83.20	84.30	85.90	107	87	89	89	92
Égypte	50	55	55	53	81.20	76	42	40
Indonésie	65	58	63	65	75.20	74	65	66
Turquie	75	71.40	77	80.60	72.50	51	72	76
Iran	65	58.60	53	54	58	60	68	62
Corée du Sud	63.20	51.70	55	56.50	57.50	55	48	48
Japon	53.80	54.80	56	55.20	55.30	54	51	52
Russie	68.40	62.10	56	54.70	53.70	57	56	56
Brésil	72	65.30	60	53	53	55	61	65
Arabie saoudite	55	61.90	61	47.10	45		53	55

FIG. 1.2 : Production de ciment par pays (2014-2021)

L'Asie-Pacifique domine actuellement nettement le marché en particulier la Chine, en raison de l'urbanisation rapide et de l'augmentation des projets d'infrastructure dans la région. Le paysage concurrentiel du marché montre que les principaux acteurs de l'industrie sont CNBM International Corporation, Anhui Conch Cement Co, Jidong Development Group Co, LafargeHolcim Ltd et HeidelbergCement AG.

Le marché du ciment en Algérie a connu beaucoup de rebondissements lors de ces dernières décennies. Tandis que le secteur industriel ne cesse de croître et de gagner en maturité avec notamment l'entrée du groupe Lafarge Holcim, la demande nationale en matière de ciment quant à elle ne cesse d'augmenter, elle est passée de 4 millions de tonnes en 1980 à 26 millions de tonnes en 2015.

Cette hausse est expliquée par les nombreux projets d'urbanisme et de Méga projets entrepris par le gouvernement Algérien tels que la grande mosquée d'Alger, Engendrant ainsi un déséquilibre de l'offre et de la demande sur le marché du ciment en atteignant un pic de déficit de 6 Million de tonnes en 2016 « Cela fait plus de cinq ans que la pénurie du ciment se pose de manière récurrente notamment durant l'été qui connaît habituellement le lancement de projets de construction et des travaux d'aménagement des habitations »

Chapitre 1. Étude de l'existant

a déclaré M. Abdelkrim Selmane de l'Association Générale des Entrepreneurs Algériens (AGEA) en 2013.

Cette situation est justifiée, selon les distributeurs et détaillants, par le déficit du ciment qui n'est pas couvert par la production locale. Pour remédier à ce problème, le gouvernement optait à chaque fois pour l'importation avec une facture de plus en plus lourde.

Selon les données du CNIS (Centre national de l'informatique et des statistiques des Douanes, 2016), ces importations ont atteint 3,4 milliards de dollars en 2015. Seulement, 5 ans après, l'Algérie se retrouve avec un nombre important d'usines de production de ciment et une offre qui a atteint 41 millions de tonnes alors que la demande ne dépasse pas 24 millions de tonnes.

Cette surcapacité estimée à 17 millions de tonnes est dû au fait de sur l'investissement de l'état Algérien dans l'industrie cimentière, l'attribution d'agrément autorisant l'entrée en lice des nouvelles usines et dédoublements de lignes de production, causant en 2 ans l'augmentation de 100% de la capacité de production en Algérie qui fut décrit comme une hérésie industrielle et financière.

Permettant ainsi à l'Algérie de passer du statut d'importateur à celui d'exportateur de ciment. Les exportations algériennes du ciment ont dépassé 46 millions de dollars durant les huit premiers mois de 2019, une hausse exceptionnelle de près de 275%, en comparaison avec la même période de l'année d'avant, selon la direction des études et de la prospective des Douanes (DEPD).

L'excédent dans la production du ciment devrait atteindre au cours des cinq prochaines années, selon le ministère de l'industrie et des mines, entre 10 et 15 millions de tonnes, ce qui permettra de porter les exportations de ce matériau de construction à 500 millions de dollars. Le graphe 1.3 illustre exactement la situation évolutive de surabondance.

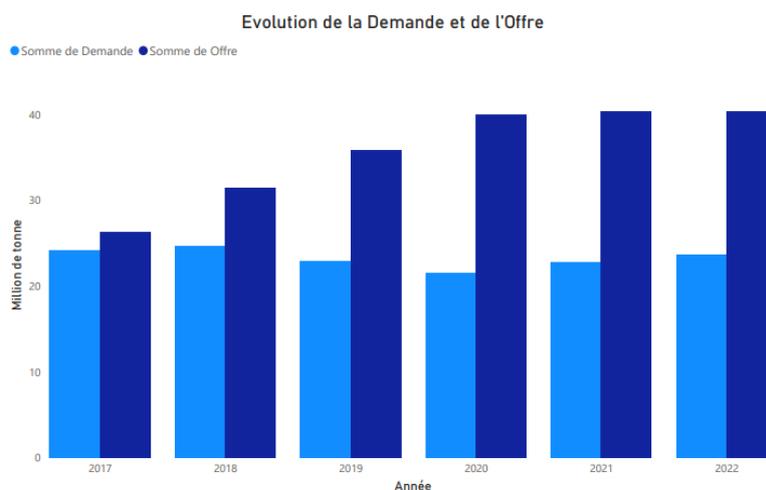


FIG. 1.3 : Evolution de l'offre et la demande du ciment en Algérie en millions de tonnes(Département marketing LA)

Présentation du groupe Holcim

LafargeHolcim Ltd est une multinationale Suisse, issue de la fusion en 2015 de Lafarge et Holcim. Présente dans 60 pays à travers le monde, avec une capacité de production de 353 millions de tonnes par an, elle emploie près de 70 000 collaborateurs. Il s'agit du leader mondial des matériaux et des solutions de construction, avec un chiffre d'affaire élevé à 29,2 milliards d'euros (2021), dont 56.16% dans le ciment et 17,8% dans le béton et les granulats.



FIG. 1.4 : Répartition des employés et des sites de LafargeHolcim à travers les régions du monde (Rapport Lafarge Holcim- Building for Growth) 2021

LafargeHolcim est présente sur 4 segments d'activités et offre une gamme de produits diversifiée :

Le Ciment : Il s'agit du produit principal de l'entreprise, répondant à un large éventail de besoins clients. Avec 266 usines de ciment et de broyage à travers le monde, LafargeHolcim offre la plus large gamme de ciments sur le marché au monde. Il s'agit notamment de fournir également des solutions pour les clients travaillant dans des environnements différents, tels que les environnements humides et les climats rigoureux. Le service de l'entreprise ne s'arrête pas à la vente du produit mais s'étend au support technique, logistique de commande et de livraison, documentation, démonstrations et formation.

Les agrégats : Ce segment fournit un large éventail de clients qui comprend les producteurs de béton et d'asphalte, fabricants de produits préfabriqués et entrepreneurs en construction et travaux publics de toutes les tailles.

LH dispose de 661 usines d'agrégats au monde, ces derniers sont produits souvent par l'extraction et le concassage de roche dure, de plus, l'entreprise fournit granulats recyclés, qui peuvent être fabriqués à partir des déchets de construction ainsi que des restes de matériaux après démolition, en particulier dans les zones urbaines. Ces agrégats recyclés remplacent le besoin pour l'extraction dans les carrières et contribuent à une véritable économie circulaire dans le bâtiment.

Béton prêt à l'emploi : Le béton est le deuxième bien le plus consommé au monde

après l'eau, ce qui en fait un grand marché pour les industries de ciment et de granulats. Bien que la production de béton prêt à l'emploi soit moins capitale que la production de ciment pour LafargeHolcim, cependant le groupe réussit à établir une présence internationale sur ce marché avec 1448 usines sur les 5 continents. Les acheteurs de béton prêt à l'emploi sont généralement des entreprises de construction et de travaux publics, des grandes multinationales et des petits clients.

Solutions et produits : Ce segment concerne la vente de l'asphalte, du mortier, des produits en béton ainsi qu'une gamme d'autres solutions à travers les segments produits. Les applications vont de rénovations à petite échelle de nouvelles constructions à des projets de grandes infrastructures. Au cœur de l'offre Solutions and Produits se trouve aussi l'engagement à fournir aux clients un portefeuille qui complète le ciment, béton et agrégats vendus. Ces innovations et les solutions à valeur ajoutée représentent un moteur de croissance avec environ 3,6 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2020 [3].

1.2 Lafarge Algérie

Le secteur de la construction est en croissance continue depuis le début des années 2000 en Algérie, avec d'importants besoins en matériaux de construction et solutions constructives. Lafarge Algérie représente ainsi le 3ème marché le plus important stratégiquement pour le groupe mondial. Lafarge s'est installée en Algérie en 2002 suite à un partenariat COLPA « Lafarge et Cosider » dans le cadre d'une usine de production de plâtre à Rouïba. Lafarge construit en Algérie l'année suivante (2003) l'usine de ciment de M'sila, la plus importante sur le territoire national et renforce par la suite davantage sa présence dans le pays et dans l'ensemble du marché méditerranéen après le rachat des opérations d'Orascom en 2007.

Aujourd'hui, Lafarge Algérie est un acteur principal sur le marché Algérien, à la fois producteur et exportateur, l'entreprise est présente sur toute la chaîne de valeur des matériaux de construction : Agrégats, Ciments, Mortiers, Granulats, Bétons, Plâtres, Sacs jusqu'à la logistique et la distribution. Lafarge est un acteur principal dans le marché du ciment en Algérie. En étant fortement engagée dans le développement économique, social et environnemental, l'entreprise emploie près de 4 500 employés et possède 3 cimenteries avec une capacité totale de 11.9 Mt/an, 1 centre de distribution, une ligne de supermarché de matériaux de construction « BATISTORE » et un laboratoire de recherche « CDL » qui est le premier en Afrique. Ce dernier permet à Lafarge de proposer des produits innovants en matière de solutions de construction, ainsi que de générer des avantages concurrentiels indispensables vu l'intensité concurrentielle actuelle dans ce marché.

Historique : Les origines de Lafarge remontent à 1833. Sa création débute en Ardèche en France par Joseph-Auguste Pavin de Lafarge qui entame des opérations d'exploitation de carrières de calcaire. Dès 1864, le groupe français des chaux et des ciments commence à élargir son marché en allant vers la mondialisation, en livrant 200 000 tonnes de chaux hydraulique en Égypte pour la construction des jetées du canal de Suez. Cette réussite

Chapitre 1. Étude de l'existant

lance le groupe dans une aventure dans la région nord-africaine et s'implante pour la première fois en Algérie en 1866 en ouvrant une agence à Alger. L'entreprise a connu par la suite une évolution et est devenu en 1947 le premier producteur de ciment en France et en Afrique du Nord. Lafarge a renforcé sa position en réalisant plusieurs fusions, acquisitions en 2014 elle annonce le projet de fusion LafargeHolcim.

Cette fusion se concrétise en 2015. Le fabricant de matériaux de construction LafargeHolcim Ltd est né de la fusion de la société française Lafarge et de la société suisse de matériaux de construction Holcim. L'union a réuni deux des plus grandes entreprises mondiales de l'industrie du ciment. LafargeHolcim Ltd. est divisé en plusieurs segments, dont le ciment représente le plus gros segment 2020, avec un chiffre d'affaires supérieur à 15 milliards de francs suisses. Avec cette fusion, le Groupe cherche à se restructurer.

En 2020, LafargeHolcim a vendu plus de 190 millions de tonnes de ciment à l'échelle mondiale, dont 44,6 millions de tonnes en Europe. L'entreprise de matériaux de construction exploite des cimenteries dans le monde entier. Avec 117, la société possède le plus grand nombre d'usines dans la région Asie-Pacifique. La même année, le fabricant de matériaux de construction employait dans le monde environ 67.400 personnes au total, dont près de la moitié travaillait dans le secteur du ciment.

La figure 1.5 résume les événements les plus importants de Lafarge :

Historique Lafarge	Historique Holcim
1833 : Naissance de la société Lafarge au Teil (Ardèche, France). Joseph-Auguste Pavin de Lafarge a commencé des opérations d'extraction régulières dans les carrières de calcaire.	1912 : Holcim est né avec l'ouverture d'une première cimenterie à Holderbank (Suisse) par Adolf Gysi, rejoint deux ans plus tard par l'industriel visionnaire Ernst Schmidheiny
1864 : Premier grand projet: le canal de Suez. Lafarge a remporté le «contrat du siècle» en Egypte et livré les 200 000 tonnes de chaux hydraulique nécessaires à la construction des piles du canal de Suez	1922-1931 : franchir les frontières. La société a commencé à investir dans des activités de ciment dans d'autres pays européens et en Egypte, au Liban et en Afrique du Sud.
1887 : premier laboratoire de recherche au monde sur le ciment. Après son succès commercial, Lafarge a ouvert un laboratoire de recherche près du Teil, en France. Ce laboratoire a été le premier au monde à se spécialiser dans le ciment.	1942 : Création du centre de recherche et d'essais Technische Stelle Holderbank (Centre technique Holderbank).
Années 50-70 : Expansion internationale en Amérique du Nord et du Sud. Grâce à la construction d'usines et aux acquisitions d'entreprises.	1952-1961 : une décennie d'expansion accrue. En 1960, suite à l'entrée sur le marché canadien, une grande usine de production de ciment a été ouverte au Michigan (USA). Presque simultanément, Ernst Schmidheiny a investi dans une petite usine près de São Paulo (Brésil).
Années 80-90 : à l'échelle mondiale. Lafarge a mené une importante expansion internationale avec de nouvelles opérations en Afrique subsaharienne et orientale ainsi qu'en Chine, en Inde et en Corée du Sud.	1962-1991 : un groupe mondial. Holderbank a entamé une phase d'expansion en Amérique latine. En 1974, Holderbank a fait ses premiers pas en Asie avec une participation aux Philippines.
2008 : Acquisition d'Orascom Cement. Le premier groupe cimentier du Moyen-Orient et du bassin méditerranéen.	1974 : Holderbank a fait ses premiers pas en Asie avec une participation aux Philippines. Plus tard, Holderbank a commencé à explorer de nouveaux marchés: l'Espagne en 1980 et l'Europe de l'Est, la Chine, l'Inde et l'Asie du Sud-Est au début des années 1990. 2001 : Le nom de la société est changé en Holcim par un vote lors de l'assemblée générale annuelle.
2014 : Holcim et Lafarge ont annoncé leur projet de fusion.	
	
2015 : Clôture de la fusion qui a donné naissance à LafargeHolcim, le nouveau leader de l'industrie des matériaux de construction.	
	

FIG. 1.5 : Historique Lafarge Algérie

Organisation Lafarge Algérie

Lafarge Algérie emploie 4500 collaborateurs et est fortement engagée dans le développement économique, social et environnemental en Algérie, et se compose de 10 entités juridiquement indépendantes, chacune gère des activités propres à son entité :

- **Lafarge Ciment Msila (LCM)** : C'est la première usine de production de clinker et ciment gris du groupe, ainsi que la plus grande en Algérie, elle est située à Msila avec une capacité autour de 5.2 Mt/an.
- **Lafarge Ciment Oggaz (LCO)** : Située à Oggaz, Mascara. Elle est spécialisée dans la production du ciment et clinker gris et blanc, avec une capacité de production de 3.8 Mt/an.
- **Ciment Lafarge Souakri (CILAS)** : Située à Biskra en partenariat avec le Groupe Souakri, sa capacité de production s'élève à 2.7 Mt/an.
- **Cosider Lafarge Plâtre Algérie (COLPA)** : Filiale créée en partenariat avec Cosider, assure la production de plâtre grâce à une usine située à Bouira avec une capacité de 450 Kt/an.
- **Lafarge Logistique Algérie (LLA)** : Filiale de Lafarge Algérie s'occupant de la gestion des opérations logistiques de distribution aux clients finaux, ou entre les différentes filiales de l'entreprise.
- **Lafarge Service Algérie (LSA)** : Une filiale qui s'occupe de l'ensemble des opérations administratives du groupe en Algérie.
- **Ciments et Mortiers d'Algérie (CMA)** : Filiale spécialisée dans la production de mortiers et ciments spéciaux avec une capacité totale de 100 Kt/an, située à Meftah, en partenariat avec le Groupe Souakri.
- **Lafarge Sac (LS)** : S'occupe de la production des sacs de conditionnement du ciment, située à Bourj-Bou-Arrerij.
- **Laboratoire de Développement de la Construction (CDL)** : a pour principale mission la recherche et l'innovation dans le domaine du ciment et construction

Gamme de produits ciment LA

La gamme de produit de Lafarge Algérie est assez diversifiée, chaque type de ciment répond à une application spécifique :

Chapitre 1. Étude de l'existant

Type	Nom	Caractéristiques
Gris	 Makaouem	C'est un ciment résistant aux sulfates. Il est destiné aux réalisations en milieu chimiquement agressifs, notamment humides (eaux de mer, canalisation, etc.)
Gris	 Chamil	Ciment à usages courants, c'est un ciment de haute qualité Il représente le choix idéal pour des constructions à usage habitation et commercial : Construction générale, finitions, éléments préfabriqué, etc.
Gris	 Matine	C'est un ciment destiné aux constructions qui nécessitent performance et haute résistance.il se caractérise notamment par son durcissement très rapide, sa faible demande en eau, sa compatibilité avec tous types d'adjuvants, etc.
Gris	 SARIE	Ultra Haute Performance pour les grands projets. Le SARIE, destiné aux ouvrages d'art et à la préfabrication.
Blanc	 Malaki	Ciment blanc pour réalisation de bétons haute performance, de finition et adapté à la production de carreaux de dalles.

TAB. 1.1 : Gamme de produits ciment

Afin de répondre au mieux aux besoins de ses clients, les produits de LA sont commercialisés selon 3 types de conditionnement :

- **Sac** : l'emballage sous lequel le ciment est commercialisé et vendu à l'unité.
- **Vrac** : Ciment brut non emballé transporté par un type de camion spécial appelé camion cocotte ou camion-citerne.
- **Palette-less** : Sacs de ciments entreposés puis palettisés avec un film.

1.2.1 Niveau stratégique

Cette analyse se décompose en 2 parties, la première concerne l'analyse de l'offre et de la demande du ciment sur le marché algérien, cela permet de mieux cerner l'environnement concurrentiel de Lafarge Algérie. La seconde analyse porte sur une analyse SWOT qui apportera une réflexion sur les différentes forces, faiblesses, opportunités et menaces de l'entreprise, pouvant potentiellement avoir une incidence sur la performance de la Supply Chain. Cette analyse répond à un double objectif :

- Evaluer les différents facteurs susceptibles d'avoir une incidence positive ou négative sur l'activité de Lafarge Algérie.
- Identifier les opportunités dont LA peut tirer profit et menaces auxquelles elle s'expose sur un plan stratégique.

Analyse de l'offre et de la demande

Analyse de la demande : Jusqu'en 2015, la demande nationale du ciment n'a cessé de croître, passant de 15 Mt à 27 Mt. Ceci s'explique par l'émergence d'une masse de projets engagés durant ces années. Tels que le Métro d'Alger et Mosquée El Djazaïr. En contrepartie, la production nationale du ciment ne permettait pas de couvrir cette demande grandissante et connaissait des pénuries fréquentes. Ainsi, en s'appuyant uniquement sur l'offre interne, beaucoup de ces projets étaient entravés obligeant le recours de l'Etat Algérien à l'importation du ciment pour satisfaire cette demande. Son ciment était vendu en totalité à la sortie d'usine et la livraison assurée auprès d'une liste de clients préétablie.

Néanmoins, suite à la crise économique en 2016 et la baisse du prix du pétrole, beaucoup de projets notamment de construction ont été gelés. Engendrant une baisse de demande remarquable. En 2018, cette baisse était estimée à 12%. Le graphe de la figure illustre bien la chute de la demande du ciment tout au long de la période entre le deuxième semestre de 2016 et le premier semestre de 2018.

Analyse de l'offre : Pendant que la demande sur le marché du ciment a connu une baisse, l'offre quant à elle a connu une forte hausse durant ces dernières années. Les restrictions de l'État aux importations du ciment ont induit l'extension des usines existantes et la naissance de nouveaux acteurs privés investissant dans ce secteur avec une augmentation des capacités de production. Ce qui a conduit à un basculement du marché. Le tableau ci-dessous montre l'évolution de la capacité de production de chaque acteur sur le marché depuis l'année 2015.

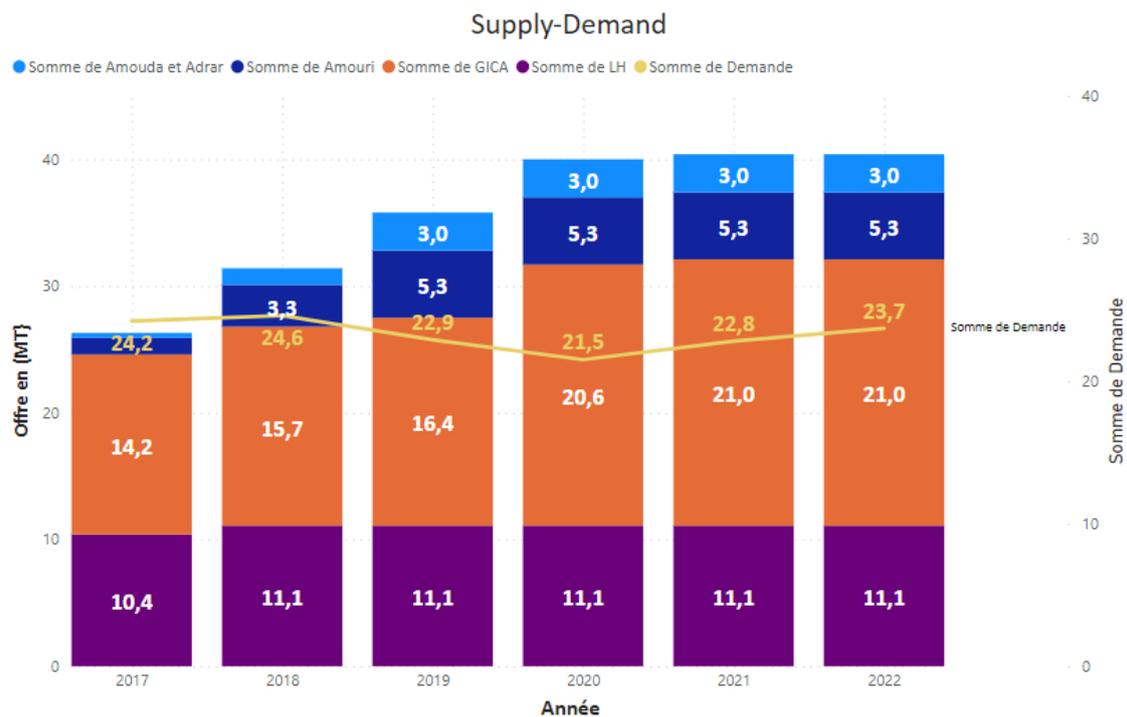


FIG. 1.6 : Evolution de l'offre par acteur et de la demande nationale de ciment en Millions de tonnes en Algérie

Le marché est passé du « Sold Out » au « Sold In », les producteurs comme Lafarge Algérie ont dû faire face à ce basculement et se sont retrouvés avec une offre excédentaire par rapport à la demande sur le marché national. Comme nous pouvons le constater, la surcapacité est passée d'une valeur négative à une valeur positive. Cette nouvelle configuration a conduit LA à lancer l'activité d'exportation du clinker et du ciment.

Analyse SWOT

Afin d'établir le diagnostic stratégique de Lafarge Algérie, nous avons procédé à une analyse SWOT dans le but de cerner le macro environnement de l'entreprise, les objectifs stratégique en terme de développement durable et l'adaptation de cette réponse à la réalité de son environnement. En ce sens la matrice SWOT peut être considérée comme l'outil stratégique le mieux adapté à l'évaluation de la pertinence d'une stratégie qui se veut proactive, comme celle adoptée par LA, qui a pour ambition d'être un précurseur en terme d'offre de produits et services avec un bilan carbone plus respectueux de l'environnement. Cet outil permet d'aboutir à une vision synthétique d'une situation en présentant les Forces et les Faiblesses de l'entreprise ainsi que les Opportunités et les Menaces potentielles. La Figure 1.7 représente le résumé de l'ensemble des forces, faiblesses, opportunités et menaces dont fait face Lafarge Algérie.

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • LH maîtrise ses coûts de production • Offre diversifiée avec le ciment, gypse, geocycle, agrégat, mortier • Forte image de marque qui permet de vendre le produit à un prix premium • Expérience et transfert du savoir-faire à travers l'expérience du groupe • Potentiel d'innovation élevé grâce au CDL et la R&D • Certification au système management environnementale ISO 14001 sur 100 % des sites • La Road Safety est un pilier important pour LA, qui se fixe comme objectif zéro accident 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> • Géographiquement les usines sont éloignées des ports • Couverture du marché non-équilibrée sur le territoire dû au positionnement des usines et l'implémentation de certains concurrents • Nombre restreint de fournisseur pour les achats sensibles • Concurrence Turque rude qui contraint LHA à s'aligner avec le prix du marché • Surestimation des capacités de transport
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nouveaux concurrents en cours d'investissement • Le seul producteur de ciment à proposer un service de livraison de qualité • Amélioration du service client • Pionnier dans le positionnement sur le marché du ciment durable avec le lancement d'Eco planet • Potentiel d'exportation croissant avec une demande tirée par le marché, notamment en Asie • Commercialisation d'offres de services et de produits durables avec l'activité Geocycle 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveau des ventes informelles élevé • Nouveaux entrants sur le marché • Priorisation des entreprises nationales par l'État • Instabilité de la gestion des affaires dans le pays • Gel des projets publics, par la crise économique et politique • Contraintes logistiques (procédures douanières lourdes, états des routes, bureaucratie) • Menace sur l'export à cause du Carbon Border Adjustment Mechanism • Risque de crise du marché pétrolier pouvant conduire à une hausse des prix de l'énergie

FIG. 1.7 : Analyse SWOT de Lafarge Algérie

1.2.2 Niveau opérationnel

Dans ce qui suit, nous allons procéder à une analyse au niveau organisationnel, pour mettre en évidence les liens et interactions entre les différents services de la direction SC, cerner l'environnement interne de Lafarge Algérie et comprendre la dynamique entre les différents acteurs de la chaîne de valeur du ciment en Algérie.

Cette analyse se basera sur plusieurs éléments, dont une vue d'ensemble du processus de la Supply Chain (SC), une cartographie des processus utilisant le référentiel SCOR, et une analyse des 5 forces de Porter. L'objectif est d'identifier les dysfonctionnements et les défis liés à la décarbonisation de la Supply Chain, ainsi que les relations entre les acteurs de la chaîne de valeur. Cela permettra également d'envisager l'intégration des parties prenantes dans la stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en particulier les émissions indirectes de type downstream transportation associées au SCOPE 3.

Cette analyse répond à 3 objectifs :

- Identifier les leviers de réduction des émissions de GES
- Mesurer le niveau d'intégration des acteurs de la chaîne de valeur dans la stratégie de décarbonisation
- Cerner le pouvoir de LA à l'incitation de ses fournisseurs à la coopération lorsqu'il est question de l'adoption d'initiatives visant à réduire les émissions CO2.

Direction Supply Chain

La Supply Chain est une fonction clé et centrale chez Lafarge Algérie, sa mission s'étend de la planification de la demande et l'approvisionnement en matière première jusqu'à la gestion du transport, des produits finis et la livraison client. La direction Supply Chain chez Lafarge Holcim Algérie aura une fonction d'encadrement et de coordination entre les différents entités et la gestion des flux physiques, informationnels et financiers de l'entreprise, afin d'assurer l'optimisation des processus et garantir la réduction des coûts logistiques, du temps tout en augmentant la performance économique, environnemental et social des activités de l'entreprise.

Cette Direction est composée de plusieurs services travaillant en étroite collaboration pour permettre la réalisation de ses objectifs tout en assurant la satisfaction de leurs clients. L'organigramme 1.8 représente l'organisation de la direction Supply Chain chez LA.

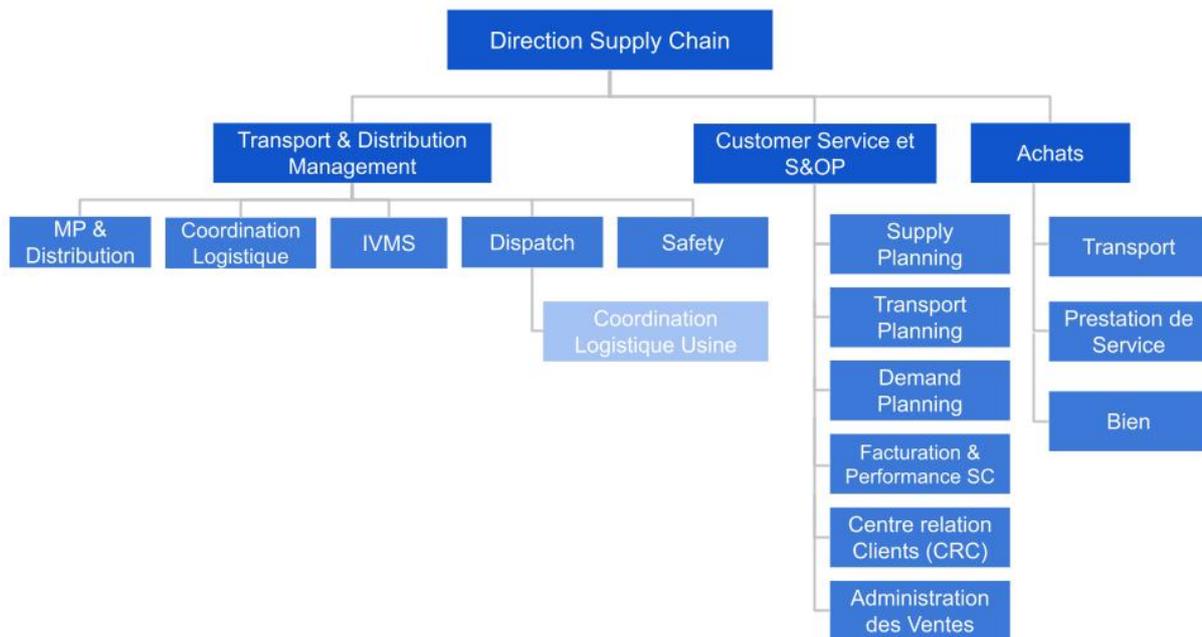


FIG. 1.8 : Organigramme de la direction Supply Chain de LA

Services de la direction Supply Chain

Transport et Distribution Management : ce service s'occupe de la gestion opérationnelle des transporteurs. Divisé sur 5 groupes, il se compose de :

- **Coordination logistique** : La coordination logistique chez Lafarge Algérie représente l'interface entre le client (à partir du centre relation clients) et l'ensemble des transporteurs. Chaque fin de semaine, le service CL reçoit le prévisionnel des ventes, ainsi que les commandes clients passées par le centre relation clients. En parallèle,

chaque transporteur envoie et introduit via le portail fournisseur la capacité disponible de sa flotte de camions sur chaque usine. Différents types de camions assurent le transport routiers chez LA :

- Camion plateau : utilisé pour le transport du ciment en sac ordinaires ;
- Camion maraîcher : utilisé pour le transport du ciment en sac palettisé ;
- Camion cocotte : utilisé pour le transport du ciment en vrac ;
- Camion à benne : utilisé pour le transport du clinker en vrac.

Le service prend en charge les commandes client en mode livraison. Il s'assure de l'adéquation du type de camion au type d'emballage à livrer tout en respectant les dates de livraisons souhaité par le client, s'assure également de l'adéquation entre la capacité de chargement disponible et le prévisionnel des commandes du Demand planning. La coordination travaille en étroite collaboration avec les autres services commerciale, IVMS...etc. A J-1 de la date de transport prévue, les commandes sont splitées sur les camions de transporteurs, et chaque chauffeur est affecté à un slot horaire précis pour le chargement de sa commande au niveau de l'usine ; cela s'effectue en prenant en compte :

- Le type du camion (plateau, maraîcher ou cocotte) ;
- La capacité du camion (20T, 30, 40T pour le sac) ;
- La demande client (quantité demandée) ;
- Le transporteur (région et usine d'activité) ;
- Les grilles tarifaires.

Après split, l'ensemble des informations sont recensées puis triées selon un tableau de bord, facilitant le suivi des transporteurs, contenant : Le nom du transporteur, la grille tarifaire, la quantité prévue à transporter selon le prévisionnel, la capacité déclarée du transporteur, la quantité à transporter selon les commandes reçues à J-1, la quantité réalisée le jour J, le taux d'absence des chauffeurs, motif d'absence (absence chauffeur, tarif non adéquat à la destination, site dangereux de livraison, panne, annulation client, capacité erronée).

Le service coordination logistique s'occupe aussi des activités de formation des nouveaux fournisseurs à la plateforme « portail transporteurs », et comment s'effectue les commandes auprès de LafargeHolcim, les règles et normes de l'entreprise, ainsi que les normes de sécurité des chauffeurs. Il faut noter que le service n'intervient directement auprès du client, sans passer par le commercial qu'en cas de problème concernant direction la livraisons :

- Blocages sur site client ;
- Réclamation de problème avec un chauffeur ou un transporteur ;
- Réclamation sur dommage lors de livraisons récurrentes (sac déchirés, retards,...etc).

- **Le Dispatch** : Se charge principalement de l'organisation des files d'attente des camions à l'entrée des sites de chargement, à travers l'édition des permis de chargement, des feuilles de routes, de plus de l'édition des factures à la sortie des sites.
- **IVMS (In Vehicle Monitoring System)** : Se charge du tracking des camions qui se charge du transport rendu, l'équipe IVMS s'assure que le camion est bien arrivé à destination, pour le rendu la matrice de sanctions s'applique de manière rigoureuse sur les chauffeurs (les excès de vitesse, les temps de pause, le comportement du chauffeur) sont sanctionnées et les chauffeurs sont bloqués pour une durée proportionnelle à la gravité de l'infraction.
- **Safety** : LA accorde une importance capitale à la sécurité visant notamment à réaliser l'objectif « zéro accident » tout au long de sa chaîne logistique. Pour ce faire, des règles strictes de sécurité sont d'abord définies et régies par la Direction logistique puis établies sous forme de charte. Imposée par l'entreprise, cette charte doit être respectée par tout transporteur travaillant pour l'entreprise.

Dans cette optique, un responsable logistique est affecté à chaque site. Cette personne est alors chargée de faire des inspections inopinées sur les camions avant les chargements, d'archiver puis d'établir un suivi des camions défectueux. Dans certains cas, parfois sur demande du client ou du transporteur, la safety s'occupe d'indiquer même l'itinéraire que les transporteurs doivent respecter lors de la livraison des produits. Dans le souci de minimiser le risque d'accident, ces itinéraires sont établis à partir de plusieurs critères comme l'état de la route, la limitation de vitesse, les aires de repos, les virages, etc.

Customer Service et *S&OP* :

- **Le Central Planning** : Le service central planning chez LA est chargé d'assurer la planification annuelle, mensuelle et hebdomadaire, ainsi que le suivi de toutes les activités concernant :
 1. L'approvisionnement en matière première pour les usines de production ;
 2. La prévision de la demande client ;
 3. La planification du transport des produits finis.

Ce service est donc en contact permanent avec l'ensemble des structures du groupe : Marketing, Achat, Logistique, Finance, Centre Relations Client, ainsi que l'ensemble des usines et ce, afin de permettre et garantir un partage efficace et continu des informations de planning essentielles aux activités du groupe. Les tâches du central planning englobent d'autant plus la planification à l'échelle stratégique à travers l'estimation du budget pour une année, ainsi que la planification à une échelle tactique avec un horizon de 2 mois pour le PIC prévisionnel annuel. Tandis qu'à l'échelle opérationnelle, il intervient principalement à travers l'estimation hebdomadaire des besoins en transport, production et approvisionnement et rectifie le PIC prévisionnel du mois selon le suivi des réalisations, avec un horizon prévisionnel d'une semaine.

- **Facturation et Performance Supply Chain** : La mission du service est répartie en 2 activités :
 - La réception, vérification et traitement de l'ensemble des factures des transporteurs relatives aux prestations logistiques réalisées. Le service établit les états de chargement de chaque transporteur, les traduit en pré-facturations, qui seront transmises aux transporteurs concernés. Après réception de la facture définitive, le service évaluera sa conformité, et établira un service fait, autorisant le paiement du transporteur.
 - L'évaluation de la performance Supply Chain, consiste à analyser et évaluer les différentes réalisations logistiques relatives au transport et à la distribution, à travers l'analyse de différents KPI's logistiques relatifs aux différents volets : coût transport, réalisation, disponibilité, taux balisé IVMS, Safety et le respect des règles de santé et sécurité.
- **Centre de Relation Clients** : Ce service représente l'interface de LA auprès de ses clients, le CRC a pour mission de prendre les commandes clients passées auprès des opérateurs du Call Center, les enregistrer sur le système ERP gestion de commande, recenser le niveau d'appréciation des transporteurs ainsi que l'écart de prestation des chauffeurs, et enfin, traiter les réclamations clients et garder la meilleure image possible de LA. Ces réclamations peuvent concerner :
 - Le comportement du chauffeur ;
 - La sécurité du chauffeur ;
 - Le retard de livraison ;
 - Le dépotage avec incident.

Le CRC est ainsi tenu d'informer le client de toute anomalie, mise à jour et informations concernant le transport de leurs marchandises. Enfin, le centre réalise à un rythme régulier des enquêtes de satisfaction clients et transporteurs afin de mesurer la performance du service.

- **Administration des ventes** : le rôle de l'administration des ventes réside dans la gestion des documents administratifs des clients (facture, traitement de dossier client, etc.). L'ADV intervient aussi lors des opérations de redirection, en établissant des factures d'avoir pour restituer le solde au client.

Processus Supply Chain de LA

Ce processus est composé de plusieurs sous-processus interdépendants dont chacun est doté d'une entrée spécifique, et qui contribuent ensemble à la réalisation des objectifs Supply Chain et à la satisfaction du client. Le macro-processus commence à partir du processus central planning. Ce dernier compte trois activités nommées respectivement « Demand planning », « Supply planning » et « Transport planning », qui sont coordonnées

au travers de l'activité *S&OP*. Avec la demande commerciale comme entrée, l'activité Supply Planning va décliner cette demande en besoin de matières premières et en un plan de production, par la suite, l'activité Demand Planning va élaborer un plan de demande en tenant compte des contraintes Supply Chain, le plan de demande peut être hebdomadaire comme journalier. Enfin, vient l'activité Transport planning qui va recenser cette demande en intégrant les capacités de production de chacune des trois usines, la capacité des transporteurs ainsi que les plans de ventes pour établir enfin établir le plan de transport pour la livraison. Ce processus est composé de plusieurs sous-processus et chacun d'eux est doté d'une entrée spécifique. Ces derniers sont corrélés entre eux de manière à réaliser les objectifs stratégiques de l'entreprise et satisfaire les clients. Tout au long du cycle de vie du macro-processus, intervient le processus performance qui est un processus de management. Il a pour mission d'animer la performance au sein de la Supply Chain et de s'assurer du bon déroulement des opérations afin d'atteindre les objectifs initialement fixés. En parallèle, il s'occupe aussi du reporting et de l'établissement des plans de progrès. Au début du macro-processus se situe le processus central planning.

Ce dernier compte trois activités ayant chacune une entrée et une sortie. Nommées respectivement « **Demand planning** », « **Supply planning** » et « **Transport planning** », ces activités sont coordonnées au travers de l'activité *S&OP*. Avec la demande commerciale comme entrée, l'activité « Demand planning » va évaluer cette demande en intégrant les contraintes SC, ce qui permet d'élaborer un plan de demande avec contraintes. L'activité « supply planning » quant à elle établie les plans de production par usine et estime leurs besoins en MP. Ce travail est effectué à partir de la demande commerciale qui sera transformée en plan de demande. Enfin, l'activité « Transport planning », établie les plans de transport pour la livraison en « Rendu », en se basant sur les capacités des usines, les plans de ventes ainsi que celles des transporteurs. La planification de la demande, des capacités usine et de transport étant faite, le traitement des commandes représente l'étape suivante du macro-processus Supply Chain. Cette démarche débute par le déclenchement d'une commande via les deux canaux portail client ou centre de relation client (CRC).

En ce qui concerne le rendu, le client sera mis en contact directement avec un opérateur du service CRC qui prendra soin de bien vérifier les informations reçues, les conditions de son contrat, son solde et son quota. Une fois les informations vérifiées, la commande est validée et enregistrée sur le système puis transmise au service coordination logistique qui va la diviser en plusieurs réservations après l'avoir splittée, car elle est fonction de la capacité des camions et de la quantité commandée ; ainsi par exemple une commande de 60 tonnes est divisée sur deux réservations pour des camions de capacité respectives de 40 et 20 tonnes, ou 3 réservations pour des camions ayant une capacité de 20 tonnes chacun. Lorsqu'il s'agit d'Exworks le client a connaissance de sa capacité, le transport est à sa charge, par conséquent la commande globale est enregistrée sur le portail client en réservation.

Le coordinateur logistique aura pour rôle d'affecter les commandes aux transporteurs en appliquant des priorités clients et produits. Cette affectation est effectuée selon les capacités de transport communiquées par la central planning et les transporteurs. Enfin,

Chapitre 1. Étude de l'existant

le transporteur se voit attribuer une date de chargement et un slot durant lesquels il devra se présenter pour prendre la marchandise puis la livrer au client, on a 8 slots de 3h. Les opérations de pesée, de chargement et d'émission des permis de chargement et de feuille de route sont assurées par l'activité dispatch. Une fois que les camions balisés quittent le site de chargement, ils seront traqués par l'équipe IVMS durant tout le trajet afin de surveiller le respect des vitesses, leurs temps de pause et le respect de l'itinéraire jusqu'à destination.

Toutes ces informations sont intégrées dans le processus HSI qui s'assure du bon déroulement des opérations en termes de sécurité.

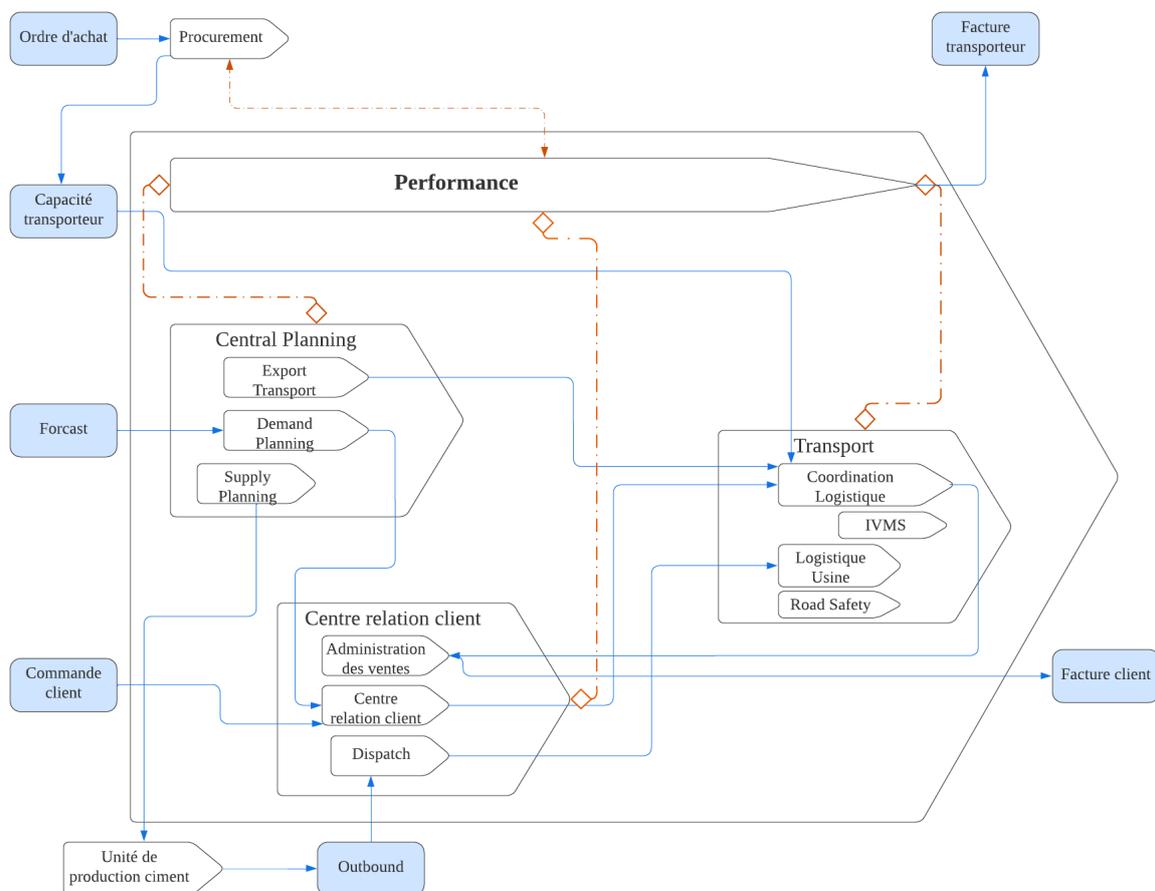


FIG. 1.9 : Cartographie processus Supply Chain de LA

Décomposition des processus (Modèle SCOR)

Cette phase du diagnostic englobe une décomposition du macro-processus SC selon le modèle SCOR décrit en Annexe. Il s'agit d'une méthodologie standardisée de description des flux au sein d'une Supply Chain, qui nous facilite notre analyse interne aussi bien d'un point de vue global que détaillé, passant d'un niveau stratégique à l'opérationnel, à travers les différents niveaux de décompositions du processus logistique. Ce dernier est

une référence dans le domaine du SCM. L'objectif de cette modélisation est de définir les contours du processus SC ainsi que l'enjeu du processus logistique sur toute la chaîne. Pour cette partie nous avons élaboré une cartographie des processus en nous basant sur :

- Les informations tirées des différents documents ;
- Les entretiens avec les différents managers et cadres de la direction SC ;
- Les observations issus de l'ERP ainsi que les opérations quotidiennes au sein de l'entreprise.

Modèle SCOR

“ La question du développement d'un ensemble de métriques en relation avec le Supply Chain Management fait l'objet de réflexions poussées (Gunasekaran et alii, 2001), et de manière singulière dans les travaux entre logistique et tableau de bord selon le modèle du Balanced Scorecard initié par Kaplan et Norton en 1992 (Morana et Paché, 2000 ; Brewer, 2001 ; Brewer et Speh, 2000, 2001 ; Kleijnen et Smits, 2003 ; Lohman et alii, 2004 ; Park et alii, 2005 ; Knotts et alii, 2006 ; Sharma et Bhagwat, 2007)”. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons ici plus particulièrement au modèle SCOR (Supply-Chain Operations Reference-model) issu d'un regroupement d'idées entre entreprises, institutions académiques et le cabinet de conseil Pittiglio, Rabin, Todd et McGrath et qui réfléchit également à la mise en œuvre d'indicateurs en logistique. Introduit en 1996, le modèle SCOR est le produit du Supply-Chain Council [SCC : Le Supply Chain Council a été formé en 1996-1997 sur l'initiative de PRTM, de l'AMR Research, de Procter et Gamble, de Texas Instruments et d'autres organisations] [4].

Son rôle est la promotion et la valorisation du modèle SCOR auprès de diverses compagnies internationales, la démarche utilisée pour construire le modèle SCOR consiste à rendre compte d'indicateurs répondant aux trois dimensions premières de toute mesure (utilisation, productivité et efficacité) et aux huit critères d'évaluation (validité, robustesse, utilité, intégration, économie, compatibilité, niveau de détail et neutralité comportementale) définis par Caplice et Sheffi (1994).

Selon cette idée, le modèle SCOR a pour originalité de reposer sur une structuration en processus décomposée selon trois niveaux d'analyse, auxquels s'ajoute un quatrième niveau propre à chaque entreprise :

- Le niveau 1 comprend les processus types de toute supply chain et propose les indicateurs clés de performance où l'organisation doit autant que faire se peut exceller ;
- Le niveau 2 s'intéresse aux catégories de processus. A travers ce niveau de 'configuration', l'entreprise définit ses opérations stratégiques via la configuration de leur supply chain ;
- Le niveau 3 et le plus opérationnel a pour objet de décomposer chaque élément de chaque processus. Son objet est de définir pour chaque élément les informations qui

Chapitre 1. Étude de l'existant

le traversent, d'énumérer des indicateurs adéquats à chaque processus et de mettre en exergue les meilleures pratiques.

Décomposition de niveau 1

Le niveau 1 du modèle SCOR part d'une réflexion sur l'analyse de cinq processus clés de management que sont : (1) les processus qui équilibrent la demande totale et l'offre afin d'élaborer un plan d'action qui répond le mieux à l'approvisionnement, la production et la livraison, (2) les processus qui procurent des biens et des services pour répondre à la demande prévue ou effective, (3) les processus qui transforment le produit à son stade final pour répondre à la demande prévue ou effective, (4) les processus qui fournissent des biens finis et des services pour répondre à la demande prévue ou effective, incluant typiquement la gestion de la commande, la gestion du transport et la gestion de la distribution [Deliver], et (5) les processus associés aux retours ou produits retournés après réception pour quelque raison que ce soit.

A ce niveau, le macro-processus SC de Lafarge Holcim Algérie est décrit de façon générale au travers des 5 sous-processus qui le composent, à savoir : la planification, l'approvisionnement, la production, la distribution et le retour. Ce macro-processus est bien évidemment soutenu par des processus de support. Au sein de LA, après la réorganisation qui a été opérée en 2022, le processus de production est sous la responsabilité de la direction industrielle qui prend en charge les trois usines de la production de Lafarge, quant aux processus d'achat, approvisionnement, planification, distribution et retour, ils sont pris en charge par la Direction SC.

Ci-dessous la cartographie de niveau 1 du macro-processus Supply Chain :

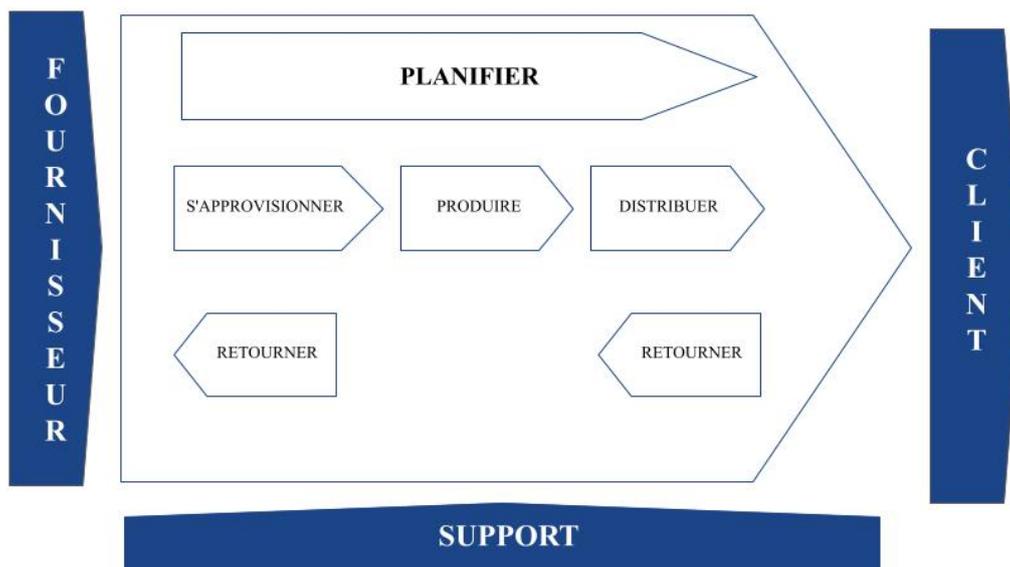


FIG. 1.10 : Cartographie du niveau 1 du macro-processus Supply Chain

Décomposition de niveau 2 « Catégories des Processus »

A un niveau de granularité plus bas, et suivant la stratégie de LA Algérie, nous avons énuméré les différents sous-processus de niveau 2 relatifs à chaque processus de niveau 1.

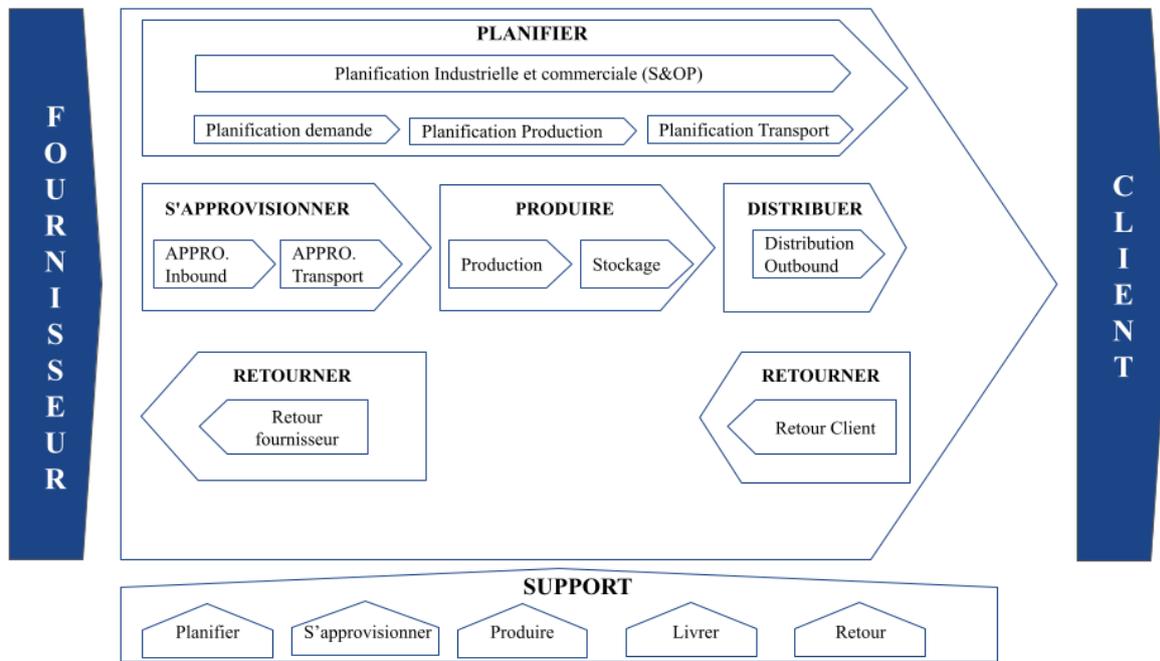


FIG. 1.11 : Cartographie du niveau 2 du macro-processus Supply Chain

Décomposition de niveau 3 « Décomposition des Processus »

Processus Planification :

Ce processus a pour objectif d'établir la planification de la demande, des activités d'approvisionnement en matières premières et leur transport, et la production sur un horizon de temps d'un an glissant en mensuel, hebdomadaire et journalier. Il s'agit en premier lieu d'identifier les besoins Supply Chain à partir des prévisions commerciales. Une fois ces dernières classées et priorisées selon les clients, la demande sans contrainte sera déterminée.

Par la suite, elle sera confrontée à la capacité réelle d'expédition et la capacité de production et ajustée pour donner lieu à une demande sous contraintes. Et ce, permettra d'élaborer les plans industriels et commerciaux annuels, mensuels et hebdomadaires.

Par la suite, le service demand planning se chargera du suivi de l'exécution de ces plans. Le service Supply Planning assure de son côté l'établissement des plans de production et d'approvisionnement en matières premières à partir des plans industriels et commerciaux, tout en tenant en compte des contraintes de production. Il se charge en second lieu du suivi de l'exécution des plans de production et d'approvisionnement. Enfin, vient le transport planning, qui aura pour mission d'assurer la planification du transport

des matières premières et produits finis, en se basant sur les plans de demande et de production. Les plans de transport seront établis par usine, par wilaya et par transporteur. Nous représentons par la suite la cartographie de niveau 3 du processus de planification :

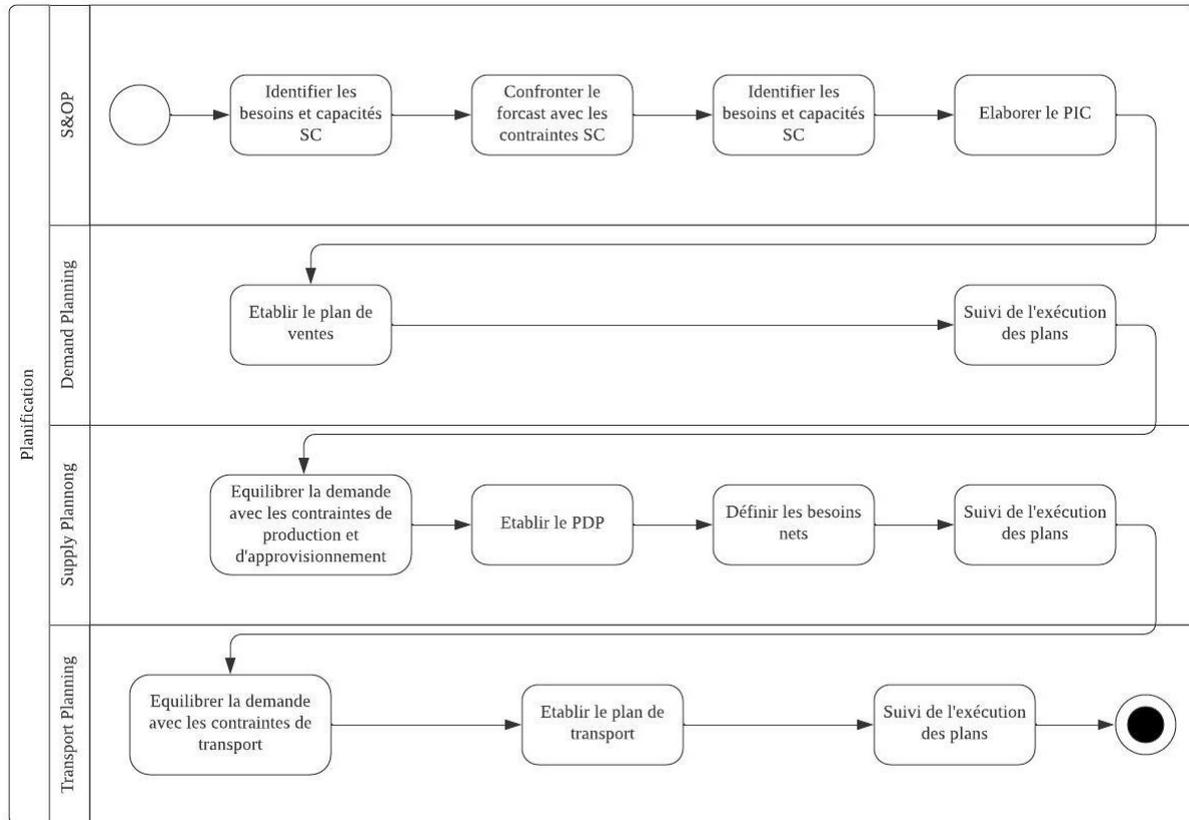


FIG. 1.12 : Cartographie du niveau 3 du processus de Planification

Processus Approvisionnement :

Ce processus se divise en deux sous processus, à savoir l'approvisionnement en matières premières et celui du transport. Pour l'approvisionnement en matières premières, le besoin est émis par le responsable approvisionnement en usine et transmis au Supply Planer, qui à son tour transmet la demande au service Achat, ce dernier va établir une liste de fournisseurs et les classifie, négocie les prix pour enfin finalisé le contrat. Pour l'achat de transport, le processus est un peu plus complexe, en effet, l'évolution du marché et le changement de stratégie, la flotte propre de LA représentait une source de coût importante entraînant des coûts de gestion et d'investissement faramineux pour l'entreprise. Ceci a conduit à entreprendre des actions de désinvestissement et la migration vers l'externalisation de l'activité du transport. Aujourd'hui LA compte plus de 70 prestataires logistiques qui se sont engagés à livrer ses produits. la relation Lafarge-fournisseur de transport est basée sur deux types de contrat :

1. **Contrat mise à disposition (MAD) :** Ce contrat est basé sur la mise à disposition des camions du transporteur auprès de Lafarge. Et le prix de transport

se calcule en tenant compte des jours de location du véhicule. Ce type de contrat engendre des coûts de gestion et d'investissement faramineux conduisant Lafarge en 2020, au désinvestissement et la suppression quasi totale de ce type de contrat et la migration vers l'externalisation de l'activité de transport, communément appelée « contrat spot ». Néanmoins, LA maintient ce type de contrat avec un seul et unique transporteur pour le conditionnement Vrac.

2. **Contrat spot** : Ce contrat est établi suivant une demande ponctuelle exprimée par Lafarge, et le règlement du transporteur se fait par rotation, et le prix de la rotation est établi en prenant en compte trois critères :

- Le site de chargement de la marchandise (Biskra, Msila ou Oggaz) ;
- Le site de déchargement du client ;
- Le kilométrage parcouru ;
- Et enfin, la grille tarifaire à laquelle est affecté le transporteur en question.

Le besoin d'achat de transport dans le cas d'une livraison en Rendu est déclenché par le service coordination logistique en indiquant l'usine de chargement et la destination du client. Les deux seuls paramètres qui sont pris en compte sont le kilométrage parcouru entre la zone de chargement et déchargement et les volumes transportés. Par la suite le service achat lance un appel d'offre et constitue une liste de fournisseurs qui répondent à celui-ci. Après quoi, les fournisseurs qui répondent à cet appel seront classés par le service d'achat selon des critères de prix, capacité et âge de la flotte. Une fois ces opérations réalisées, l'offre la plus intéressante sera sélectionnée et son fournisseur sera affecté à une grille tarifaire.

Cette dernière contient quatre colonnes des prix en fonction du kilométrage parcouru. Ces colonnes sont linéairement dépendantes et sont élaborées par le service d'achat. L'affectation du fournisseur à une de ces colonnes se fait lors de la négociation du contrat et le prix de la tonne transportée sera enfin prononcée.

Le service achat de transport de Lafarge Holcim Algérie affecte chacun de ses transporteurs à une grille tarifaire spécifique et ce, en tenant compte du prix proposé par le transporteur et de sa capacité de transport. Chaque grille tarifaire fournie à partir de chacune des 3 usines le prix de transport vers chacune des 58 Wilayas Algériennes.

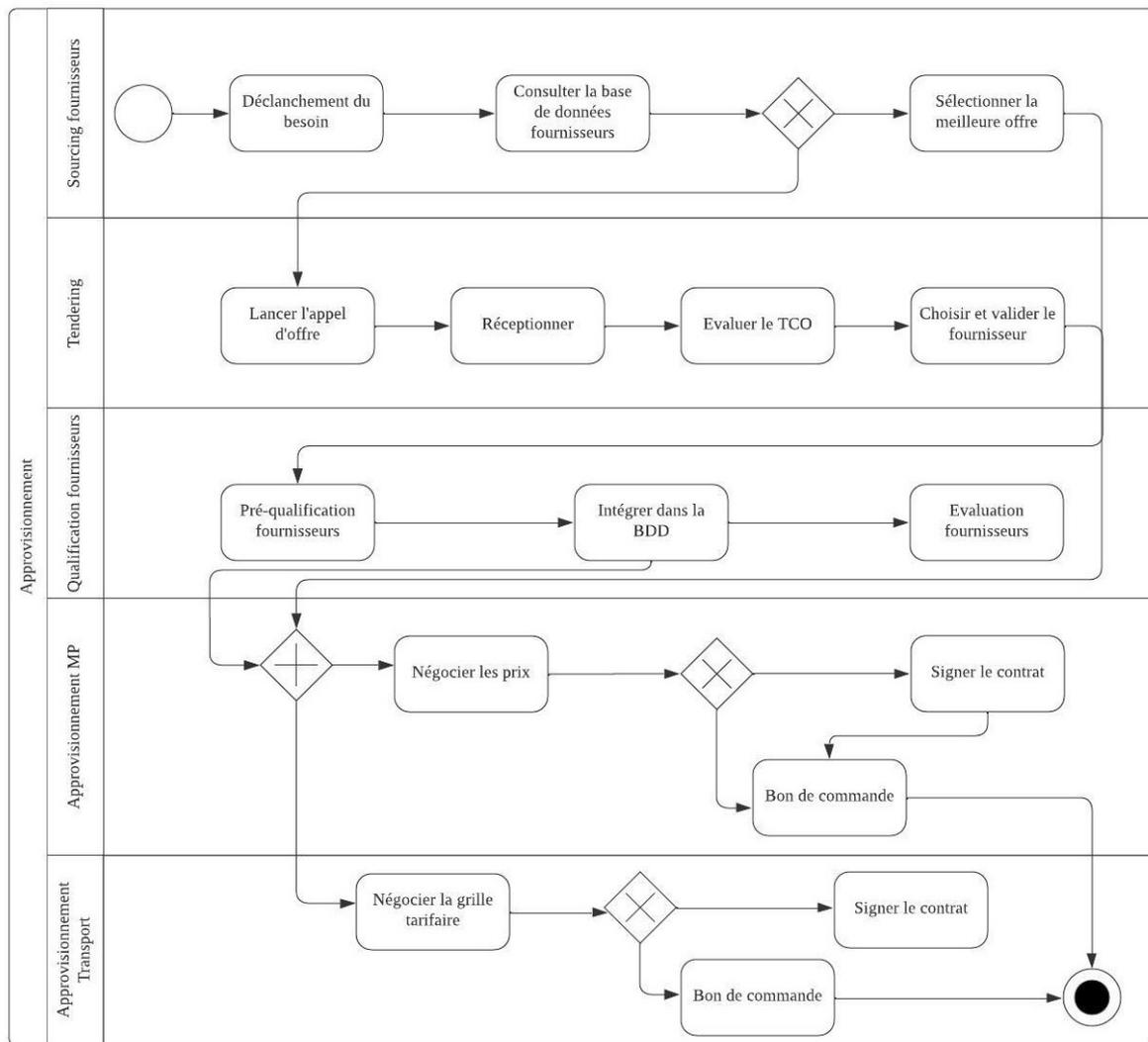


FIG. 1.13 : Cartographie du niveau 3 du processus d'Approvisionnement

Processus Production :

Le processus de production est déclenché suite à la réception des matières premières livrées par les fournisseurs sur les sites et des plans de production établis par le Supply planner. La matière première est transformée en clinker comme produit semi fini, puis en ciment comme produit fini. Ce dernier est stocké dans des silos en attendant le chargement en bennes pour le clinker dans des cocottes pour le ciment en vrac, ou en attendant l'ensachage s'il s'agit du ciment en sac, une partie de ce dernier est palettisée. La production se réalise au sein de 3 usines répartis sur le territoire Algérien, deux usines propres à Lafarge, à savoir, LCO à Oggaz et LCM à Msila et une troisième usine en partenariat avec le groupe Souakri sous le nom de CILAS (cimenterie Lafarge Souakri) à Biskra. Ces 3 usines englobent ensemble une capacité de production de 11,9 Millions de tonnes (en 2019). Au niveau de CILAS, on trouve le plus grand broyeur vertical en Afrique avec une capacité de 430t/h

La capacité de production nominale est répartie comme le montre le tableau suivant :

Chapitre 1. Étude de l'existant

Site	Type ciment	Nombre de Broyeur	Capacité de production (MT/an)
LCM	Gris	4	4.45
LCO	Gris, Blanc	3	3.84
CILAS	Gris	1	3.3

TAB. 1.2 : Répartition de la capacité de production entre les 3 usines LA

A noter que la capacité des broyeurs au niveau de LCO est de $200t/h$ pour les 2 BK gris et $100t/h$ pour le BK blanc, au niveau de LCM elle est de $130t/h$ pour 4 BK et $60t/h$ pour le 5ème BK, à noter que le MTBF est de 320 jours.

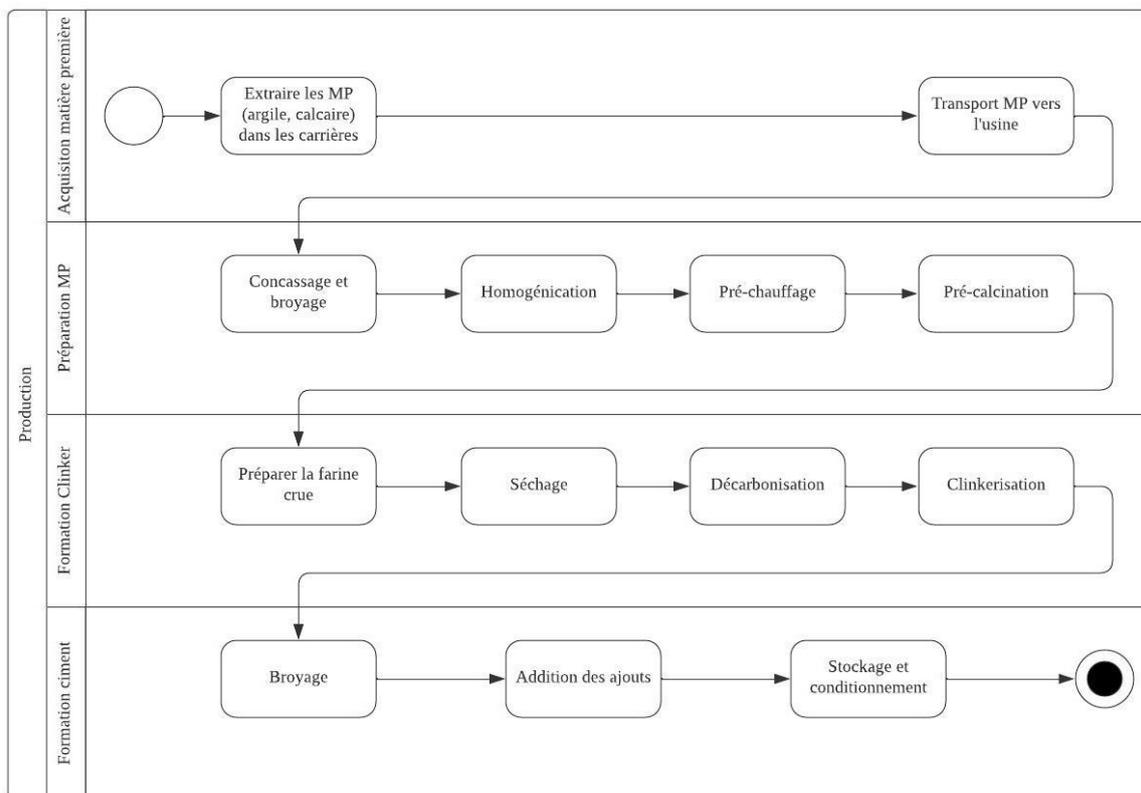


FIG. 1.14 : Cartographie du niveau 3 du processus de Production

Processus Distribution :

Dernier maillon du processus logistique, il couvre la satisfaction du client à travers l'acheminement du ciment suivant deux modes de livraisons, et ce, selon les deux incoterms suivants :

- **Ex Works (EXW) ou départ usine** : cet incoterm stipule que le vendeur en l'occurrence LA met à disposition ses marchandises à la sortie de son usine à une date préprogrammée. L'acheteur couvre les coûts de transport, les frais de douane

et supporte les risques liés au transport des marchandises jusqu'à leur destination finale.

- **Delivered Duty Paid (DDP) ou Rendu au lieu de destination :** Cet incoterm stipule que le vendeur est responsable du risque et des frais de chargement et d'acheminement de la marchandise jusqu'au point de livraison convenu. Le client se chargera du déchargement de cette dernière. Souvent chez Lafarge on utilise le terme « Rendu » pour abrégé cet incoterm. Le processus de livraison est amorcé suite à la réception par le CRC d'une commande client. La commande est traitée en vérifiant les critères suivants : le type de commande (Rendu ou ExW), ses coordonnées, les conditions de son contrat, son solde et son quota. Une fois les informations vérifiées, la commande est enregistrée sur le système et envoyée à la coordination logistique. Pour le Rendu, la coordination logistique s'occupera d'affecter les commandes aux transporteurs, en appliquant des priorités clients et produits selon les capacités communiquées dans le plan de transport.

Le processus de livraison est amorcé suite à la réception par le CRC d'une commande client à travers un appel téléphonique ou un e-mail. La commande est traitée en vérifiant les critères suivants : le type de commande (Rendu ou ExW), ses coordonnées, les conditions de son contrat, son solde et son quota. Une fois les informations vérifiées, la commande est enregistrée sur le système SD-6 puis envoyée à la coordination logistique. Pour le Rendu, la coordination logistique s'occupera d'affecter les commandes aux transporteurs, en appliquant des priorités clients et produits selon les capacités communiquées dans le plan de transport et les transporteurs. La préparation de commande est entamée avec l'attribution d'un permis de chargement au transporteur qui se présente.

Le transporteur se voit attribuer une date de chargement et un slot durant lequel il devra se présenter pour charger la marchandise puis la livrer au client. Les opérations de pesée, chargement et émission des permis de chargement et feuille de route sont assurées par le service dispatch. Deux indicateurs sont pris en compte pour suivre le temps de séjour du transporteur dans le périmètre de l'usine. Une fois que les camions balisés quittent le site de chargement, ils seront trackés par l'équipe IVMS durant tout le trajet afin de surveiller le respect des vitesses, leurs temps de pause et le respect de l'itinéraire jusqu'à leur arrivée chez le client. Une fois chez le client, les chauffeurs déchargent le ciment puis remplissent la feuille de route qui servira d'accusé de réception de la marchandise.

Une fois que les camions balisés quittent le site de chargement, ils seront trackés par l'équipe IVMS durant tout le trajet afin de surveiller le respect des vitesses, leurs temps de pause et le respect de l'itinéraire jusqu'à leur arrivée chez le client. Une fois chez le client, les chauffeurs déchargent le ciment puis remplissent la feuille de route qui servira d'accusé de réception de la marchandise. Cette feuille de route sera restituée à l'entreprise par le transporteur. Ce document sert d'accusé de réception mais aussi comme donnée d'entrée pour la pré-facturation dont s'occupe le service facturation afin de provisionner la somme nécessaire pour payer les transporteurs. La cartographie suivante représente la décomposition au niveau 3 du processus de distribution

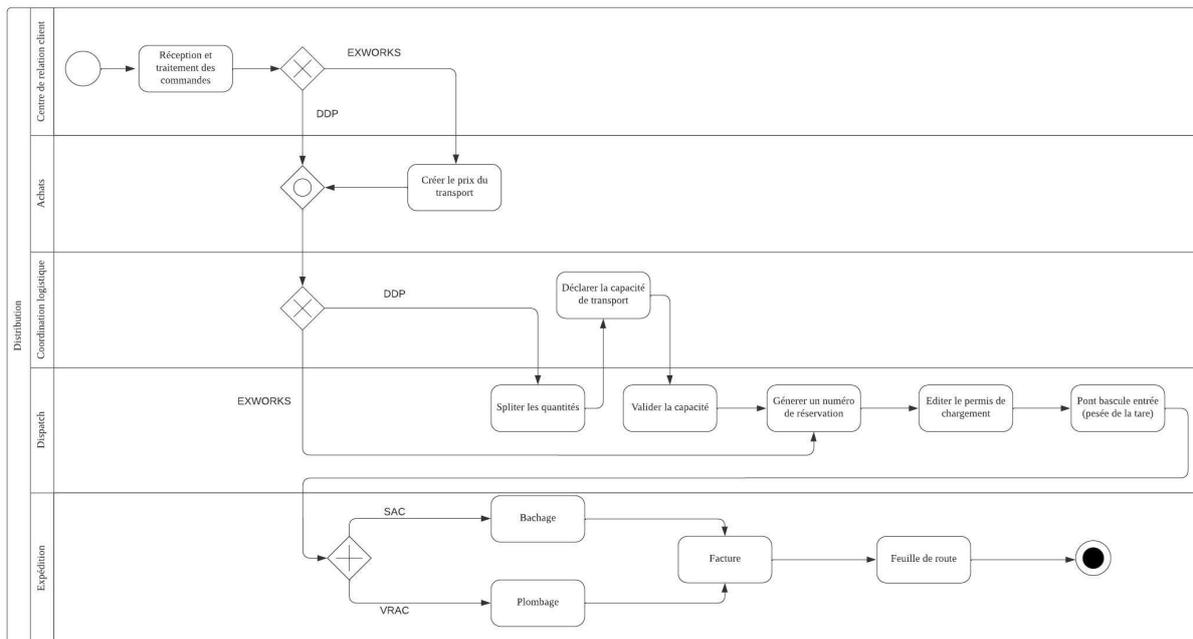


FIG. 1.15 : Cartographie du niveau 3 du processus de Distribution

Processus Retour :

Ce processus est amorcé suite à la réception d'une réclamation client ou fournisseur de transport par e-mail ou appel téléphonique. Cette réclamation est enregistrée par le chargé des réclamations dans le CRM/SRM (Customer Relationship Management et Supplier Relationship Management) puis transmise au service concerné pour analyse et résolution dans les 12h qui suivent la réception de la réclamation.

Une réponse est délivrée au client après résolution de sa demande dans les 48h au maximum selon le standard de l'entreprise. La plupart des retours et réclamations clients concernent les fournisseurs de transport, et vice versa. Le client réclame souvent un délai non respecté lors de la livraison, une quantité manquante du ciment, un dépotage avec incident, ou un non-port des équipements de protection individuelle de la part du transporteur. Ce dernier réclame quant à lui un mauvais comportement de la part du client, une longue attente sur le site client pour le déchargement et une redirection souvent imposée. Par conséquent, LA essaye en permanence d'être à l'écoute des deux parties et applique des mesures objectives telles que l'affectation d'un autre chauffeur pour un site de client réclamant et vice versa.

Analyse des 5 forces de Porter

Le but de cette analyse repose sur l'évaluation de l'intensité des différentes forces que présente l'environnement externe et concurrentiel de LA. Dans cette optique, l'outil des 5 forces de Porter décrit en Annexe semble en coordination avec le but de ce chapitre.

Cet outil est tout à fait adapté pour les secteurs industriels où les acteurs sont nom-

breux, cela est le cas pour le secteur cimentier Algérien. De plus, le modèle paraît pertinent, dans le sens où il prend en compte l'ensemble des opportunités et des menaces du marché en cas d'arrivée potentielle de nouveaux entrants. Enfin, ce dernier permet d'avoir une idée sur le pouvoir de négociation des fournisseurs.

Pour ce faire, nous avons recensé l'ensemble des questions en relation avec chaque force suite à différents entretiens et échanges avec les collaborateurs de Lafarge Algérie, nous avons abouti aux analyses suivantes :

1. **Menace des nouveaux entrants :** Le marché du ciment connaît une saturation en termes de volumes offerts. Néanmoins, l'État Algérien ne met actuellement aucune barrière à l'entrée pour les potentiels investisseurs sur le marché cimentier. Cela explique l'entrée sur le marché de deux nouveaux producteurs depuis 2016. Malgré les contraintes de localisation de leurs usines, impliquant une faible couverture du marché, les nouveaux entrants ont cependant réussi à atteindre ensemble une part de marché de 9% au courant de l'année 2019, grâce à des prix pratiqués plus bas que la moyenne nationale. D'un autre côté, le plus grand concurrent de Lafarge, reste GICA qui occupe 52% des parts de marché.

Le marché cimentier Algérien est jugé stratégique par l'Etat, mais celui-ci n'assure plus la régulation de l'activité cimentière, d'autant plus les standards internationaux évoluent au regard des enjeux écologiques et de la crise climatique, d'autres pays dans le monde ont mis en place des mécanismes de régulation et des taxes environnementales (Taxes Carbone) notamment. A l'international Lafarge a beaucoup de concurrents, et les produits qui sont destinés à l'export et ces activités d'exportation notamment vers les pays qui adoptent une réglementation rigoureuse en termes de normes d'émissions carbone, les producteurs européens et étrangers seront soumis aux mêmes exigences, taxes et réglementations.

En effet le EU ETS impose des limites d'émission de CO₂ aux installations industrielles, y compris les cimenteries, afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ces limites s'appliquent aussi bien aux installations de production de ciment situées dans l'UE qu'aux importations de ciment provenant de l'extérieur de l'UE. Par conséquent si Lafarge Algérie ne s'alignent pas sur ces exigences en termes d'émissions CO₂, elle pourrait perdre des parts de marché en Europe et ailleurs dans le monde.

2. **La rivalité des concurrents :** La concurrence dans l'industrie du ciment est accrue et assurée par deux principales d'entreprises : GICA et LA avec des parts de marché respectives de 52% et 28%. De nombreux facteurs influent sur le choix du client entre un produit LA ou GICA :

- **Facteur Prix :** GICA offre un prix de ciment plus avantageux sur la tonne que celui de LA. Cela s'explique par sa stratégie de domination par les coûts tout en gardant une marge fixe. D'un autre part, GICA dispose de 14 cimenteries avec une offre nationale de 17 Millions de tonnes en 2019, engendrant ainsi des

coûts de stockage élevés. Elle propose donc régulièrement des remises sur ses produits pour accélérer ses ventes.

- **Facteur Proximité** : Les 14 cimenteries de GICA sont mieux positionnées sur le territoire national que les 3 usines de LA. Ce qui lui permet d'avoir une meilleure couverture de marché.
- **Facteur service** : LA Propose des solutions très avancées pour l'accompagnement de son client. En effet, LA est le seul producteur de ciment qui propose un service de livraison en Rendu. De plus, le site web « Portail Client » développée par LA facilite la prise de commande du client. Enfin, le « GPS Tracking » représente un outil de traçabilité qui permet au client de suivre la localisation de son transporteur en temps réel, ce qui représente un avantage concurrentiel majeur pour Lafarge Algérie.
- **Qualité** : En dépit du fait que GICA offre un ratio de coût/résistance plus bas, ce qui incite les clients le ciment de LA qui propose une meilleure « stabilité de résistance ».

3. **La menace des produits de substitution** : L'innovation technologique a touché tous les secteurs d'activité, notamment le secteur de construction. Elle a permis ainsi le développement de ciment avec un impact carbone plus faible, néanmoins d'autres matériaux destinés à la construction présentent une alternative au ciment considéré par beaucoup comme très polluant. Ces alternatives de construction représentent des produits de substitution pour le marché du ciment, le plus grand émetteur de CO₂. De son côté, Lafarge encourage l'innovation et la recherche afin de diminuer le taux d'émission du Dioxyde de Carbone dans sa production. Et ce à travers les investissements en recherche et développement par le biais du laboratoire de développement de la construction (CDL) à Rouiba, ou le Laboratoire Central de Recherche (LCR) à Lyon.

On a vu par exemple émergé l'Eco-Planet, un ciment plus verte avec un potentiel de réduction CO₂ de 40% par tonne.

4. **Pouvoir de négociation des fournisseurs** : Lafarge Algérie fait appel à plusieurs activités pour assurer sa production : que ce soit l'achat de matières premières (Gypse, Argile, Adjuvant, Minerai de fer, Sable), l'achat de transport, d'énergie, ou de machines et pièces de rechange. En ce qui concerne les machines et pièces de rechange, LA fait du « Mono Sourcing ». Considéré comme une mauvaise prise en charge des approvisionnements de ses pièces de rechanges, cela peut représenter un obstacle majeur à la production et des pertes financières importantes. Néanmoins l'entreprise essaye de challenger ces fournisseurs.

LA travaille sur la diversification de son panel fournisseurs de pièces de rechange afin d'éviter une totale dépendance. Par ailleurs, la consommation énergétique d'une usine de production s'élève à 160 KWH pour chaque tonne de ciment produite selon De ce fait SONALGAZ, unique fournisseur d'électricité en Algérie, est classé comme un partenaire de LA.

D'autre part, le processus de sourcing des fournisseurs de transport est assez rigide, en effet, LA impose beaucoup de standards en termes de Road Safety. Ce qui amène LA à réduire sa liste à 74 fournisseurs pour l'année 2022.

Le pouvoir de négociation d'une entreprise avec ses fournisseurs de services logistiques de tiers dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille de l'entreprise, sa position sur le marché, la concurrence entre les fournisseurs, la demande du marché pour les services en question, etc.

Pour ce qui est des prestataires de services de transport ils sont catégoriser comme étant des fournisseurs de type (3PL). Dans certaines situations, les entreprises peuvent avoir un pouvoir de négociation relativement fort avec les fournisseurs 3PL. Cela peut se produire lorsque l'entreprise est un client important pour le fournisseur de services logistiques, ce qui lui confère une certaine influence lors des négociations.

Une entreprise qui génère un volume important de demandes de services logistiques peut être en mesure de négocier des tarifs préférentiels, des conditions contractuelles avantageuses ou des services supplémentaires. C'est le cas de Lafarge Algérie pour ce qui est des transporteurs, LA est un client qui représente un elle seule un volume de distribution de 11 millions de tonne entre le inbound et le outbound. Par conséquent Lafarge Algérie représente un marché très important pour les fournisseurs de transport. En dépit des standards qu'impose l'entreprise en terme de sécurité routière, de maintenance véhicule et de sustainibily, les fournisseurs essayent de répondre favorablement à ces exigences pour faire partie du panel fournisseurs de LA. Ce qui lui confère un certain pouvoir de négociation.

- 5. Pouvoir de négociation client :** Les clients, en tant que moteurs de création de richesse et d'augmentation du chiffre d'affaires, sont de plus en plus exigeants et attentifs à l'offre proposée. Dans le cas spécifique de Lafarge Algérie, les clients se composent principalement de détaillants, de grossistes et d'entreprises impliquées dans des projets de grande envergure. Lafarge Algérie s'efforce constamment de maintenir des relations durables et fidéliser ses clients avec une offre de service et un accompagnement de qualité.

D'une part, elle propose des remises sur les quantités demandées qui dépassent 150 tonnes, et d'autre part, elle réalise des enquêtes de satisfaction client pour évaluer la qualité des produits et des services de transport fournis, notamment lorsque la marchandise est transportée en Rendu. Cependant, Lafarge Algérie s'attache également à diversifier son portefeuille client afin de maintenir une part de marché stable. Par ailleurs, Lafarge Holcim cherche continuellement à renforcer sa fonction marketing et à attirer de nouveaux clients potentiels. En début d'année 2020, un projet de changement de packaging a été lancé pour les cinq types de ciment en sac, dans le but d'allier ergonomie, design et durabilité.

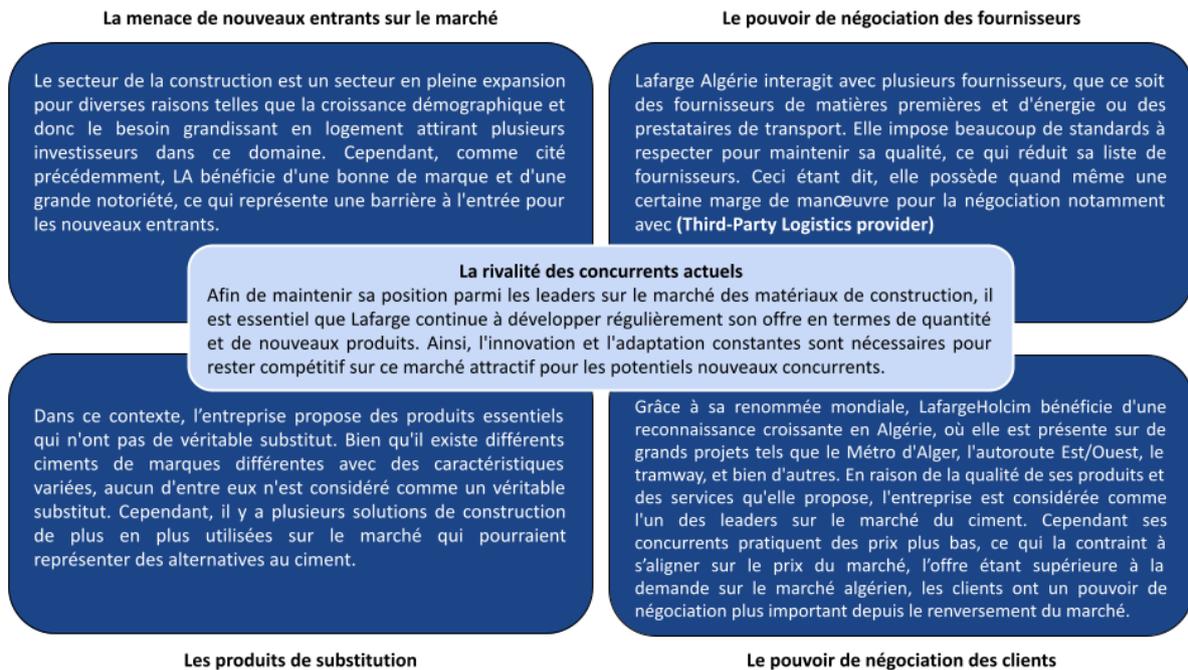


FIG. 1.16 : Analyse des 5 forces de Porter de Lafarge Algérie

1.2.3 Résultats de l'analyse

Les deux analyses menés précédemment, ont pour but d'évaluer la faisabilité du déploiement d'une solution de décarbonisation, qui implique et intègre directement les prestataires de service de transport de Lafarge Algérie. Il en ressort qu'au regard de la position dominante qu'occupe LA sur le marché du ciment avec plus de 27% des parts de marché et un volume de transport qui va jusqu'à 700 camions/jour. Les transporteurs ne peuvent pas négliger le potentiel que LA offre en terme de réalisations de service de livraison, autrement dit elle représente une demande beaucoup trop grande sur le marché du transport pour être ignoré. De plus la digitalisation du service de transport à travers le portail client et transporteur, la transparence, la maîtrise des processus logistique, la prise en compte des réclamations, sont des éléments qui incitent et encouragent fortement les transporteurs à travailler avec Lafarge Algérie.

La structuration organisationnelle fait de cette entreprise un partenaire de qualité, que ça soit en terme de maîtrise du temps d'attente de chargement, la programmation des livraisons, la formation des chauffeurs, le traitement des réclamations, la rapidité de paiement, la gestion de la logistique opérationnelle, les standards de sécurité routière et de manière générale la compréhension de la complexité de la logistique, de ses difficultés, de ses enjeux en Algérie par des effets de gains d'expérience au vu de l'ancienneté de l'implantation de cette compagnie dans le pays.

En résumé, c'est la performance de la logistique de transport qui différencie Lafarge Algérie par rapport à ses concurrents et qui incite les transporteurs à travailler à son service. Se sont les mêmes raisons citées plus haut qui constituent des leviers importants

de négociation et d'outils d'incitation à l'adoption de pratiques qui répondent aux enjeux de développement durable.

1.3 Durabilité comme impératif

En septembre 2019, l'Organisation des Nations Unies déclarait l'urgence climatique (Couronne, 2019). Les changements climatiques affectent sans conteste les manières d'agir et de penser de toutes les sociétés. L'industrie cimentière est l'une des industries les plus polluantes au monde, elle est responsable de 8% des émissions mondiales de CO_2 . Et ce du fait que la production du ciment est très gourmande en eau et en énergie et que la transport de cette marchandise dans les 4 coins du monde mobilise une quantité énorme de moyens de transport et ressources combustibles. De manière générale, la production d'une tonne de ciment émet une quantité équivalente de CO_2 dans l'atmosphère qui varie entre 0.8 et 1 tonne. En somme, cela équivaut grosso modo à 1 kg de dioxyde de carbone libéré pour 1 kg de ciment produit.

Le constat étant posé depuis plusieurs années sur le caractère émissif du ciment, cela ne fait pas reculer sa production pour autant, car ce composant essentiel à la fabrication du béton est l'un des matériaux les plus utilisés au monde, ce qui le rend quasi-indispensable pour nos sociétés.

Produit dans plus de 150 pays, le ciment sert entre autres à construire des maisons, des bâtiments, des autoroutes, des tunnels, des voies ferrées ou encore des réservoirs. Il est d'ailleurs estimé que le béton est aujourd'hui le deuxième produit le plus utilisé à travers le monde après l'eau, la Chine, l'Inde et les États-Unis se classant parmi les plus gros producteurs de ciment. Bien qu'essentiel sous de nombreux aspects, le ciment, de par son processus de fabrication, ainsi les émissions issues de la logistique tout au long de sa chaîne de valeur, constitue des sources d'émission de CO_2 des plus importantes au monde avec des émissions s'élevant à 29 millions de tonnes.

La libération du CO_2 par le ciment a lieu à deux niveaux lors de la production : premièrement, lors de la combustion d'énergies fossiles liée à la production de clinker, constituant clé du ciment et, deuxièmement, lors d'une réaction chimique 1.1 permettant de convertir le calcaire en oxyde de calcium et dioxyde de carbone.



Néanmoins une part importante des émissions sont issues de la logistique de transport. La transport est responsable 16.2% des émissions globales de gaz à effet de serre, ce chiffre comprend une petite quantité d'électricité (émissions indirectes) ainsi que toutes les émissions directes provenant de la combustion fossiles pour alimenter les activités de transport. Ces chiffres n'incluent pas les émissions provenant de la fabrication de véhicules à moteur ou d'autres équipements de transport - celles-ci sont incluses dans le point "Utilisation de l'énergie dans l'industrie".

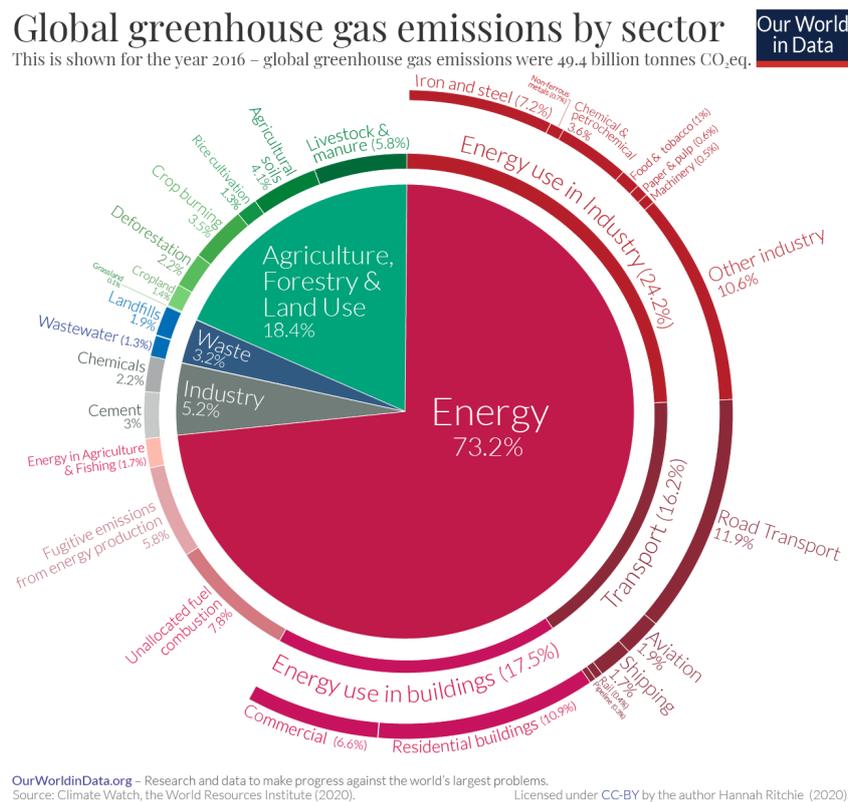


FIG. 1.17 : Émissions GES global par secteur d'activité (2020)

- Le transport routier représente 11,9% des émissions provenant de la combustion d'essence et de diesel dans toutes les formes de transport routier, y compris les voitures, les camions, les poids lourds, les motocyclettes et les autobus. Soixante pour cent des émissions du transport routier proviennent des déplacements des passagers (voitures, motos et bus) et 40% des (camions et poids lourds).
- L'aviation représente 1,9% des émissions issues du transport de passagers et de marchandises, ainsi que de l'aviation nationale et internationale. 81% des émissions de l'aviation proviennent du transport de passagers et 19% du fret. En ce qui concerne le transport de passagers, 60% des émissions proviennent des voyages internationaux et 40% des voyages nationaux.
- Le transport maritime représente quant à lui 1,7% des émissions provenant de la combustion d'essence ou de diesel sur les bateaux. Cela comprend les voyages maritimes de passagers et de marchandises.
- Le rail représente 0,4% des émissions provenant des déplacements de passagers et de marchandises par voie ferrée.
- Pipeline représente 0,3% les combustibles et les produits de base (par exemple le pétrole, le gaz, l'eau ou la vapeur) doivent souvent être transportés (à l'intérieur d'un pays ou entre pays) par des pipelines. Cela nécessite un apport d'énergie, ce qui entraîne des émissions. Les pipelines mal construits peuvent également fuir,

entraînant des émissions directes de méthane dans l'atmosphère - toutefois, cet aspect est pris en compte dans la catégorie "Émissions fugitives provenant de la production d'énergie".

1.3.1 Empreinte carbone

Holcim a été la première entreprise mondiale de matériaux et de solutions de construction à voir ses objectifs de réduction net zéro pour 2030 et 2050 validés par l'initiative Science Based Targets (SBTi) pour tous ses domaines d'activité. Ces objectifs, qui portent sur les impacts directs et indirects, guideront sa stratégie pour les décennies à venir.

La figure 1.18 résume la proportion de chaque scope dans l'empreinte carbone du groupe Holcim [2]. On constate que le SCOPE 1 représente la part la plus importante des émissions, bien que l'objet de ce travail est l'estimation des émissions

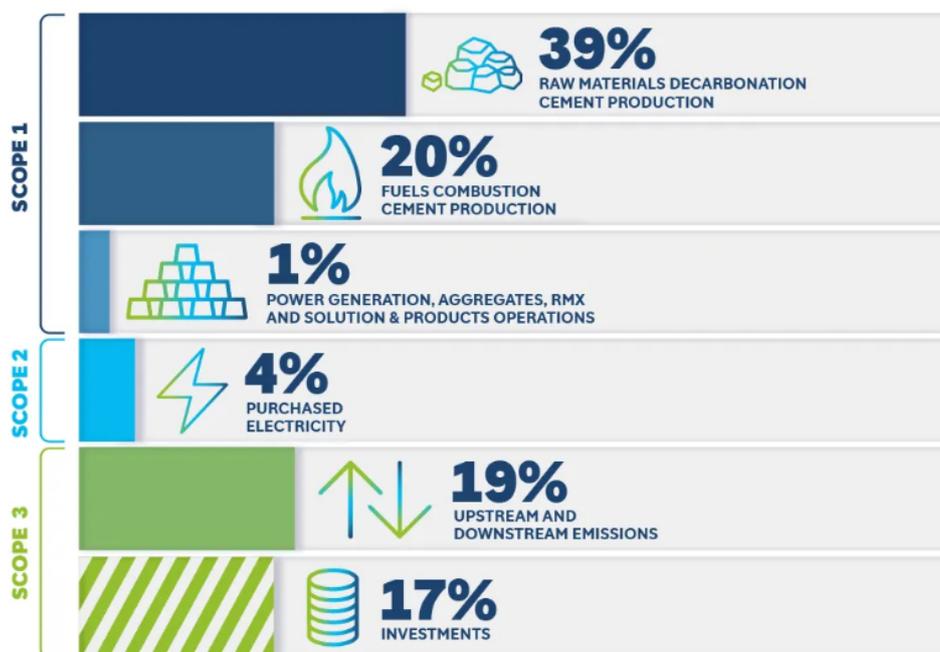


FIG. 1.18 : Empreinte Carbone Holcim

- **SCOPE 1** : Représente 60% de l'empreinte carbone d'Holcim et les émissions du scope 1 sont au cœur de la stratégie de réduction des émissions. Le champ d'application 1 comprend toutes les émissions qui sont rejetées directement par les opérations. La plupart d'entre elles proviennent de la production de ciment. 39% des émissions sont générées lors de la décarbonation des matières premières qui sont utilisées pour produire le clinker. La combustion nécessaire pour chauffer les fours est une autre source importante d'émissions. Une petite partie des émissions du scope 1 provient des activités liées aux solutions et produits, aux granulats et au béton prêt à l'emploi.

- **SCOPE 2** : Les émissions de ce scope représentent 4% de l'empreinte carbone. Le SCOPE 2 comprend les émissions indirectes provenant de la production d'électricité achetée et consommée dans les équipements appartenant à l'entreprise ou contrôlés par elle.
- **SCOPE 3** : Représente 36% de l'empreinte carbone. Le scope 3 comprend toutes les autres émissions indirectes générées tout au long de la chaîne d'approvisionnement, telles que le transport et l'extraction et la production de matériaux et de combustibles achetés. Ce scope comprend également les émissions directes de entreprises et des investissements non consolidés. Nous reviendrons en détails un peu plus bas sur les émissions issues du SCOPE 3.

1.3.2 Engagement de LA en faveur du climat

Comme mentionné précédemment Lafarge Holcim fait partie des premières entreprises dont les objectifs pour 2050 ont été validés par le SBTi, dont l'objectif est de répondre aux objectifs fixés par la COP21. Concrètement, les entreprises rejoignant la SBTi s'engagent à définir des objectifs de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), conformément aux préconisations scientifiques dressées à la COP21. Les objectifs de réduction des émissions auxquels se conforment les entreprises qui ont rejoint la SBTi doivent impérativement prendre en compte les scopes 1 et 2 du Green House Protocol (GHP), sous peine d'être invalidés par le collectif. En outre, le scope 3 doit également être considéré, s'il représente plus de 40% des émissions totales de l'entreprise. Le graphique suivant représente les émissions de LafargeHolcim par scope, bien que le SCOPE 3 représente 20% des émissions globales.

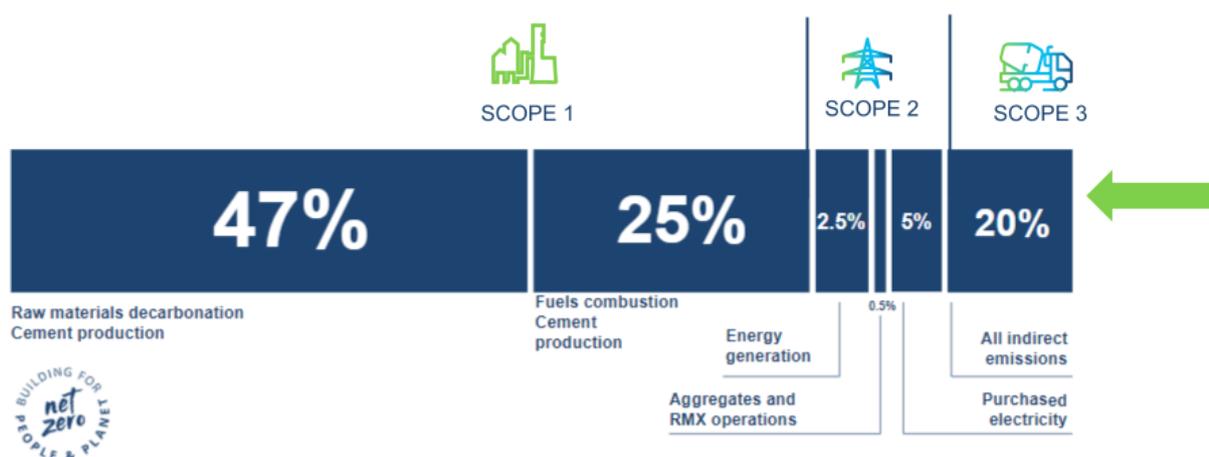


FIG. 1.19 : Emissions relatives aux différents SCOPE de Lafarge Algérie

La figure suivante représente les objectifs que le groupe Holcim s'est fixé à Horizon 2030 en termes de réductions des émissions de gaz à effets de serre relatifs aux Scope 1, 2 et 3.

YR	SCOPE 1	SCOPE 2	SCOPE 3
2018	576 BASELINE	38 BASELINE	
2020	555	36	29 MT BASELINE
2030	475 Kg CO ₂ Net/t cementitious	13 Kg CO ₂ Net/t cementitious	-20% Kg CO ₂ per ton of purchased clinker and cement
			-20% Kg CO ₂ per ton of purchased fuels
			-24% Kg CO ₂ per ton of material transported
2050	 GHG emissions across the value chain validated by		 SCIENCE BASED TARGETS

FIG. 1.20 : SBTi Target Holcim groupe

Dans l'optique de réaliser ces objectifs le groupe Holcim a déployé une stratégie de décarbonisation sur plusieurs niveaux et en actionnant plusieurs leviers.

Lafarge Holcim est également membre fondateur de la First movers Coalition pour accélérer la demande de produits verts.

Pour ce qui est du transport, le groupe exige de ses fournisseurs de services de transport sur les marchés matures qu'ils s'engagent à ce qu'au moins 30% des camions lourds qu'ils achètent soient à zéro émission d'ici 2030 (pour desservir le fret de Holcim), conformément aux objectifs fixés par the FMC.

Plusieurs actions sont également mise en place par LafargeHolcim pour réduire l'empreinte carbone de la logistique de transport en terme de :

- **Optimisation du réseau :**

- Déplacement des volumes imputés au transport routier vers les voies navigables ou le rail
- Utilisation des outils de modélisation pour optimiser les flux de matériaux et des actifs

- **Optimisation de la répartition :**

- Réduction des kilomètres parcourus (route) en optimisant les itinéraires (VRP)
- Augmentation de la charge utile et de la charge moyenne par expédition
- Réduction des retours à vide (% en backhauling)

- **Réduction des émissions de réservoir à la roue :** Remplacement progressive des motorisations diesel par les véhicules zéro émissions (Holcim déploiera jusqu'à 1 000 camions électriques Volvo d'ici 2030. La livraison des premiers camions commencera au quatrième trimestre 2023. Il s'agit de la plus importante commande commerciale de camions électriques Volvo à ce jour).

- **Éco-conduite** : Augmenter le nombre de kilomètres parcourus en toute sécurité (route) en mettant en œuvre les principaux outils HSE de contrôle et d'accompagnement pour la sensibilisation des chauffeurs à la conduite économique (IVMS, formation des conducteurs, retour d'information des conducteurs).

Au niveau local, LA inscrit le développement durable au cœur de sa stratégie, l'entreprise s'attache à être une entreprise plus adaptée aux enjeux environnementaux et au respect des valeurs durables, en apportant une contribution positive à la société et ce à travers un large éventail d'actions et d'initiatives :

- Lafarge Algérie s'est fixé comme objectif la réduction de ses émissions atmosphériques et s'est également engagé à mesurer et contrôler ses émissions de métaux lourds, de dioxines et de furanes ;
- Lancement de nouveaux produits et services avec une empreinte bas carbone, LA s'est engagé à proposer des matériaux et solutions qui permettent de réduire la consommation énergétique du secteur du bâtiment qui représente environ 38% de la consommation mondiale en énergie. Et ce à travers des produits comme AIRIUM et ARDIA 600 pour une meilleure isolation ;
- LA s'est engagé dans un plan ambitieux de révalorisation des déchets à travers l'activité Géocycle avec 230kt de déchets alternatifs recyclés. Certains déchets sont utilisés comme substitue ou alternative aux combustibles fossiles ;
- Valorisation de 200kt de vases de barrages dans les cimenteries en 2022 ;
- Réhabilitation de 100% des carrières.

1.4 Énoncé de la Problématique

Suite aux résultats de l'analyse au niveau stratégique et organisationnel, il en ressort que l'intégration des enjeux de développement durable dans la stratégie de Lafarge Algérie est essentielle, pour renforcer sa position sur un marché très concurrentiel et qui exerce dans un cadre institutionnel, juridique et normatif qui devient de plus en plus contraignant, surtout pour les entreprises exportatrices.

Étant contributeur au changement climatique, Lafarge Algérie a la responsabilité de comprendre et de réduire son impact sur l'environnement. Cela passe nécessairement dans un premier temps par la mesure de ses émissions pour estimer son empreinte carbone et prendre des mesures pour la réduire. Pour intégrer dans un second temps ses partenaires et ses prestataires de service dans sa nouvelle démarche transition bas carbone.

Pour des raisons de conformité réglementaire de nombreux pays qui en place des normes environnementales qui obligent les entreprises à mesurer et à déclarer leurs émissions de gaz à effet de serre, Ceci contraint Lafarge Algérie à mesurer et réduire ses émissions. Se conformer à ces exigences est essentiel pour éviter des sanctions ou des

amendes potentielles. Bien que cela ne soit pas encore le cas en Algérie, il serait préférable de prendre les devants en optant pour une démarche pro-active pour réduire son exposition à un risque prévisionnel.

La problématique à laquelle on se confronte dans le cadre de son travail, c'est la mise en œuvre efficace de stratégies de réduction des émissions de transport, compte tenu des défis liés à l'optimisation des opérations logistiques, au choix des modes de transport durables et à l'adoption de nouvelles technologies et de nouvelles pratiques

Car si aujourd'hui nous ne pouvons pas nous en passer du transport routier, on devrait développer un rapport plus intelligent à l'usage qu'en en fait afin de contribuer à la transition vers un système de transport plus respectueux de l'environnement.

Au regard de la configuration actuelle du marché du transport en Algérie et la limitation des importations, et l'absence d'infrastructures adéquates comme les bornes de recharge pour les camions électriques, le moteur thermique pour le transport routier reste indispensable, mais si ce dernier est indispensable pour la mobilité des marchandises, il n'en reste pas moins primordial pour les opérateurs du secteur industriel d'adopter une approche plus réfléchie quant à l'utilisation de ce mode de transport, afin de favoriser la transition vers un système de transport plus respectueux de l'environnement.

L'objet de ce travail s'inscrit justement dans une démarche de recherche d'approche permettant de réduire la consommation de carburant pour ce qui est du transport out-bound, et par conséquent les émissions SCOPE 3. En ce sens l'adoption de l'écoconduite peut être envisagée comme une solution efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre pour ce qui est de la partie Upstream transportation qui représente 16% des émissions SCOPE 3. En effet, l'écoconduite consiste à adopter des pratiques de conduite plus respectueuses de l'environnement, visant à optimiser la consommation de carburant et à réduire les émissions polluantes.

En mettant en œuvre des programmes de formation et de sensibilisation à l'écoconduite, les entreprises peuvent éduquer leurs conducteurs à adopter ces pratiques. Cela permet non seulement de réduire les émissions de CO_2 et d'autres polluants, mais aussi de réaliser des économies de carburant et de réduire les coûts d'exploitation.

Cependant, il convient de souligner que l'écoconduite ne constitue qu'une partie de la solution pour réduire les émissions SCOPE 3. D'autres approches complémentaires, telles que l'utilisation de véhicules plus propres et l'intégration de modes de transport alternatifs plus durables, doivent également être envisagées pour obtenir des résultats plus significatifs.

En résumé, en promouvant l'adoption de l'écoconduite, les entreprises peuvent contribuer à la réduction des émissions SCOPE 3 dans le secteur des transports, tout en réalisant des économies. Pour mesurer le potentiel de réduction des émissions de GES de l'éco-conduite, nous devons nécessairement passer par les étapes suivantes :

1. Estimer la consommation de carburant en prenant en considération le maximum de facteurs pouvant avoir une incidence significative sur la consommation ;
2. Calculer les émissions de GES en équivalent CO_2 en adoptant l'approche Well to

Wheel ;

3. Faire adhérer les transporteurs à la démarche ;
4. Effectuer des tests sur l'éco-conduite afin de mesurer son potentiel de réduction des émissions ;
5. Calculer les émissions évitées par rapport à un référentiel , dépendamment du contexte dans lequel on se situe.

Conclusion

A travers ce chapitre, consacré à l'analyse du micro et du macro environnement de Lafarge Algérie, des caractéristiques de son secteur d'activité, et des objectifs qu'elle ambitionne en terme de transition bas carbone, nous avons exposé les principales activités et missions de l'entreprise, mais aussi sa vision et ses objectifs, en terme de durabilité.

Cependant nous nous sommes principalement concentrés sur le fonctionnement du département Supply Chain où notre étude a été menée, en cernant sa structure organisationnelle, ses différents départements ainsi que la complexité de ses processus qui fait d'un produit Lafarge Algérie un gage de qualité. Par la suite, nous avons effectué une analyse au niveau stratégique et opérationnel pour cerner les interactions internes de Lafarge Algérie entre les différents services mais également celles qu'elle entretient avec son environnement externe. De ce fait, nous avons évalué la faisabilité d'une implémentation d'une solution décarbonante auprès de tiers qui représente ses fournisseurs de service de transport. En premier lieu, l'analyse stratégique nous a permis de cerner le contexte économique dans lequel évolue LA à savoir, un environnement concurrentiel intense mais où elle détient quand même un pouvoir de négociation très fort en particulier avec ses fournisseurs. En second lieu, l'analyse nous a permis d'avoir une vue transversale sur la chaîne de valeur de l'entreprise et ce, en décomposant le macro-processus Supply Chain selon le référentiel SCOR, ce qui nous a permis de comprendre les forces en termes de gestion, d'organisation, de structuration, de logistique qui lui permettent de préserver son pouvoir de négociation en dépit du la concurrence intense dans laquelle elle exerce ses activités.

Chapitre 2

État de l'art

Introduction

Ce chapitre est dédié au développement des différents concepts et notions dont la compréhension est nécessaires à la proposition de la solution de décarbonisation de la Logistique de Transport, à savoir l'éco-conduite. Nous présenterons également les différents outils que nous utiliserons pour la mise en œuvre de la solution.

Nous aborderons dans un premier temps les principaux concepts liés à la durabilité, aux émissions de gaz à effet de serre, aux méthodes de calcul et d'estimation de ces derniers. Dans un second temps nous reviendrons en détail sur les facteurs d'émissions qui ont une incidence sur la consommation de carburant ainsi que la logistique de transport et notamment le transport routier. Nous tenons à préciser que dans ce travail nous nous sommes intéresser aux relations physique qui lient la consommation de carburant aux facteurs d'émissions en explicitant les rapports entre résistance au frottement et consommation de carburant. Autrement dit plus nous avons besoin de puissance, plus nous consommons de carburant, l'idée est de répondre à cette question *Qu'est ce qui fait que nous avons besoin de plus de puissance dans le moteur pour transporter une marchandise ?*

Nous introduirons des concepts liées à la modélisation du réseaux routiers et nous reviendrons sur la réglementation qui régit le transport en Algérie. Après quoi nous nous focaliserons plus précisément sur la méthode d'échantillonnage utilisé pour l'estimation de la consommation de carburant ainsi que les concepts relatifs à l'éco-conduite.

Nous aborderons également des concepts liées à l'inférence statistique, au clustering, à la mesure de la qualité d'une classification, ainsi que les différentes métriques à prendre en considération pour le choix du modèle de prédiction.

2.1 Cadre conceptuel lié au calcul d'émissions

La compréhension des concepts d'effet de serre, d'émissions globales et de bilan carbone revêt une importance cruciale dans la lutte contre le changement climatique et la transition bas carbone. On ne peut réduire que ce qu'on peut calculer. Le reporting des émissions, passe par la compréhension de ces concepts. La compréhension de ces concepts aident à quantifier correctement nos émissions, à identifier les sources principales et à prendre des mesures appropriées.

Effet de serre : En moins de 3 siècles, du fait des activités humaines et en particulier à cause de la combustion d'énergie fossile, la concentration de gaz à effet de serre a augmenté de 40% [5]. Cette perturbation a enclenché un changement majeur du climat à l'échelle planétaire. La raison en fait que les phénomènes climatiques sont complexes, ont une nature systémique, ils sont non linéaires, qui sont caractérisés par des effets multiplicateurs et soumis à une thermodynamique hors équilibre siège de rétro-actions positives et d'amplification importantes qui peuvent faire bifurquer le système. Mais qu'est ce que l'effet de serre ? "L'effet de serre, est un processus naturel et nécessaire à la vie sur Terre,

résultant de l'influence de l'atmosphère sur les différents flux thermiques contribuant aux températures au sol d'une planète. Sur notre planète, l'essentiel de l'énergie thermique reçue provient du rayonnement solaire. En l'absence d'atmosphère, la Terre rayonnerait idéalement comme un corps noir et aurait une température moyenne en surface de -18°C ."

L'atmosphère est composée de composants gazeux et non gazeux qui absorbent une partie des rayons infrarouges émis par la Terre et en réfléchissent d'autres, ce qui explique la température que nous lui connaissons. La puissance de l'effet de serre varie de manière naturelle selon des mécanismes géophysiques globaux naturels de long terme. L'indicateur classique qui quantifie cette puissance est le forçage radiatif, défini comme la différence entre l'énergie radiative reçue et émise par un système climatique donné.

À la suite de la révolution industrielle, une augmentation anormale du forçage radiatif de la Terre est apparue. Les contributions relatives des différentes causes du forçage radiatif entre 1750 et 2005 sont représentées en 5.1, différenciées entre processus naturels et activités humaines. Les principaux gaz d'origine anthropique participant à l'effet de serre (augmentation et réduction) et leurs sources ont été identifiés par le GIEC (Stocker et al. 2013). Notons que la majeure partie des sources interviennent dans le cycle de vie des transports, que ce soit par le biais de l'exploitation, la construction et l'entretien, ou la fin de vie des infrastructures et véhicules.

Les émissions totales de gaz à effet de serre sont la somme des émissions de différents gaz : dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux et des gaz à l'état de traces plus petits tels que les hydrofluorocarbures (HFC) et l'hexafluorure de soufre (SF6).

Quelle est la part de chaque gaz dans les émissions mondiales de gaz à effet de serre ?

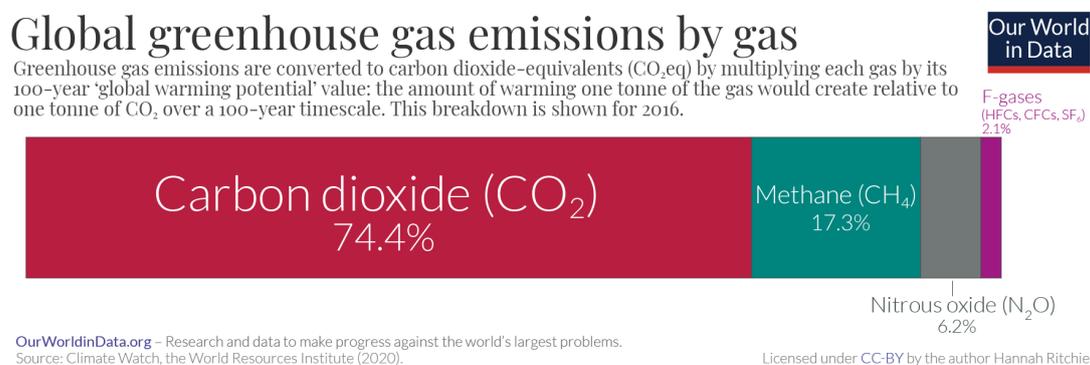


FIG. 2.1 : Contribution relative de chaque gaz à l'effet de serre

Le dioxyde de carbone a été le principal responsable, représentant environ trois quarts (74,4%) des émissions totales. Le méthane a contribué à hauteur de 17,3%, l'oxyde nitreux à hauteur de 6,2% et les autres émissions (HFC, CFC, SF6) à hauteur de 2,1% [6].

Gaz à effet de serre :

La liste des gaz à effet de serre pris en compte dans les bilans d'émissions de gaz à effet de serre est fixée par arrêté du ministre chargé de l'écologie. Comprend le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆) et le trifluorure d'azote

(NF3). Le trifluorure d'azote est à prendre en compte dans les bilans d'émissions de gaz à effet de serre devant être rendus à partir du 1er juillet 2016 (arrêté du 25 janvier 2016 relatif aux gaz à effet de serre couverts par les bilans d'émission de gaz à effet de serre).

Émissions Globales : Comment les émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) ont-elles évolué au fil du temps ? Le graphique 2.2 illustre la croissance des émissions mondiales depuis le milieu du XVIII^e siècle jusqu'à aujourd'hui. On constate qu'avant la révolution industrielle, les émissions étaient très faibles. La croissance des émissions est restée relativement lente jusqu'au milieu du 20^e siècle. En 1950, le monde émettait 6 milliards de tonnes de CO₂. En 1990, ce chiffre avait presque quadruplé, atteignant plus de 22 milliards de tonnes [6]. Les émissions ont continué à croître rapidement ; nous émettons aujourd'hui plus de 34 milliards de tonnes par an issues de la combustion fossile.

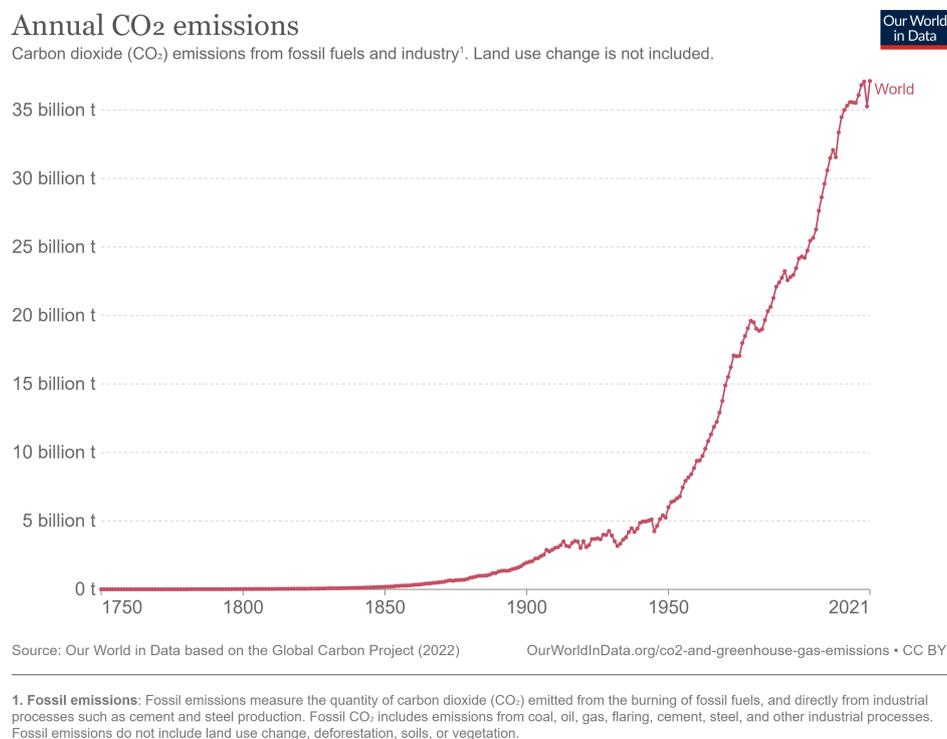


FIG. 2.2 : Émissions CO₂ annuelles pour la combustion fossile

L'augmentation des activités humaines, en particulier le recours à la mécanisation depuis l'ère industrielle, a eu pour conséquence une utilisation (consommation et transformation) toujours plus massive de ressources naturelles, et en particulier des combustibles fossiles – charbon, produits pétroliers, gaz naturel, qui présentent la caractéristique d'être très émissifs en gaz à effet de serre. Les temps de demi-vie de ces substances étant relativement longs, par exemple de l'ordre de 120 ans pour le CO₂ selon le GIEC, si le flux d'émission de la substance augmente, alors le stock de ces substances augmente dans l'atmosphère, ce qui génère un forçage radiatif par absorption et réflexion des rayons infra-rouges, donc une augmentation de l'effet de serre, et ainsi entre autres conséquences

géophysiques, une augmentation moyenne des températures de l'océan et de la surface terrestre. Le bilan énergétique de la Terre devient donc positif, son stock d'énergie sous forme de chaleur augmente tandis que ses stocks sous forme de ressources fossiles diminuent.

Bilan Carbone : Pour une entreprise ou une collectivité, il est rarement possible de mesurer directement les émissions de gaz à effet de serre générées par une activité donnée. Un calcul est donc nécessaire, faisant intervenir un facteur d'émission : ce facteur est utilisé pour transformer une donnée d'activité physique en une quantité d'émissions de gaz à effet de serre. La réalisation d'un bilan des émissions de gaz à effet de serre d'un territoire nécessite la recherche d'un nombre de données d'activité considérable (multiplicité des sources d'émission) : les facteurs d'émissions correspondant seront de nature différente, en fonction de la méthode choisie au regard de la précision attendue. Ainsi schématiquement, la réalisation d'un bilan des émissions de gaz à effet de serre d'une entité se base sur :

- **Des données d'activité :** Il s'agit de quantités spécifiques à un service/activité donné. Ainsi, à titre d'exemple : la consommation de carburant par trajet, la quantité de marchandises livrée, le nombre de rotations, la distance parcourue par trajet...etc.
- **Des facteurs d'émissions :** Ce facteur fournit la quantité de gaz à effet de serre, exprimée en (tCO₂e), issue de la « mobilisation » d'une unité de service donnée.

2.1.1 Différence entre empreinte carbone et les émissions évitées

Tandis que l'empreinte carbone mesure une grandeur physique – les gaz à effet de serre réellement émis dans l'atmosphère – et sa variation dans le temps, l'analyse des émissions évitées consiste en une vue de l'esprit : la comparaison, sur une période temporelle donnée, d'une situation réelle (avec la solution) avec une situation virtuelle (situation de référence), contrefactuelle, c'est-à-dire qui n'aura jamais lieu [7].

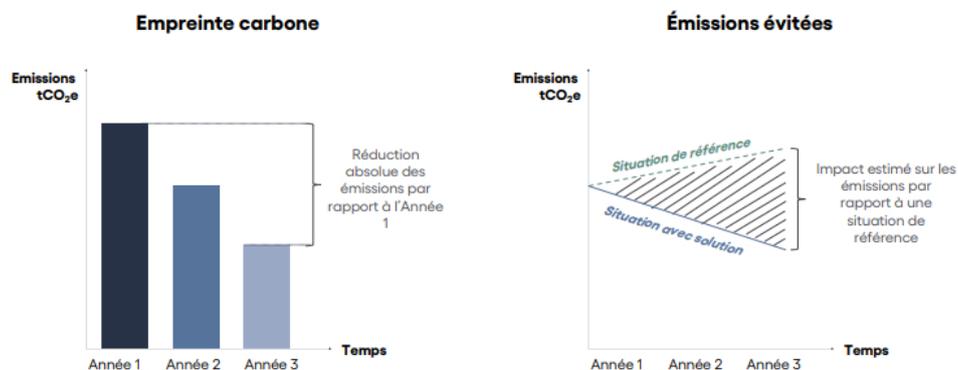


FIG. 2.3 : Différence entre une empreinte carbone (gauche) et les émissions évitées (droite) (GHS protocol)

Les émissions évitées sont donc une estimation de l'effet positif d'une solution sur les émissions de GES par rapport à une situation de référence, qui aurait eu lieu sans la solution. Les émissions évitées sont donc la différence entre les émissions de la situation de référence et les émissions avec la solution.

Caractéristiques	Empreinte carbone	Émissions évitées
Principe	Mesure des émissions de gaz à effet de serre d'une activité pour une année donnée. Les réductions (ou augmentations) d'émissions rendent compte de l'évolution des émissions dans le temps	Estimation de l'impact carbone « positif » d'une action. Les émissions évitées sont la comparaison entre une situation réelle (situation avec la solution) et une situation fictive (situation de référence)
Référence	Les réductions (ou augmentations) d'émissions sont quantifiées par rapport au niveau d'émissions à une année de référence historique, à périmètre constant.	Les émissions évitées sont quantifiées par rapport à un scénario de référence contrefactuel, qui aurait eu lieu en l'absence de la solution.
Incertitude	La mesure est basée sur des émissions réelles, l'incertitude est donc faible.	La référence est une situation fictive non vérifiable, l'incertitude est donc élevée.

TAB. 2.1 : Principales différences entre l'empreinte carbone et les émissions évitées (Net Zero Initiative)

Logique en cycle de vie : qu'il s'agisse de l'empreinte carbone ou des émissions évitées, ces indicateurs doivent être calculés dans une logique cycle de vie, c'est-à-dire que l'on doit prendre en compte l'ensemble des émissions amont, aval et lors de l'exploitation, en partant de l'extraction de l'énergie primaire, à la fabrication du produit en question, transport, usage et fin de vie.

2.1.2 Facteurs d'émission liées à la consommation direct d'énergie

Facteur d'émission : Un facteur d'émission est un ratio entre la quantité de polluants atmosphériques ou de gaz à effet de serre émis par un bien, un service ou une activité et une quantité unitaire de celui ou celle-ci. Ainsi, le facteur d'émission de dioxyde de carbone d'une centrale électrique peut être exprimé en grammes de dioxyde de carbone par kilowatt-heure d'électricité produite. Les facteurs d'émission sont des coefficients utilisés pour convertir les activités humaines en émissions de gaz à effet de serre (GES). Cet indicateur permet le calcul des émissions de certains polluants ou de gaz à effet de serre pour des systèmes complexes, à partir de la connaissance des facteurs d'émission de leurs composants.

Il convient de noter que les facteurs d'émission sont des estimations basées sur des données scientifiques et des modèles. Ils peuvent varier en fonction des sources de données utilisées, des technologies employées et des pratiques spécifiques à chaque région ou pays. Ainsi 1kwh produit à partir du mix énergétique Français ou Algérie n'aura pas le même facteur d'émission, car le mix énergétique en France qui est essentiellement composé de nucléaire à une empreinte carbone moindre que celle du mix algérien qui est composé à 98% de gaz.

Nature des émissions : L'utilisation de l'énergie est une source de gaz à effet de serre à cause :

- Du dioxyde de carbone (CO_2) provenant de la combustion des carburants fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui, comme leur nom l'indique, sont le résultat de la décomposition et de la pyrolyse géothermique d'organismes ayant vécu il y a quelques dizaines de millions à un milliard d'années ;
- Des gaz autres que le CO_2 émis à l'occasion de la combustion (outre que ces gaz peuvent aussi être des polluants locaux divers) ; c'est notamment le cas de l'ozone O_3 ou de l'oxyde d'azote NO_X ;
- Des fuites de méthane survenant pendant l'exploitation des hydrocarbures : le méthane, principal constituant du gaz naturel, est lui-même un gaz à effet de serre avec un PRP 25 fois plus puissant - à poids égal que le gaz carbonique.

2.1.3 Potentiel de réchauffement planétaire

Cet indicateur vise à regrouper sous une seule valeur l'effet additionné de toutes les substances contribuant à l'accroissement de l'effet de serre. Il est disponible pour l'ensemble des gaz à effet de serre mais nous ne présentons ici que les six gaz pris en compte dans le protocole de Kyoto, à savoir le CO_2 , le CH_4 (méthane), le N_2O (protoxyde d'azote), les HFC (Hydrofluorocarbures), les PFC (Perfluorocarbures) et le SF_6 (hexafluorure de soufre).

Cet indicateur est exprimé en « équivalent CO_2 » du fait que par définition l'effet de serre attribué au CO_2 est fixé à 1 et celui des autres substances relativement au CO_2 . Cette façon d'exprimer le PRG (Pouvoir de Réchauffement Global) peut être source d'erreur pour certaines personnes non averties qui confondent des données de ce type avec des données relatives au seul CO_2 . L'indicateur est calculé sur la base d'un horizon fixé à 100 ans afin de tenir compte de la durée de séjour des différentes substances dans l'atmosphère. Les PRG de ces différents gaz ont été calculés une première fois en 1995, puis mis à jour plusieurs fois par le GIEC.

La dernière révision date de 2007 ; ils sont présentés ci-dessous :

Gaz	PRP associé
CO_2 Dioxyde de carbone	1
CH_4 Méthane	25
N_2O Protoxyde d'azote	298
HFC Hydrofluorocarbures	Variables de 124 à 14800 selon les molécules considérées
PFC Perfluorocarbures	Variables de 7300 à 12200 selon les molécules considérées
SF_6 Hexafluorure de soufre	22800

TAB. 2.2 : Potentiel de réchauffement planétaire par gaz (GIEC, 2007)

2.1.4 Facteurs d'émissions combustibles

Il s'agit des ratios transformant une quantité donnée de combustible fossile (gaz, fioul...) en CO_2 émis lors de la combustion. Ils dépendent du contenu en carbone et du pouvoir calorifique du combustible considéré : à titre d'exemple, la combustion d'un kWh de fioul génère 270 g de CO_2 contre 201 g pour un kWh de gaz naturel. Ces facteurs d'émissions sont fiables car les calculs sont basés sur une réaction physique, et fournis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, IPCC en anglais). Dans certains cas, les bases de données « combustibles » intègrent également pour ces combustibles des facteurs d'émissions dits amont, correspondant au CO_2 émis lors de la phase de production et de transport, éventuellement de raffinage du combustible et de son origine [8].

Le facteur d'émission amont du gaz naturel est par exemple de 36 g de CO_2 pour un kWh de gaz naturel. Ce résultat est évidemment bien plus approximatif : il devrait logiquement tenir compte des conditions précises d'extraction et de transport du gaz qui ne sont pas identiques selon que c'est un gaz importé de Russie, de Norvège ou d'Algérie.

Émissions liées à la combustion des combustibles liquides : Les données de base dont nous disposons sont obtenues auprès des organismes suivants : l'ADEME, l'Observatoire de l'Energie, le Comité Professionnel du Pétrole (CPDP), le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable et la Commission Européenne. Leurs différentes publications nous permettent d'obtenir des facteurs d'émissions de gaz à effet de serre selon différentes unités ou d'établir des équivalences. Les valeurs retenues sont les suivantes : Ces valeurs ne tiennent compte que de la phase de combustion de l'hydrocarbure, et ne prennent pas en compte les émissions "amont", c'est-à-dire les émissions de la filière qui a permis leur production à partir des sources primaires. Les émissions non prises en compte dans les valeurs ¹ ci-dessus sont associées à l'extraction, au transport, et au raffinage éventuel de ces combustibles.

¹Remarque : toutes les valeurs ci-dessous sont exprimées en référence au PCI

Source d'énergie	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep PCI	kg équivalent carbone par litre
Gaz de Pétrole Liqué- fié - GPL	803	0,063	733	0,432
Supercarburant (ARS, SP95, SP98) ¹⁵	876	0,072	836	0,661
Gazole	859	0,074	859	0,726
Fuel domestique	859	0,074	859	0,726
Fuel lourd	851	0,077	893	0,851
Pétrole brut	836	0,072	836	0,726
Carburacteur ¹⁶	852	0,073	848	0,682

TAB. 2.3 : Facteurs d'émission des combustibles liquides, combustion seule (ADEME)

Émissions amont des combustibles liquides : Les émissions amont des combustibles liquides concernent l'extraction du pétrole brut, le transport de ce dernier, soit par bateau soit par pipeline, et le raffinage, opération qui est la plus émissive de la chaîne. Un document publié par l'IFP en 2017 précise les émissions "du puits au réservoir" de ces combustibles, lorsqu'ils proviennent de brut conventionnel (les données sont en grammes de CO₂ par MJ d'énergie finale, et ont été convertis en kg équivalent carbone par tonne équivalent pétrole, puis en kg équivalent carbone par tonne) :

	Emissions liées au raffi- nage	Extraction et transport amont	Emissions to- tales	% supplémentaire par rapport aux seules émis- sions de combustion
Source	CEREN	IFP		
Unité	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	
Carburant				
GPL	90	61	151	18,8%
Essence	88	61	149	17,0%
Carburacteur 18		61	79	9,3%
Gazole	31	61	92	10,7%
Fioul lourd	56	61	117	13,7%

TAB. 2.4 : Facteurs d'émission des combustibles liquides, combustion seule (ADEME)

2.1.5 Emissions Well to Wheel

En convertissant ces nouvelles valeurs par tonne pour d'autres unités (tep, kWh, litre), et en prenant comme valeur de référence pour la seule combustion les chiffres du MEDD, nous obtenons finalement les valeurs suivantes pour les émissions de combustion et les émissions amont (ou de production) :

Combustible	kg équ. C/tonne		kg équ. C/kWh		kg équ. C/tep		kg équ. C/litre	
	WTT	TTW	WTT	TTW	WTT	TTW	WTT	TTW
Pétrole brut	60	836	0,005	0,072	59	833	0,05	0,75
Fioul lourd	116	851	0,010	0,077	121	890	0,10	0,77
Fioul domes- tique	91	859	0,008	0,074	90	856	0,08	0,73
Gazole	91	859	0,008	0,074	90	856	0,08	0,73
Kérosène	78	888	0,006	0,073	74	845	0,07	0,75
Carburacteur	78	852	0,006	0,070	74	811	0,06	0,68
Essence moteurs terrestres	148	876	0,012	0,072	140	833	0,11	0,66
Essence aviation	148	876	0,012	0,072	140	833	0,11	0,66
Naphta	78	896	0,006	0,072	72	833		
Huile de schiste	708	717	0,071	0,072	823	833		
Huile usée	78	0	0,006	0,072	75	833		
Solvant usagé	78	489	0,004	0,069	47	799		
Lubrifiants usa- gés	78	800	0,006	0,072	75	833	0,07	0,73
White spirit	78	834	0,007	0,072	78	833	0,06	0,65
Bitumes	77	436	0,006	0,039	73	457		
Autres produits pétroliers	78	800	0,006	0,072	75	833		
Gaz naturel li- quifié (GNV)	138	771	0,010	0,056	116	651		
Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	150	803	0,012	0,063	136	731	0,08	0,43

TAB. 2.5 : Facteurs d'émission des combustibles liquides (amont + combustion) (ADEME)

Méthodes d'évaluation environnementale : La revue de littérature sur les méthodes d'évaluation environnementale révèle que le domaine des transports a été largement étudié en tant que champ d'application. Cependant, les méthodes utilisées sont généralement adaptées à différentes échelles ou à des objets d'étude différents. Ainsi, il est possible d'évaluer les impacts environnementaux générés par un véhicule spécifique, par un projet d'infrastructure de transport ou de manière plus globale, pour l'ensemble des

Chapitre 2. État de l'art

déplacements dans une zone géographique donnée. Ces différentes échelles sont souvent interconnectées.

En effet, au niveau de la zone géographique, les calculs des impacts environnementaux résultent souvent de la combinaison de données primaires sur les déplacements et de facteurs d'émissions calculés à l'aide de méthodologies développées au niveau du véhicule. Par exemple, les Budget Énergie Environnement des Déplacements (BEED) croisent les données issues des Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) avec les facteurs d'émissions calculés par le logiciel COPERT. La compréhension de ces interrelations entre les différentes échelles de mesure et l'utilisation de méthodologies appropriées sont essentielles pour une évaluation environnementale précise et complète dans le domaine des transports. Les méthodes appliquées à l'échelle territoriale ont ensuite été représentées graphiquement (représentation inspirée de (Risch et al. n.d.)), selon deux paramètres : les enjeux environnementaux considérés (en abscisse) et le périmètre couvert (en ordonnée). L'ACV a également été représentée. Les différentes méthodologies ont donc été classées selon deux critères principaux :

- La méthodologie permet-elle de prendre en compte différents enjeux environnementaux ?
- La méthodologie est-elle centrée sur la phase d'usage ou s'applique-t-elle à un périmètre plus large ?

Les différentes méthodes de calcul ou d'estimation des émissions sont résumées dans le tableau suivant en fonction du périmètre choisi et de la phase du cycle de vie qui est prise en compte :

Périmètre	Phases du cycle de vie prises en compte
Well to Tank	- Production d'énergie - Transport jusqu'au lieu de distribution (Pompe à essence)
Tank to Wheel	Usage lors de la conduite
Well to Wheel	- Production d'énergie - Transport jusqu'au lieu de distribution - Usage lors de la conduite
Gradle to Gate (Du berceau à l'usine)	- Extraction des matières premières - Fabrication du véhicule
Gradle to Grave (Du berceau à la tombe)	- Production et acheminement de l'énergie - Extraction des matières premières - Fabrication, maintenance et fin de vie du véhicule - Construction, maintenance et fin de vie infrastructures

TAB. 2.6 : Description des différents périmètres existant dans l'étude des véhicules, d'après (Picherit, 2010)

Chapitre 2. État de l'art

La figure suivante met en avant le manque d'applications à la mobilité d'outils d'estimation des impacts ayant une vision élargie en termes de périmètre considéré et en termes d'enjeux environnementaux pris en compte [9].

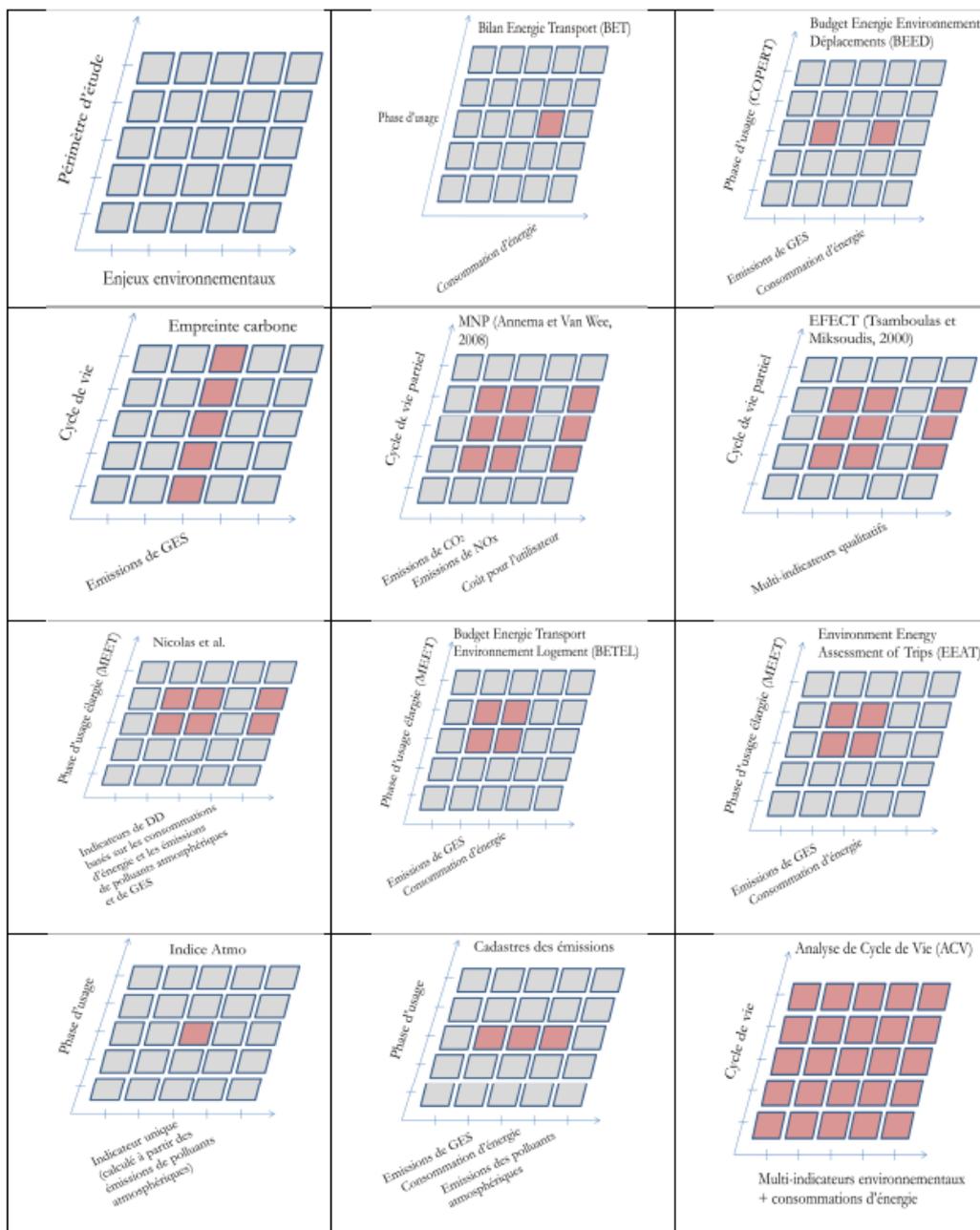


FIG. 2.4 : : Représentation graphique des différents outils d'évaluation selon deux paramètres : les enjeux environnementaux considérés et le périmètre couvert (Risch et al.n.d.)

Parmi les méthodologies relevées, l'ACV semble donc la plus pertinente pour répondre à ces problématiques. Le caractère multicritère et l'essence même de la méthode considé-

rant l'ensemble du cycle de vie permet une estimation au plus juste des émissions issues du transport.

Evaluation classique (Émissions de GES issues de la phase d'usage) : Les impacts environnementaux liés à la mobilité et aux modes de transport se restreignent souvent au moment du déplacement, à l'action de se déplacer : la phase d'usage. Ainsi, les normes d'homologation EURO ou encore l'étiquette CO₂-énergie sont basées sur cette unique phase. Cette partie propose de présenter les différentes manières d'appréhender les impacts environnementaux liés à cette phase d'usage, au niveau du véhicule d'abord, puis à l'échelle du territoire. L'exhaustivité ne sera pas visée dans cette partie. Cependant, le choix des méthodes abordées vise à représenter la diversité des méthodes existantes.

Approche Well to Wheel : L'approche "well-to-wheel" (du puits à la roue) est une méthode d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées au secteur du transport routier. Elle prend en compte toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement en énergie, depuis l'extraction des sources primaires jusqu'à l'utilisation finale par les véhicules. Les activités sont ainsi divisées en deux parties : WTT (well to tank), autrement dit du puits jusqu'au réservoir et TTW (tank to wheel), à savoir du réservoir à la roue, ou respectivement en amont et en aval. Les évaluations WTW sont donc l'effet combiné des deux parties.

1. **Well-to-Tank (du puits au réservoir) :** Cette partie évalue les émissions de GES associées à la production, au raffinage, au transport et à la distribution des carburants utilisés par les véhicules. Elle prend en compte les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et d'autres gaz à effet de serre émis tout au long de ces étapes. Les sources primaires d'énergie prises en compte peuvent inclure le pétrole brut, le gaz naturel, le charbon, les biocarburants, etc.
2. **Tank-to-Wheel (du réservoir à la roue) :** Cette partie évalue les émissions de GES provenant de la combustion du carburant dans les moteurs des véhicules et de l'utilisation des véhicules eux-mêmes. Cela comprend les émissions directes de CO₂, ainsi que les émissions indirectes liées à la production et à la distribution du carburant utilisé. Les facteurs pris en compte comprennent l'efficacité énergétique des moteurs, les émissions dues à l'utilisation de carburants spécifiques et d'autres facteurs techniques liés aux véhicules.

En combinant les deux aspects, l'approche "well-to-wheel" fournit une évaluation complète des émissions de GES tout au long du cycle de vie des carburants utilisés dans le transport routier, depuis leur extraction jusqu'à leur utilisation finale par les véhicules.

Cette approche permet d'évaluer les différentes options de carburants et de technologies de véhicules, en prenant en compte les émissions tout au long de la chaîne d'approvisionnement en énergie. Cela aide à évaluer l'impact environnemental global des véhicules et à orienter les politiques et les décisions en matière de mobilité vers des solutions plus durables sur le plan environnemental.

2.2 Concepts liées à la solution

2.2.1 Transport et approvisionnement

Généralités sur le transport de marchandises

Définition du transport de marchandises : Le système de planification de la distribution physique est défini comme une démarche de contrôle et de régulation des flux entre les opérations de circulation des produits finis, à partir du lieu de production jusqu'au consommateur final. Le transport en aval reste toujours l'activité la plus sous-traitée à présent. L'objectif de la planification des opérations de transport apparaît comme la réduction des coûts logistiques, en maintenant un niveau de service défini avec précision. Michel SAVY définit le transport comme suit : « Transporter des produits, les déplacer dans l'espace est une opération matérielle qui requiert de la main-d'œuvre, des équipements, des consommations intermédiaires (et notamment énergétiques) considérables. Le transport modifie les caractéristiques physiques des produits (leurs coordonnées spatio-temporelles), tout comme les opérations manufacturières en modifient la composition ou la morphologie [10].

”Le transport de fret est un processus industriel”. (SAVY, 2013) Donc le transport représente un processus industriel comme les autres processus qui contribuent à la valeur totale du produit. Ce processus est effectué en compte propre ou par des tiers, les transporteurs publics de marchandise. Quand le transport de marchandises est assuré par des tiers, il s'effectue dans le cadre d'un contrat de transport. La nature du contrat de transport est commerciale. Ce contrat énonce jusqu'où et par quel moyen la marchandise sera livrée (et dont le transporteur aura la responsabilité). Le transporteur est soumis à l'obligation de résultat. Le transport de marchandises est étroitement lié à la logistique.

Types de transport de marchandises : Ils existent plusieurs moyens de transport, qui varient selon les origines et les destinations, les caractéristiques du produit et selon les quantités transportées nous distinguons quatre types de transport :

- **Transport ferroviaire :** Les produits transportés sont principalement : les produits métallurgiques, les minerais, les produits agricoles, les combustibles et produits pétroliers.
- **Transport maritime :** Concerne principalement les matières premières telles que : le pétrole et ses produits dérivés, les minerais, le charbon, les céréales. Ce type de transport se fait soit en vrac (cas des minerais, des céréales) ou en conteneurs (cas des marchandises générales).
- **Transport aérien :** Le transport par voie aérienne est faible en tonnes transportées et concerne généralement des produits à forte valeur ajoutée (matériel informatique, de téléphonie, médical, médicaments, produits de luxe). Son inconvénient principal est son coût élevé.
- **Transport routier :** C'est le moyen de transport le plus utilisé, il représente le

prochain point dans notre mémoire et l'objet de l'étude de notre problématique. Le tableau ci-dessous représente un comparatif des différents types de transport utilisés pour le transport de marchandises :

Transport routier de marchandises

Le secteur du fret routier consiste à transporter par la route des marchandises entre les entreprises et entre les entreprises et les consommateurs et il est effectué en compte propre ou par des tiers. Le flux de marchandise déplacée se mesure en tonne kilomètre : c'est le déplacement d'une tonne de marchandise sur un kilomètre (SAUVANT, 2006) Pour une entreprise, le transport de marchandises est une activité indispensable dans la chaîne logistique [11]. Il permet l'approvisionnement de l'entreprise en matière première, effectuer les déplacements à l'intérieur de l'entreprise, l'acheminement des produits finis aux lieux de consommation.

Entreprise de transport : Une entreprise de transport est une entreprise commerciale, publique ou privée, spécialisée dans le déplacement des marchandises aux individus d'un endroit à un autre par tous les moyens et modes de transport (terrestre, fluvial, ferroviaire). L'entreprise de transport des marchandises assure la meilleure qualité avec une fiabilité maximum de ses services, avec des délais optimisés et respectés à ses clients. Le transport routier de marchandises offre une large gamme de services. Ce dernier est le plus favorisé pour l'acheminement des marchandises dans le sens où il permet d'acheminer toutes sortes de marchandises et facilite leurs expéditions vers toutes les destinations souhaitées.

Les intervenants dans le transport routier : Plusieurs parties prenantes interviennent dans la logistique de transport, en particulier quand les volumes de distribution sont importants, c'est le cas dans les groupes entreprises comme LA ou le transport est l'épine dorsale des opérations logistiques. La relation entre ces différents intervenants peut donc avoir un impact énorme sur la performance logistique, il est donc important de porter un regard et une attention particulière sur les interactions entre ces différents acteurs :

1. **Expéditeur :** Il a pour mission l'envoi de la marchandise au destinataire et exiger entreprise de transport pour distribuer les marchandises. En tant que tel, l'expéditeur choisit un transitaire basé sur le prix et la fiabilité.
2. **Opérateur :** L'opérateur est responsable du transport de marchandises et fournit le véhicule de fret nécessaire, c'est-à-dire camion / porte-charge, unités de chargement telles que conteneur, caisses mobiles et remorque. Les opérateurs établissent un planning des véhicules, déploient un pilote et notifient les liaisons de transport.
3. **Conducteur :** Conduit le véhicule de l'origine prédéfinie à la destination. Il peut choisir le lien / itinéraire routier entre deux points si le lien n'est pas pré-planifié

par l'opérateur. La vitesse du véhicule ainsi que le temps de trajet dépendent de l'activité du conducteur.

4. **Destinataire** : Entité qui dispose de l'habileté à recevoir les marchandises, Prend en compte à temps délibération et assure la qualité des marchandises transportées.

Coût climatique de la logistique de transport

Les trois principales sources de nuisance sur l'environnement sont l'activité industrielle, l'activité domestique et tertiaire, les transports. Ce sont les transports (52 MTep en 1998) qui connaissent la plus forte croissance moyenne de consommation énergétique avec 1,9% de croissance moyenne annuelle de 1973 à 1998. Si les améliorations techniques attendues permettent d'envisager des réductions de pollution unitaires substantielles dans ce secteur, l'inertie du renouvellement du parc automobile et la croissance des trafics attendue placent le secteur du transport en tête en termes de croissance des 20 prochaines années (soit une augmentation estimée à +52% des Tep et +23% du CO₂) [12].

Le secteur de la logistique (transport) représente 27% - 28% des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) dans le monde, et c'est le secteur qui connaît la croissance la plus rapide en termes d'émissions de GES. L'augmentation de la demande de mobilité personnelle et de transport commercial entraîne la croissance des émissions du secteur de la logistique. On estime également que la part des émissions provenant du secteur de la logistique sera responsable de la moitié de toutes les émissions de CO₂ d'ici 2050 (IETA).

Outre la combustion fossile, d'autres facteurs contribuent au changement climatique, notamment les modifications de l'utilisation des sols (par exemple, la déforestation), les processus industriels comme par exemple la production cimentière, l'agriculture à travers, les émissions de méthane du bétail) et la gestion des déchets. Néanmoins dans ce travail, nous nous sommes essentiellement concentrés sur les émissions issues du transport qu'à celle relevant du processus de production du clinker ou du ciment.

Le transport est donc l'un des secteurs les plus polluants ; il est fortement responsable de l'accroissement de la consommation d'énergie ainsi que des émissions de gaz à effet de serre (27% des émissions de gaz à effet de serre, 34% des émissions de CO₂). C'est le transport routier qui domine de manière écrasante le bilan énergétique. Il représente 80% de la consommation d'énergie, tous modes de transport confondus. De nombreux efforts ont été réalisés dans ce domaine. En effet, les véhicules consomment moins mais cette diminution est compensée par l'accroissement du trafic routier. On peut espérer à long terme, une baisse de la consommation d'énergie grâce au développement de nouvelles technologies : biocarburants, pile à combustible, véhicules hybrides et électriques. Mais de nombreux problèmes restent encore à résoudre dans ce domaine comme le stockage ou le recyclage des batteries pour les véhicules électriques.

Les opérations de transport en aval de la région MENA de Lafarge Holcim émettent 5,7 millions de tonnes de CO₂e.

Réseau et trafic routier

Capacité d'un réseau routier : Le premier objectif de l'étude du trafic est de connaître les différents flux de véhicules empruntant le réseau routier à un instant donné. Les problèmes liés à ce dernier touchent particulièrement au domaine de l'économie. Les infrastructures de transport, et en particulier les routes, doivent présenter une efficacité économique et sociale, au travers des avantages et des coûts sociaux des aménagements réalisés. Il est donc nécessaire d'entreprendre une démarche systématique visant à la connaissance des trafics. Il est nécessaire ainsi de définir la capacité pratique d'un réseau routier, qui est le débit horaire moyen au-delà duquel le plus petit incident risque d'entraîner la formation de bouchons, ou le flux maximal pouvant s'écouler sur une route particulière.

La capacité dépend des distances de sécurité (en milieu urbain ce facteur est favorable, il l'est beaucoup moins en rase campagne, où la densité de véhicules sera beaucoup plus faible) ; des conditions météorologiques ; des caractéristiques géométriques de la route. En général, le débit horaire moyen de pointe est défini en fonction de l'historique annuel des trafics, selon le type et nombre de voies de chaque route. Cependant, il n'existe pas de relation directe entre le nombre de voies d'une chaussée et le trafic, pour autant les études statistiques sur le réseau routier français ont permis de dégager les valeurs suivantes :

Type de voie	Seuil de gêne	Seuil de saturation
2 voies	8 500	15 000
3 voies	12 000	20 000
2*3 voies	25 000	45 000
3*3 voies	40 000	60 000

TAB. 2.7 : Seuil de gêne et de saturation des différents types de voies en UVP/jour

De sorte que l'UVP, ou l'unité de véhicule particulier, est une mesure utilisée pour prendre en compte les différents types de véhicules de la mesure de la circulation routière, elle correspond à :

- Un véhicule léger ou une camionnette = 1 UVP ;
- Un poids lourd de 3,5 tonnes et plus = 2 UVP ;
- Un cycle = 0,3 UVP.

Analyse et classification du trafic routier - Level Of Services : Souvent, il est nécessaire de déterminer quel niveau de trafic une installation de transport peut accueillir. L'idée est de savoir quel est le niveau de performance du système dans diverses conditions de fonctionnement. Ou en d'autres termes, quelle est la qualité du fonctionnement de l'installation routière. L'analyse du trafic, ou l'analyse du niveau de service, tente de répondre à cette question, à travers une évaluation quantitative de la capacité d'une

installation routière par rapport aux flux des véhicules ou des personnes pour lesquelles elle est conçue d'accueillir. Le niveau de service (LOS) d'une installation routière est un concept introduit pour relier la qualité du service de trafic de cette installation à un débit donné de véhicules. Ce concept a été introduit par HCM pour indiquer le niveau de qualité de trafic que l'on peut avoir sur un réseau routier sous différentes caractéristiques de fonctionnement et volume de trafic.

Le LOS est utilisé pour analyser les routes et les intersections en catégorisant le flux de trafic et en attribuant des niveaux de qualité du trafic en fonction de la mesure des certaines performances comme la vitesse des véhicules, la densité, la congestion, etc. Le LOS est défini ainsi par une lettre désignant une gamme de conditions d'exploitation sur un type particulier d'installation routière. HCM² a défini six lettres LOS, à savoir A, B, C, D, E et F, où A correspond à la meilleure qualité de service et de trafic, et F à la pire.

Le tableau ci-dessous résume pour chaque LOS :

V/C	LOS	Vitesse (km/h)	Description du trafic
< 0.6	A	80	Libre circulation
0.7	B	60	Débit libre raisonnable
0.8	C	50	Débit presque libre
0.85	D	40	Débit moyen
0.9	E	25	Débit à capacité
> 1	F	15	Débit congestionné

TAB. 2.8 : Description de chaque niveau de LOS (Dr. Tom V. Mathew, IIT Bombay – 2014)

A noté que :

- Le niveau de saturation du réseau ou de l'installation routière mesuré par le ratio V/C, de sorte que V correspond au flux de véhicules circulant sur l'installation, et C la capacité de saturation de l'installation ou du réseau.
- La vitesse dont il s'agit ici est la vitesse moyenne de circulation atteignable pour chaque niveau de service correspondant
- Le débit du trafic est bien évidemment tributaire de la vitesse de circulation et de l'indice de congestion routière.

Le transport routier en Algérie : En Algérie, le secteur du transport connaît une véritable mutation. Un grand nombre de projets ont été réalisés ou sont en phase de réalisation, afin de rendre ce secteur plus performant et plus efficace dans sa contribution au développement économique du pays (des investissements de 106.5 milliards USD dans

²HCM : The Highway Capacity Manual, est une publication établie par le bureau de recherche sur le transport de l'Académie Nationale des Sciences des Etats Unies

le secteur du transport et plus de 40 milliards USD depuis 1999). Les règles de temps de conduite qui existent dans chaque pays et ont fait l'objet d'une directive européenne sont résumées ici :

- Un chauffeur ne doit pas conduire plus de 4h 30 au maximum, à l'issue d'une période de conduite de 4h30, le conducteur doit observer 45 minutes de repos ou 3 fois 15 minutes de repos à l'intérieur des 4h30 de conduite.
- Le conducteur ne doit pas dépasser 9 heures de conduite par jour mais chaque semaine, il peut conduire 2 fois 10 heures par jour.
- Le repos journalier doit être de 11 heures consécutives par 24 heures.
- Le temps de conduite par quatorzaine ne doit pas excéder 90 heures avec 48 heures maximum sur la première semaine.
- Le repos hebdomadaire doit être de 45 heures si le conducteur rentre à son domicile et de 36 heures, autrement les frais de déplacement sont payés selon les conventions collectives de la profession 7.4 organisation des transports routiers.

2.2.2 Clustering et échantillonnage

Le clustering au service de la Supply Chain : L'analyse des données est une discipline qui est au service de la logistique et de la Supply chain de manière globale, en effet les différentes interactions, liens, ramifications et la grande quantité de données qui est générée par la gestion des flux, nécessitent un soin particulier pour ce qui est du traitement, de l'exploitation et de l'interprétation des données. Plusieurs méthodes de machine learning sont utilisées en analyse de données, le clustering en fait partie et est l'une des méthodes les plus utilisées de l'apprentissage non supervisé. En effet, cette méthode n'est pas utilisée pour essayer d'apprendre une relation de corrélation entre un ensemble de données d'entrées X une valeur de sortie Y à prédire, comme c'est le cas pour l'apprentissage supervisé, mais tente plutôt de trouver des patterns communs aux données. Notamment, en regroupant les observations qui partagent le maximum de similitude, et dans le même temps regroupe dans des clusters différents celles qui sont les plus dissemblables possible.

Échantillonnage : Parmi les procédés qui viennent à l'esprit lorsqu'on se propose de représenter un ensemble par un échantillon des unités qui le constituent, consiste à construire un échantillon qui ressemble à la population dont il est issu, dont le but est de faire des extrapolations sur l'ensemble de la population. L'échantillon doit au sens courant du mot être : représentatif. La désignation de l'échantillon résulte d'un choix "raisonné" d'où le nom de la méthode ("purposive Sampling" en anglais). Plusieurs techniques procèdent de cette idée. Nous parlerons de deux d'entre elles : la méthode des unités-types, la méthode des quotas [13].

Inférence Statistique : Le terme « inférence statistique » désigne l'ensemble des procédés et principes statistiques qu'on emploie lorsqu'on veut réaliser une recherche quantitative sur une population (univers de travail) qu'on ne peut examiner au complet. On doit alors prélever un échantillon opérationnel de cette population, décrire et analyser cet échantillon, et ensuite généraliser les résultats (inférence statistique) à sa population de référence. En d'autres termes, l'inférence statistique est l'ensemble des techniques permettant d'induire les caractéristiques d'un groupe général (la population) à partir de celles d'un groupe particulier (l'échantillon), en fournissant une mesure de la certitude de la prédiction : la probabilité d'erreur.

Notion de représentativité d'un échantillon : Pour Yves Tillé (2001) « Le concept de représentativité est aujourd'hui à ce point galvaudé qu'il est désormais porteur de nombreuses ambivalences. Cette notion, d'ordre essentiellement intuitif, est non seulement sommaire mais encore fautive et, à bien des égards, invalidée par la théorie. » Pour Jean Vaillant (2005) « La définition d'échantillon représentatif diffère selon que le plan d'échantillonnage est probabiliste ou non probabiliste :

- **Un plan probabiliste** fournit un échantillon représentatif dès lors que chaque individu de la population a une probabilité connue et non nulle d'être inclus dans l'échantillon.
- **Un plan non probabiliste** fournit un échantillon représentatif si la structure de l'échantillon pour certaines variables clés est similaire à celle de la population cible. Par exemple, on peut vouloir construire un échantillon pour lequel les proportions de catégories d'individus sont similaires dans l'échantillon à celles de la population cible (c'est le principe de la méthode dite des quotas).»

La constitution de l'échantillon des parcours afin d'assurer une bonne représentativité de l'échantillon, doit être suffisamment importante et issue d'un tirage réalisé avec soin.

Type d'échantillonnage : Différentes modalités d'échantillonnage existent, en fonction du plan d'échantillonnage, du type de données traitées, du besoin et de l'application :

Deux grands types de données	Le quantitatif (les « chiffres »)	Échantillon- nage non pro- babiliste	<ul style="list-style-type: none"> - Échantillon accidentel - Échantillon de volontaires - Échantillon par quotas - Échantillon par choix raisonné - Échantillon par boule de neige
		Échantillon- nage probabiliste	<ul style="list-style-type: none"> - Échantillon aléatoire simple - Échantillon systématique - Échantillon stratifié - Échantillon en grappes - Échantillon aréolaire
	Le qualitatif (les « lettres »)	Échantillon- nage par cas unique	<ul style="list-style-type: none"> - Échantillon d'acteur - Échantillon de milieu, institutionnel ou géographique - Échantillon événementiel
		Échantillon- nage par cas multiples (ou multi-cas)	<ul style="list-style-type: none"> - Échantillon par contraste - Échantillon par homogénéisation - Échantillon par contraste- approfondissement - Échantillon par contraste-saturation - Échantillon par quête du cas négatif

FIG. 2.5 : Modalités d'échantillonnage

1. **L'échantillonnage par quota :** L'échantillonnage par quota est un type de méthode d'échantillonnage non probabiliste. Cela signifie que les éléments de la population sont choisis sur une base non aléatoire et que tous les membres de la population n'ont pas une chance égale d'être sélectionnés pour faire partie du groupe échantillon [14].

Dans cette méthode d'échantillonnage, les chercheurs utilisent généralement un algorithme, pour créer deux étapes afin d'acquérir leur groupe d'échantillons. Tout d'abord, ils énumèrent les caractéristiques de contrôle pertinentes et leur répartition dans la population cible. Ceci afin de s'assurer que la composition du groupe échantillon sélectionné est représentative de la composition de la population cible (en ce qui concerne les caractéristiques de contrôle énumérées).

La deuxième étape consiste à sélectionner les éléments pour le groupe d'échantillons en fonction de la commodité et/ou du jugement du chercheur. C'est ce qui différencie l'échantillonnage par quota de l'échantillonnage stratifié, car l'échantillonnage stratifié utilise l'échantillonnage aléatoire simple ou d'autres méthodes d'échantillonnage probabiliste pour choisir des éléments qui vont représentés chaque groupe d'échantillon une fois les strates divisées.

2. **L'échantillonnage stratifié :** L'échantillonnage stratifié est une méthode d'échantillonnage utilisée en statistiques pour sélectionner un échantillon représentatif d'une

population. L'objectif de l'échantillonnage stratifié est de diviser la population en sous-groupes homogènes appelés strates, puis de sélectionner des individus de chaque strate de manière proportionnelle à leur importance relative dans la population [14].

La population est initialement subdivisée en sous-groupes homogènes (strates) définis selon un ou plusieurs critères (appelés variables d'intérêt). Dans chaque strate, on prélève aléatoirement des individus pour obtenir des sous-échantillons aléatoires simples.

- (1) **Définition des strates :** La population est divisée en groupes homogènes ou strates en fonction de certaines caractéristiques importantes.
- (2) **Détermination de la taille de l'échantillon pour chaque strate :** Une fois que les strates sont définies, la taille de l'échantillon est allouée à chaque strate en fonction de sa taille relative dans la population ou de l'importance statistique de la strate.
- (3) **Sélection de l'échantillon :** Dans chaque strate, des individus sont sélectionnés de manière aléatoire ou systématique pour former l'échantillon final. L'échantillonnage peut être proportionnel, c'est-à-dire que le nombre d'individus sélectionnés dans chaque strate est proportionnel à la taille de la strate, ou il peut être égal, où le même nombre d'individus est sélectionné dans chaque strate.

L'échantillonnage stratifié permet de s'assurer que chaque sous-groupe de la population est représenté de manière adéquate dans l'échantillon, ce qui permet d'obtenir des estimations plus précises pour des caractéristiques spécifiques de chaque strate. Cette méthode est particulièrement utile lorsque la population présente une hétérogénéité significative et qu'il est important de prendre en compte les variations entre les sous-groupes lors de l'analyse statistique.

Choix des variables d'intérêt : Pour mériter d'être retenue comme variable "contrôle", une variable quantitative ou qualitative doit présenter simultanément les avantages suivants :

- Sa distribution statistique dans la population est bien connue.
- Son observation par les enquêteurs sur le terrain est facile et ne comporte pas de sérieux risques d'erreurs.
- Une corrélation étroite existe entre la variable contrôlée et la variable(s) étudiée (s).

Les deux premières conditions doivent être remplies pour qu'il soit possible d'appliquer la méthode ; la troisième condition doit être remplie pour que la méthode soit efficace.

Taille de l'échantillon : La taille de l'échantillon dépend de nombreux paramètres comme le budget de l'enquête, la méthode d'échantillonnage, le type de collecte, etc.

Nous y ajouterons des critères liés aux résultats que nous souhaitons établir à partir de ces données empiriques. Leur précision (attendue) sera déterminante pour établir la taille de l'échantillon. Pour cela on peut s'appuyer sur des outils permettant d'estimer la taille minimale (idéale) de l'échantillon selon la précision attendue, la valeur de la variable d'intérêt principale, et le seuil de significativité que l'on souhaite utiliser pour rejeter l'hypothèse d'indépendance.

Par exemple, si l'on s'intéresse aux scores des intentions de vote, pour les élections présidentielles américaines de 2008, en faveur de B. Obama ou de J. McKain, on peut supposer que les résultats seront aux alentours de 50% (p) pour chaque candidat, ce qui exigera une bonne précision du sondage pour dégager un favori ; nous souhaitons qu'un écart d'un point (e) nous permette d'avoir une différence significative au seuil (α) de 5%. Nous obtenons alors la taille de notre échantillon par la formule :

$$n = \frac{(Z^2 * p * (1 - p))}{(E^2)} \quad (2.1)$$

Tel que :

- n représente la taille de l'échantillon nécessaire,
- Z est le score correspondant au niveau de confiance souhaité. Pour un niveau de confiance de 95%, Z est généralement égal à 1,96,
- p est l'estimation de la proportion de la caractéristique étudiée dans la population,
- E est la marge d'erreur souhaitée (précision)

Partitionnement des données (le clustering)

Le partitionnement de données (clustering, en Anglais) est une technique d'apprentissage non-supervisé englobant plusieurs méthodes de base mathématiques qui permettent d'identifier des groupes d'objets similaires appelés clusters et cela en fonction des variables qui caractérisent chaque objet.

On note $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ l'ensemble des n variables caractérisant m objets. Les données sont généralement représentées par une matrice de taille $m*n$. Le clustering a donc pour objectif de regrouper les objets jugés similaires dans un même cluster et séparer les objets dissimilaires dans des clusters distincts.

On retrouve généralement deux types de clustering :

1. **Le clustering hiérarchique** : Un clustering hiérarchique est un partitionnement récursif d'un ensemble de données en clusters de plus en plus petits. L'entrée est un graphe pondéré dont les poids des bords représentent les similarités ou les dissimilarités par paires entre les points de données. Un clustering hiérarchique est

représenté par un arbre à racines où chaque feuille représente un point de données et chaque nœud interne représente un cluster contenant ses feuilles descendantes. Le calcul d'un clustering hiérarchique est un problème fondamental dans l'analyse des données ; il est utilisé de manière routinière pour analyser, classer et prétraiter de grands ensembles de données. Un clustering hiérarchique fournit des informations utiles sur les données qui peuvent être utilisées, par exemple, pour diviser une image numérique en régions distinctes de différentes granularités, pour identifier les communautés dans les réseaux sociaux à différents niveaux sociétaux, ou pour déterminer l'arbre ancestral de la vie.

2. **Le clustering non hiérarchique (partitionnement) :** Le clustering non hiérarchique implique la formation de nouveaux clusters en fusionnant ou en divisant les clusters. Il ne suit pas une structure arborescente comme le clustering hiérarchique. Cette technique regroupe les données afin de maximiser ou de minimiser certains critères d'évaluation. Parmi les algorithmes les plus utilisés dans ce type de clustering, on retrouve le K-means.

Machine Learning

La notion qui englobe toute méthode permettant de construire un modèle de la réalité à partir de données, soit en améliorant un modèle partiel ou moins général, soit en créant complètement le modèle. "[Cornuéjols et Miclet, 2003]. L'apprentissage automatique est un sous-domaine de l'intelligence artificielle qui fait référence au développement de méthodes qui permettent à une machine d'évoluer grâce à un processus d'apprentissage, et ainsi de résoudre les problèmes pour lesquels les algorithmes classiques n'offrent pas de solution. En d'autres termes, lorsque nous ne connaissons pas de solution exacte, nous ne pouvons pas écrire de programme informatique.

L'apprentissage automatique consiste alors à programmer des algorithmes permettant d'apprendre automatiquement de données et d'expériences passées pour proposer des solutions à ces problèmes. [Gacogne, 2015].

Bien qu'il soit actuellement promu par les nouvelles technologies et les nouveaux usages, l'apprentissage automatique n'est pas un domaine de recherche récent. Nous avons trouvé la première définition en 1959, grâce à l'un des pionniers de l'intelligence artificielle, Arthur Samuel, qui a défini l'apprentissage automatique comme un domaine de recherche visant à renforcer l'apprentissage de la machine sans programmation explicite. En 1997, Tom Mitchell de l'Université Carnegie Mellon a fourni une définition plus précise : "On dit qu'un programme d'ordinateur apprend de l'expérience E par rapport à une certaine classe de tâches T et à la mesure de performance P , si sa performance aux tâches en T , telle que mesurée par P , s'améliore avec l'expérience E ".

La tâche T représente l'objectif d'un algorithme d'apprentissage, souvent intégré par l'utilisateur sous forme d'exemples historiques. L'utilisateur effectue une mesure de performance à travers plusieurs métriques sélectionnées par lui-même en fonction de la situation de recherche et de l'algorithme d'apprentissage utilisé, il s'agit de la mesure de perfor-

mance P.

L'expérience E représente toutes les données, qui serviront de base à la machine pour construire un modèle automatique.

Le Machine Learning est à la croisée de plusieurs disciplines :

- Les statistiques : pour l'inférence de modèles à partir de données ;
- Les probabilités : pour modéliser l'aspect aléatoire inhérent aux données et au problème d'apprentissage ;
- L'intelligence artificielle : pour étudier les tâches simples de reconnaissance de formes que font les humains (comme la reconnaissance de chiffres par exemple), et parce qu'elle fonde une branche de l'AA dite symbolique qui repose sur la logique et la représentation des connaissances ;
- L'optimisation : pour optimiser un critère de performance afin, soit d'estimer des paramètres d'un modèle, soit de déterminer la meilleure décision à prendre étant donnée une instance d'un problème.
- L'informatique : puisqu'il s'agit de programmer des algorithmes et qu'en AA ceux-ci peuvent être de grande complexité et gourmands en termes de ressources de calcul et de mémoire.

Types d'apprentissage : Le machine learning nous permet de répondre à des problématiques diverses et variées, voici les 5 types d'apprentissages les plus utilisés en pratique :

1. **Supervisé :** On dispose d'un ensemble d'objets et pour chaque objet une valeur cible associée ; il faut apprendre un modèle capable de prédire la bonne valeur cible d'un objet nouveau.
2. **Non supervisé :** On dispose d'un ensemble d'objets sans aucune valeur cible associée ; il faut apprendre un modèle capable d'extraire les régularités présentes au sein des objets pour mieux visualiser ou appréhender la structure de l'ensemble des données.
3. **Par renforcement :** On dispose d'un ensemble de séquences de décisions (politiques ou stratégiques) dans un environnement dynamique, et pour chaque action de chaque séquence une valeur de récompense (la valeur de récompense de la séquence est alors la somme des valeurs des récompenses des actions qu'elle met en oeuvre) ; il faut apprendre un modèle capable de prédire la meilleure décision à prendre étant donnée un état de l'environnement.
4. **Semi-supervisé :** On dispose d'un petit ensemble d'objets avec pour chacun une valeur cible associée et d'un plus grand ensemble d'objets sans valeur cible ; il faut tirer profit à la fois des données avec et sans valeurs cibles pour résoudre des tâches d'apprentissage supervisé ou non supervisé.

5. **Actif** : On dispose d'un petit ensemble d'objets avec pour chacun une valeur cible associée ; il faut interagir avec l'utilisateur et lui demander de donner la valeur cible d'un nouvel objet afin de mieux apprendre le modèle de prédiction.

K-Means clustering

K-Means est l'un des algorithmes d'apprentissage non supervisé les plus simples, qui résout le problème bien connu de clustering. La procédure suit une méthode simple et facile pour classer un ensemble de données donné par le biais d'un certain nombre de grappes. Il a été mentionné pour la première fois par James MacQueen en 1967, mais l'idée a été lancée en 1957 par Hugo Steinhaus.

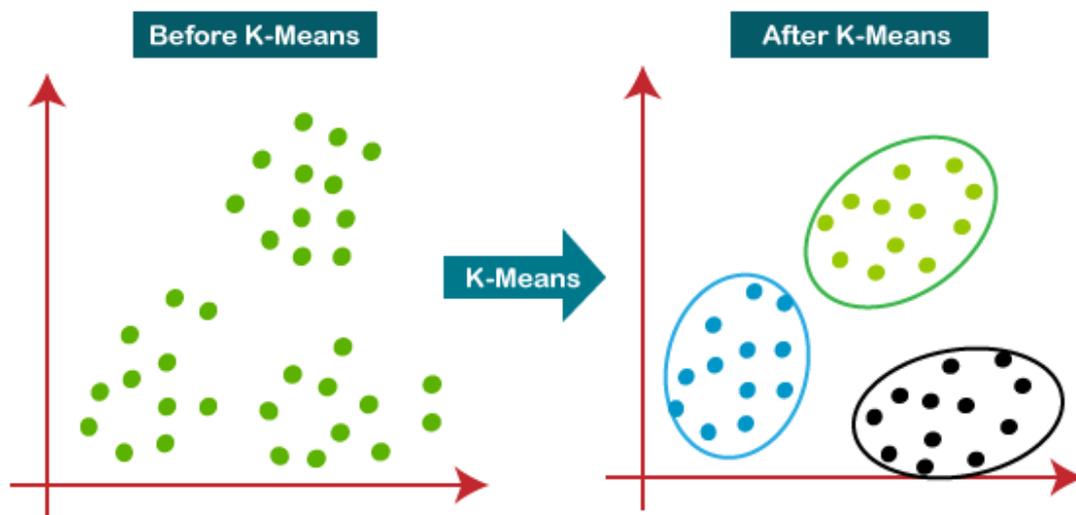


FIG. 2.6 : K-Means clustering

L'algorithme K-means a été appliqué dans une variété de domaines tels que la segmentation d'images, la maladie prédiction, la classification du trafic réseau. L'algorithme partitionne n échantillons d'un ensemble de données en un nombre fixe de k sous-ensembles/clusters disjoints, chaque échantillon appartenant à l'un des k clusters. La valeur de k doit être prédéfinie. Les centres des clusters sont appelés centroïdes et sont initialement choisis au hasard dans le sous-espace [15]. L'algorithme fonctionne en 2 étapes, dans la première étape tous les points de données sont affectés au cluster dont le centroïde est le plus proche. Dans la deuxième étape, tous les clusters recalculent et mettent à jour l'emplacement des centroïdes en se basant sur la moyenne de tous les points de données assignés à leurs clusters. Ces 2 étapes alternées se poursuivent jusqu'à ce que les centroïdes cessent de se déplacer (Towardsdatascience, 2019).

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n |x^j - c_j|^2 \quad (2.2)$$

Tel que :

- k , nombre de clusters ;
- n , nombre des points de données ;
- x_j , point de données ;
- c_j , centroid du cluster J.

Validation du modèle

En machine learning la validation des données fait référence au processus par lequel les modèles entraînés sont évalués à l'aide de métriques spécifiques à chaque type d'apprentissage. L'évaluation d'un modèle de clustering s'effectue généralement sur trois différentes étapes illustrées sur la figure suivante :

- Mesure de la tendance ;
- Détermination du nombre de clusters optimal ;
- Mesure de la qualité du clustering.

Mesure de la tendance : Avant d'évaluer la performance du clustering, il est très important de s'assurer que la base de données a une tendance au clustering et ne contient pas de points uniformément distribués. Si les données ne contiennent pas de tendance au clustering, les clusters identifiés par les algorithmes les plus avancés peuvent ne pas être pertinents. La distribution non-uniforme des points dans l'ensemble des données devient importante dans le clustering, car c'est sur cette base que l'algorithme va opérer le regroupement.

Pour effectuer cette d'évaluation, il existe deux méthodes communément utilisées :

- Test statistique de Hopkins2
- L'algorithme VAT qui permet de visualiser le nombre de clusters possible pour une base de données précise à travers un graphique.

Détermination du nombre de clusters optimal : Certains algorithmes de clustering, comme K-means, requièrent le nombre de clusters, k , comme paramètre d'entrée. Obtenir le nombre optimal de clusters est très important dans l'analyse. Si k est trop élevé ou trop faible, alors les points de données seront incorrectement répartis. Par conséquent, il est important de déterminer un nombre de clusters adapté selon la structure de nos données.

La détermination d'un k adéquat est tributaire d'une subjectivité qui peut être problématique et aura une incidence majeur sur l'interprétation de nos résultats, cependant il existe quelques méthodes qui permettent d'obtenir le K optimal :

- Exigences liées au cas étudié ou avis d'experts ;
- Approche mathématique en utilisant la méthode du coude ;
- Approche statistique par la méthode du gap.

Mesure de la qualité : La qualité d'une classification K-means peut être mesurée en utilisant l'inertie intra-classe et l'inertie inter-classe. L'inertie est une mesure de la cohésion des points à l'intérieur de chaque cluster. Plus l'inertie intra-cluster est faible, meilleure est la qualité du clustering.

L'inertie intra-cluster représente la somme des distances au carré entre chaque point et son centroïde correspondant. Pour évaluer la qualité de la classification K-means, vous pouvez calculer l'inertie intra-cluster et chercher à minimiser cette valeur.

$$I_a = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^{n_l} d(M_i, G_l)^2 \quad (2.3)$$

Quant à l'inertie inter-cluster, en la mesurant on cherche à répondre à la question suivante : À quel point nos clusters sont éloignés les uns des autres ? Une bonne répartition des données va donc maximiser l'inertie inter-classe. Cette métrique représente la somme des distances au carré de chaque cluster par rapport à l'inertie globale. Plus les centroïdes des clusters sont éloignés, plus la classification sera de bonne qualité.

$$I_e = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^k n_l d(G_l, G_I)^2 \quad (2.4)$$

2.2.3 Modélisation et prédiction

Distinguons deux types de problèmes : la présence ou non d'une variable à expliquer Y ou d'une forme à reconnaître qui a été conjointement avec X , observée sur les mêmes objets. Dans le premier cas il s'agit d'un problème de modélisation ou apprentissage supervisé : trouver une fonction Φ susceptible, au mieux selon un critère à définir, de reproduire Y en ayant observé X [16].

$$Y = \Phi(X) + \epsilon \quad (2.5)$$

Où ϵ symbolise le bruit ou erreur de mesure avec le parti pris le plus commun que cette erreur est additive.

Dans le cas contraire, en l'absence d'une variable à expliquer, il s'agit alors d'apprentissage dit non-supervisé.

Dans la tradition statistique, la notion de modèle est centrale surtout lorsque la finalité est explicative. Le but étant d'approcher la réalité, le vrai modèle, éventuellement basé sur une théorie physique, économique ... sous-jacente. Le choix du modèle (cf. ci-dessous) est

alors orienté par des critères d'ajustement des décisions de validité, de présence d'effets, basées sur des tests reposant sur des hypothèses probabilistes. L'interprétation du rôle de chaque variable explicative est prépondérante dans la démarche de prévision.

Le type des variables statistiques considérées diffèrent selon l'espace dans lequel elles prennent leurs valeurs. Elles peuvent être qualitatives à valeurs dans un ensemble de cardinal fini ou quantitatives à valeurs réelles voire fonctionnelles (Besse et Cardot, 2003).

Certaines méthodes d'apprentissage ou de modélisation s'adaptent à tout type de variables explicatives, tandis que d'autres sont spécialisées. Enfin, si Y à expliquer est qualitative, on parle de *discrimination*, classement ou reconnaissance de forme tandis que si Y est quantitative on parle, d'un problème de *régression*. Dans ce cas encore, certaines méthodes sont spécifiques (régression linéaire, analyse discriminante) tandis que d'autres s'adaptent sans modification profonde remettant en cause leur principe (réseaux de neurones, arbres...).

Matrice de covariance

La matrice de covariance est essentielle pour mettre en évidence l'interdépendance des variables dans un ensemble de données. Elle contribue à cette analyse en mesurant les covariances entre les variables. Une covariance positive indique une relation linéaire directe entre les variables, tandis qu'une covariance négative indique une relation linéaire inverse. Ainsi, en examinant les valeurs hors-diagonale de la matrice dite de covariance, on peut identifier les paires de variables qui sont interdépendantes et qui varient ensemble.

Les éléments diagonaux de la matrice de covariance représentent les variances des variables individuelles. Des variances plus élevées indiquent une plus grande dispersion des valeurs pour une variable donnée. Ainsi, en examinant les variances sur la diagonale principale, on peut identifier les variables qui ont une plus grande variabilité et qui peuvent donc avoir un impact plus important sur l'ensemble des données.

Pour ce qui est de la visualisation la matrice de covariance peut être représentée graphiquement sous la forme d'un heatmap ou d'un diagramme de corrélation, où les valeurs de covariance sont représentées par des couleurs ou des symboles. Cela permet de visualiser rapidement les relations entre les variables et de détecter les schémas d'interdépendance.

En résumé, la matrice de covariance est un outil clé pour mettre en évidence l'interdépendance des variables dans un ensemble de données. Elle permet de quantifier les relations entre les variables, de détecter les schémas de variation conjointe et d'effectuer des analyses plus avancées.

La matrice de covariance joue un rôle important dans la mesure de la contribution de chaque variable explicative à l'explication de la variable endogène y dans le cadre de certaines méthodes statistiques, telles que l'analyse de régression multivariée.

Ces coefficients indiquent l'impact relatif de chaque variable explicative sur la variable endogène.

En utilisant la matrice de covariance, il est possible de calculer la contribution de

chaque variable explicative en comparant la covariance entre la variable endogène et chaque variable explicative avec la variance de la variable endogène. Les variables explicatives qui ont une covariance plus élevée avec la variable endogène, par rapport à leur propre variance, sont considérées comme ayant une plus grande contribution à l'explication de la variable endogène.

Régression

Le principe d'un modèle de régression est de trouver une relation mathématique entre une variable dépendante (ou cible) et une ou plusieurs variables indépendantes (ou caractéristiques). L'objectif est de prédire ou estimer la valeur de la variable dépendante en fonction des valeurs des variables indépendantes.

Le modèle de régression cherche à déterminer les coefficients qui permettent de pondérer les variables indépendantes de manière à minimiser l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs réelles de la variable dépendante. Cela se fait en utilisant des techniques statistiques qui permettent d'estimer les paramètres du modèle.

Une fois que le modèle de régression est construit, il peut être utilisé pour faire des prédictions sur de nouvelles données en utilisant les valeurs des variables indépendantes. Le modèle estime la valeur de la variable dépendante en appliquant les coefficients appris aux variables indépendantes.

Il existe différents types de modèles de régression, tels que la régression linéaire, la régression polynomiale, la régression logistique, etc. Chaque type de modèle a ses propres hypothèses et techniques d'estimation, mais le principe fondamental reste le même : trouver la relation entre les variables indépendantes et la variable dépendante.

Régression linéaire simple : Bien que nos données ne soient pas sous la forme de séries chronologiques, la régression linéaire peut donner des résultats. La régression linéaire est une méthode d'analyse statistique utilisée pour modéliser la relation entre une variable dépendante (variable endogène) (Consommation de carburant) dans notre cas et une ou plusieurs variables indépendantes (variables explicatives). Dans le cas présent la régression linéaire sera utilisée pour modéliser la relation entre les variables indépendantes et la variable dépendante. La régression linéaire servira à estimer les coefficients de régression qui quantifient l'impact des variables exogènes sur la variable endogène.

L'absence de caractère chronologique des séries de données n'empêche pas en soi l'utilisation de la régression linéaire. Ce qui importe le plus, c'est la nature de la relation entre les variables et la conformité de cette relation avec les hypothèses sous-jacentes de la régression linéaire. Nous avons supposé que la relation est en effet linéaire.

$$C_{diesel} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_4 \cdot X_4 + \beta_5 \cdot X_5 \quad (2.6)$$

Où : C_{diesel} : représente la consommation de carburant par rotation, autrement dit par livraison.

Régression Polynomiale : La régression polynomiale est une technique de régression qui permet de modéliser les relations non linéaires entre les variables indépendantes et la variable dépendante. Plutôt que de s'appuyer sur une relation linéaire, elle utilise des polynômes de degrés supérieurs pour capturer des formes plus complexes. Par exemple, une régression polynomiale d'ordre 2 utilise des termes quadratiques (x^2) en plus des termes linéaires (x), tandis qu'une régression polynomiale d'ordre 3 inclut également des termes cubiques (x^3), et ainsi de suite. La régression polynomiale peut être appliquée en utilisant des techniques classiques de régression linéaire en incluant simplement les termes polynomiaux appropriés dans le modèle.

La régression polynomiale modélise la relation entre les variables indépendantes X_j et la variable dépendante Y en utilisant des polynômes de degrés supérieurs. La modélisation mathématique d'une régression polynomiale d'ordre n est donnée par :

$$Y(x) = \beta_0 + \beta_1 * x + \beta_2 * x^2 + \dots + \beta_n * x^n \quad (2.7)$$

Arbre de décision : On considère d'abord le problème de classement. Chaque élément x de la base de données est représenté par un vecteur multidimensionnel (x_1, x_2, \dots, x_n) correspondant à l'ensemble de variables descriptives du point. Chaque nœud interne de l'arbre correspond à un test fait sur une des variables x_i :

- Variable catégorielle : génère une branche (un descendant) par valeur de l'attribut ;
- Variable numérique : test par intervalles (tranches) de valeurs.

Les feuilles de l'arbre spécifient les classes. Une fois l'arbre construit, le classement d'un nouveau candidat se fait par une descente dans l'arbre, de la racine vers une des feuilles (qui encode la décision ou la classe). A chaque niveau de la descente on passe un nœud intermédiaire où une variable x_i est testée pour décider du chemin (ou sous-arbre) à choisir pour continuer la descente [17].

Au départ, les points de la base d'apprentissage sont tous placés dans le nœud racine. Une des variables de description des points est la classe du point (la « vérité terrain ») ; cette variable est dite « variable cible ». La variable cible peut être catégorielle (problème de classement) ou valeur réelle (problème de régression). Chaque nœud est coupé (opération split) donnant naissance à plusieurs nœuds descendants. Un élément de la base d'apprentissage situé dans un nœud se retrouvera dans un seul de ses descendants [18]. Les arbres de décision reposent donc sur deux principes :

1. L'arbre est construit par partition récursive de chaque nœud en fonction de la valeur de l'attribut testé à chaque itération (top-down induction). Le critère optimisé est la homogénéité des descendants par rapport à la variable cible. La variable qui est testée dans un nœud sera celle qui maximise cette homogénéité.
2. Le processus s'arrête quand les éléments d'un nœud ont la même valeur pour la variable cible (homogénéité).

Random Forest Regression (Les forêts aléatoires) : L'importance des variables dans un modèle Random Forest permet d'évaluer la contribution de chaque variable indépendante à la prédiction du modèle. Dans un modèle Random Forest, l'importance des variables est souvent mesurée à l'aide de deux métriques principales :

1. **Importance de Gini :** Cette mesure est basée sur le critère de Gini utilisé dans la construction des arbres de décision du Random Forest. Elle mesure l'importance relative de chaque variable en évaluant la réduction de l'indice de Gini lorsque la variable est utilisée pour diviser les nœuds de l'arbre.
2. **Importance de permutation :** Cette mesure évalue l'importance d'une variable en calculant la diminution de la précision du modèle lorsque les valeurs de cette variable sont mélangées aléatoirement. Plus la précision diminue après le mélange aléatoire, plus l'importance de la variable est élevée.

L'importance des variables dans un modèle Random Forest permet de déterminer quelles variables ont le plus d'influence sur les prédictions du modèle. Cela peut être utile pour comprendre quelles variables sont les plus pertinentes pour le problème de prédiction, identifier les variables les plus prédictives et potentiellement réduire la dimensionnalité du modèle en se concentrant sur les variables les plus importantes.

Castboost Regression : CatBoost est un algorithme d'apprentissage automatique basé sur le gradient boosting qui a été spécialement conçu pour traiter efficacement les variables catégorielles. Il utilise une stratégie de codage basée sur les arbres et une technique d'élagage pour gérer les variables catégorielles de manière optimale. CatBoost est capable de traiter automatiquement les données catégorielles sans nécessiter une conversion préalable en variables numériques. Il est particulièrement adapté aux problèmes de régression où les données contiennent des variables catégorielles importantes.

xgboost Regression : XGBoost est une implémentation optimisée de l'algorithme de boosting de gradient, qui est similaire à AdaBoost mais avec quelques améliorations. XGBoost utilise un algorithme de descente de gradient pour optimiser les fonctions de perte lors de la création de modèles faibles successifs. Il prend en compte des critères supplémentaires tels que la régularisation et la gestion des valeurs manquantes. XGBoost est très populaire pour les problèmes de régression et de classification en raison de sa capacité à modéliser des relations complexes dans les données.

Adaboost Regression : AdaBoost (Adaptive Boosting) est un algorithme d'apprentissage automatique qui combine plusieurs modèles d'apprentissage faibles (par exemple, des arbres de décision peu profonds) pour créer un modèle fort. C'est un méta-algorithme de boosting introduit par Yoav Freund et Robert Schapire qui repose sur la sélection itérative de classifieur faible en fonction d'une distribution des exemples d'apprentissage. Chaque exemple est pondéré en fonction de sa difficulté avec le classifieur courant. C'est un exemple de la méthode des poids multiplicatifs (multiplicative weights update method).

Dans le cas de la régression, AdaBoost utilise une pondération des exemples d'apprentissage pour mettre davantage l'accent sur les exemples difficiles à prédire. Les modèles faibles sont entraînés de manière itérative en ajustant les poids des exemples, et les prédictions finales sont obtenues par une combinaison pondérée des prédictions des modèles faibles.

Soit un ensemble d'observations : $(x_1, y_1) \dots (x_m, y_m)$ ou $x_i \in X$ sont les caractéristiques de l'individu i et $y_i \in Y = \{-1, 1\}$ la variable à prédire.

On initialise le poids associé à i , $D_t(i) = \frac{1}{m}$, $i = 1, \dots, m$.

Pour $t = 1, \dots, T$: trouver la fonction $h_t : X \rightarrow \{-1, +1\}$ qui minimise l'erreur de classification ϵ_t en fonction des poids D_t . C'est-à-dire h_t qui vérifie le programme de minimisation suivant : $h_t = \arg \min_{h \in \mathcal{H}} \sum_{i=1}^m D_t(i) [y_i \neq h(x_i)]$

$\epsilon_t = \sum_{i=1}^m D_t(i) [y_i \neq h(x_i)]$ est l'erreur du modèle.

- Si $\epsilon_{min,t} < 0.5$ la fonction est sélectionnée, sinon l'algorithme s'arrête

- On calcule alors le pas du gradient : $\alpha_t \in \mathbf{R}$, avec $\alpha_t = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - \epsilon_t}{\epsilon_t}$

- On met ensuite à jour le poids des exemples : $D_{t+1}(i) = \frac{D_t(i) e^{-\alpha_t y_i h_t(x_i)}}{Z_t}$

avec Z_t un facteur de normalisation égal à $2\sqrt{\epsilon_t(1 - \epsilon_t)}$

Quand l'algorithme s'arrête à l'itération M , le classifieur résultant du processus de sélection est :

$$H(x) = \text{sign} \left(\sum_{t=1}^M \alpha_t h_t(x) \right)$$

Choix d'un modèle de prédiction

De façon un peu schématique, on peut associer la pratique de la modélisation statistique à trois objectifs qui peuvent éventuellement être poursuivis en complémentarité ou pas :

- **Descriptif** : Il vise à rechercher de façon exploratoire les liaisons entre la variable endogène Y et d'autres variables, potentiellement explicatives, X_j qui peuvent être nombreuses afin, par exemple d'en sélectionner un sous-ensemble. A cette stratégie, à laquelle peuvent contribuer des Analyses en Composantes Principales (ACP),

correspond des algorithmes de recherche (pas a pas) moins performants mais économiques en temps de calcul si p est grand. Si n est petit, et la recherche suffisamment longue avec beaucoup de variables explicatives, il sera toujours possible de trouver un "bon" modèle expliquant y ; c'est l'effet data mining dans les modèles économétriques appelés maintenant *data snooping*.

- **Explicatif** : Le deuxième objectif est sous-tendu par une connaissance à priori du domaine concerné dont des résultats théoriques peuvent vouloir être confirmés, infirmés ou précisés par l'estimation des paramètres. Dans ce cas, les résultats inférentiels précédents permettent de construire "le bon test" conduisant à la prise de décision recherchée. Utilisées hors de ce contexte, les statistiques de test n'ont plus alors qu'une valeur indicative au même titre que d'autres critères plus empiriques.

Prédictif : Dans le troisième cas, l'accent est mis sur la qualité des estimateurs et des prédicteurs qui doivent, par exemple, minimiser une erreur quadratique moyenne. C'est la situation rencontrée en *apprentissage*. Ceci conduit à rechercher des modèles parcimonieux c'est-à-dire avec un nombre volontairement restreint de variables explicatives. Le meilleur modèle ainsi obtenu peut donner des estimateurs légèrement biaisés au profit d'un compromis pour une variance plus faible. Un bon modèle n'est donc plus celui qui explique le mieux les données au sens d'une déviance (SSE) minimale (ou d'un R^2 max) au prix d'un nombre important de variables pouvant introduire des colinearités.

Le bon modèle est celui qui conduit aux prédictions les plus fiables. Certes, le théorème de Gauss-Markov indique que, parmi les estimateurs sans biais, celui des moindres carrés est de variance minimum. Néanmoins, il peut être important de préférer un estimateur biaisé si le gain en variance est lui plus significatif. C'est tout le problème de trouver un bon équilibre entre biais et variance afin de minimiser un risque quadratique de prédiction. Il y a principalement deux manières de "biaiser" un modèle dans le but de restreindre la variance :

- En réduisant le nombre de variables explicatives et donc en simplifiant le modèle;
- En contraignant les paramètres du modèle, en les rétrécissant (shrinkage), en régression *ridge* qui opère une régularisation.

De nombreux critères de choix de modèle sont présentes dans la littérature :

1. Statistique du F de Fisher :

Ce critère, justifie dans le cas explicatif car basé sur une qualité d'ajustement est aussi utilisé à titre indicatif pour comparer des séquences de modèles emboîtés. La statistique partielle de Fisher est

$$\frac{(SSR - SSR_q)/s}{SSE/(n - p - 1)} = \frac{(R^2 - R_q^2) n - p - 1}{1 - R^2} \frac{1}{q} \quad (2.8)$$

dans laquelle l'indice q désigne les expressions concernant le modèle réduit avec $(p-q)$ variables explicatives. On considère alors que si l'accroissement $(R^2 - R_q^2)$ est suffisamment grand :

$$R^2 - R_R^2 > \frac{q}{n-p-1} F_{\alpha; q, (n-p-1)} \quad (2.9)$$

2. Coefficient de détermination R^2 et R^2 ajusté :

Le coefficient de détermination $R^2 = 1 - SSE/SST$, est directement lié à la déviance (SSE) est aussi un indice de qualité mais qui a la propriété d'être monotone croissant en fonction du nombre de variables. Il ne peut donc servir qu'à comparer deux modèles de même niveau c'est-à-dire avec le même nombre de variables.

En revanche, le R^2 ajusté :

$$R'^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} (1 - R^2) \right) = 1 - \left(\frac{SSE/(n-p-1)}{SST/(n-1)} \right) \quad (2.10)$$

dans lequel le rapport SSE/SST est remplacé par un rapport des estimations sans biais des quantités σ^2 et σ_y^2 introduit une pénalisation liée au nombre de paramètres à estimer.

3. MSE et RMSE :

- (1) **Mean Squared Error (MSE)** : Cet indicateur est une estimation de l'erreur quadratique moyenne de prédiction qui est calculé en prenant la moyenne des carrés des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs réelles, qui s'écrit aussi comme la somme d'une variance et du carré d'un biais.

L'erreur quadratique moyenne de prédiction s'écrit ainsi :

$$MSE(\hat{y}_i) = Var(\hat{y}_i) + [Biais(\hat{y}_i)]^2 \quad (2.11)$$

Cette métrique est souvent utilisé pour mesurer l'erreur moyenne dans un modèle de régression. Le MSE est sensible aux écarts élevés entre les prédictions et les valeurs réelles, car il calcule les carrés des écarts. Ainsi, les erreurs plus importantes ont un impact plus important sur le MSE.

- (2) **Root Mean Squared Error (RMSE)** : est simplement la racine carrée du MSE. Ce qui donne une mesure de l'erreur moyenne dans les mêmes unités que la variable cible à prédire. Cette métrique est souvent préféré car elle permet une meilleur interprétation que le MSE. Le RMSE représente l'erreur moyenne dans les mêmes unités que la variable cible, ce qui facilite sa compréhension. La racine de l'erreur quadratique moyenne s'écrit comme suit :

$$RMSE = \sqrt{MSE(\hat{y}_i)} = \sqrt{Var(\hat{y}_i) + [Biais(\hat{y}_i)]^2} \quad (2.12)$$

2.2.4 SCOPE 3 Catégories

Le "Scope 3" est une catégorie de classification des émissions de gaz à effet de serre (GES) utilisée dans le cadre du protocole GHG (Greenhouse Gas Protocol). Il fait référence aux émissions indirectes provenant des activités d'une organisation qui sont en amont ou en aval de son périmètre opérationnel direct. Ces émissions sont associées aux activités de l'organisation, mais ne sont pas directement contrôlées par elle [19].

Le scope 3 compte 15 catégories de reporting distinctes et comprend toutes les émissions indirectes qui se produisent dans la chaîne de valeur d'une entreprise. Les 15 catégories du champ d'application 3 ont pour but de fournir aux entreprises un cadre systématique pour mesurer, gérer et réduire les émissions sur l'ensemble de sa chaîne de valeur. Les catégories sont conçues pour s'exclure mutuellement afin d'éviter qu'une entreprise ne comptabilise deux fois les émissions d'une catégorie à l'autre.

1. Achats de biens et services : comprend l'extraction, la production et le transport de biens et services achetés au cours de l'année de référence, à l'exception des combustibles et de l'électricité ;
2. Biens et équipement : comprend l'extraction, la production et le transport de biens d'équipement achetés ou acquis par l'entreprise déclarante au cours de l'année ;
3. Activités liées aux combustibles et à l'énergie (non incluses dans le SCOPE 1 ou 2) : comprend l'extraction, la production et le transport de combustibles et d'énergie achetés ou acquis par l'entreprise déclarante au cours de l'année de déclaration, y compris :
 - Émissions en amont des combustibles achetés (extraction, production et transport des combustibles consommés par l'entreprise déclarante)
 - Émissions en amont de l'électricité achetée (extraction, production et transport des combustibles consommés pour produire de l'électricité, de la vapeur, du chauffage et de la chaleur).
 - Pertes de transport et de distribution (production d'électricité, de vapeur, de chauffage et de refroidissement qui est consommée (c'est-à-dire perdue) dans un système de TGD) - déclarée par l'utilisateur final.
 - Production d'électricité achetée vendue aux utilisateurs finaux (production.
4. Upstream Transportation and Distribution :
 - Transport et distribution de produits achetés par l'entreprise au cours de l'année de référence entre les fournisseurs de niveau 1 d'une entreprise et ses propres activités (dans des véhicules et des installations qui ne sont pas possédés ou contrôlés par l'entreprise déclarante).

- Services de transport et de distribution achetés par l'entreprise déclarante au cours de l'année de déclaration, y compris la logistique inbound et logistique outbound (par exemple, des produits vendus). Ainsi que le transport et la distribution entre les installations d'une entreprise (dans des véhicules et des installations qui n'appartiennent pas à l'entreprise déclarante ou ne sont pas contrôlées par elle l'entreprise);
5. Déchets produits dans les opérations : comprend l'élimination et traitement des déchets générés par les activités de l'entreprise déclarante au cours de l'année de déclaration (dans des installations qui n'appartenant pas ou n'étant pas contrôlées par l'entreprise déclarante ;
 6. Voyages d'affaires : comprend le transport des employés pour des activités liées à l'entreprise au cours de l'année de déclaration ;
 7. Déplacements des salariées domicile-travail : comprend le transport des salariés entre leur domicile et leur lieu de travail ;
 8. Actifs loués en amont : comprend l'exploitation des actifs loués par la société déclarante et non inclus dans le SCOPE 1 et 2 ;
 9. Downstream Transportation and Distribution : comprend le transport et la distribution de produits vendus par l'entreprise au cours de l'année de référence entre les activités de l'entreprise de l'entreprise déclarante et le consommateur final (s'ils ne sont pas payés par l'entreprise déclarante) ;
 10. Transformation des produits vendus : comprend la transformation de produits intermédiaires vendus au cours de l'année de référence par entreprises en aval ;
 11. Utilisation des produits vendus : utilisation finale des biens et services vendus par l'entreprise déclarante au cours de l'année de déclaration ;
 12. Traitement de fin de vie des produits vendues : élimination et traitement des déchets des produits vendus par l'entreprise déclarante (au cours de l'année de déclaration) ;
 13. Actifs loués en aval : exploitation d'actifs appartenant à l'entreprise déclarante (bailleur) et loués à d'autres entités au cours de l'année de référence ;
 14. Franchises : exploitation de franchises au cours de l'année de référence, non incluse dans le SCOPE 1 et déclarées par le franchiseur ;
 15. Investissements : fonctionnement des investissements (y compris investissements en actions et en dettes et financement de projets) au cours de l'année de référence, non inclus dans le SCOPE 1 et 2.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir le cadre général de notre étude, et cerner l'ensemble des outils, concepts, notions et méthodes qui nous aideront à la résolution de la problématique énoncée dans le chapitre précédent.

Nous avons présenté et défini dans ce chapitre les notions d'émissions, de facteurs d'émissions liés à la combustion, celles en relation avec le clustering et les méthodes d'échantillonnage, ainsi que les modèles de prédiction, qui vont nous permettre d'estimer la consommation de carburant dans le chapitre qui suit. Nous avons également abordé les différentes analyses et concepts sur l'étude des réseaux routiers, et les spécificités du réseau algérien, pour développer une approche qui permet l'estimation des vitesses, en caractérisant chaque type de parcours et de trajet. Et enfin nous avons parlé des différentes catégories d'émissions SCOPE 3, afin de situer ce travail par rapport au GHG Protocol qui fournit un cadre méthodologique pris en compte dans cette étude pour mesurer, quantifier et rapporter les émissions de GES.

Chapitre 3

Solutions et Contribution

Introduction

Le shift project s’est intéressé aux leviers qui peuvent réduire les émissions de gaz liées au fret et propose une amélioration de l’efficacité des véhicules utilitaires légers par la formation à l’écoconduite des chauffeurs. Il propose également l’électrification rapide du parc, par l’incitation des transporteurs à s’équiper via le certificat d’effort de décarbonation et par la continuation du déploiement du réseau de recharge électrique sur l’espace public.

L’écoconduite comme le montre le graphe 3.1, représente une des mesures les plus pertinentes à enclencher rapidement, selon le shift project ” Les mesures à effet rapide sont la formation à l’écoconduite pour les chauffeurs et la mise en place des incitations à l’électrification des flottes de, la construction des infrastructures d’intermodalité rail-route et les incitations fortes au report modal, ainsi que la bonne transformation des autres secteurs du PTEF ¹”.

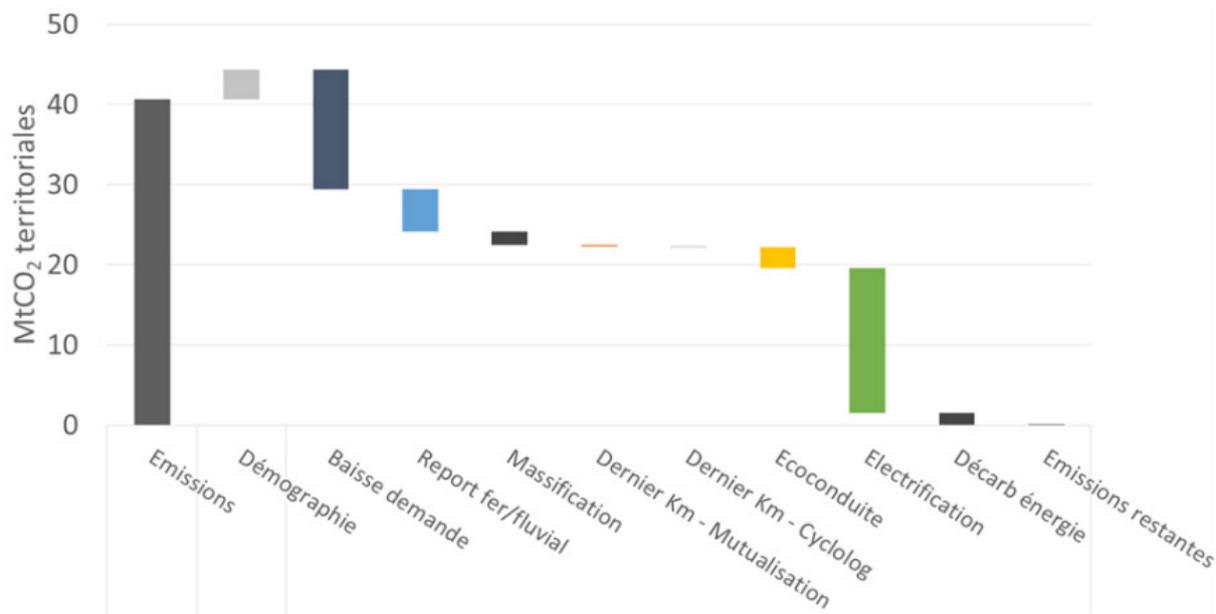


FIG. 3.1 : Contribution de chaque levier à la décarbonation du fret (The Shift Project)

Les études précédentes justifient notre choix de solution et indique que nous sommes sur la bonne voie en terme d’adoption de mesure qui font sens avec les objectifs net zéro de Lafarge Algérie. Pour mettre en lumière des résultats concrets il est nécessaire de passer par 2 étapes clés :

1. Le calcul des émissions WTW (puits jusqu’à la roue)
2. Le calcul des émissions évitées suite à l’adoption de l’écoconduite.

Nous l’avons vu dans l’état de l’art, la consommation de carburant est tributaire de plusieurs facteurs qui peuvent influencer sa valeur : charge utile, coefficient de frottement,

¹Plan de Transformation de l’économie française élaboré par The Shift Project

vitesse, l'aérodynamique du véhicule, rendement du moteur, rendement énergétique du carburant. Chaque facteur dépend à son tour de plusieurs autres paramètres.

Dans le cadre de notre étude nous nous sommes intéressés à l'indice de congestion routière, la vitesse moyenne de circulation qui lui est associée, le profil de la route, la vitesse moyenne qui lui est associée. La première partie de ce chapitre sera consacré à la mise en lumière des paramètres pouvant influencer la consommation de carburant, on s'intéressera aux facteurs de surconsommation de carburant. La seconde partie sera consacré à la méthode d'échantillonnage utilisé pour l'estimation de la consommation de carburant dépendant de facteurs cités plus haut. Pour cela nous avons d'abord estimé les paramètres qui vont alimenter notre modèle de machine learning. Nous avons en effet des données hétérogènes, c'est la raison pour laquelle nous avons opté pour un échantillonnage stratifié, afin d'identifier des groupes homogènes sur lesquels un échantillonnage aléatoire sera effectué.

Nous avons utilisé l'algorithme K-means pour identifier les clusters, qui représentent des trajets types, nous en avons identifié 4, les résultats de l'échantillonnage sur chaque cluster seront par la suite extrapolés aux reste de la population en utilisant un modèle d'apprentissage supervisé afin d'estimer la consommation de carburant pour l'ensemble des rotations sur l'année 2022.

Les résultats de cette estimation seront consolidés pour mesurer les émissions en *kgquivalentCO₂/Litre* de carburant.

3.1 Conception d'un système de transport éco énergétique

Dans le domaine du transport, la consommation énergétique devient une problématique majeure, pour pallier ça, des systèmes d'aide à la conduite de plus en plus complexes émergent et requièrent de plus en plus de connaissances et d'attention de la part des opérateurs humains. En effet, la demande en énergie dans le monde ne cesse de croître, l'augmentation des tarifs de l'énergie devient un frein dans le développement économique de l'industrie. Le coût énergétique pour l'industrie du transport est très important. En 2010, la compagnie « Easyjet » déclare avoir dépensé 865 millions d'euro en carburant ce qui représentait 40% de ses coûts (Duclos, 2011). Une réduction de 1 à 2% d'énergie permettrait de réduire le coût énergétique de 16 millions d'euros en 2010 pour la compagnie.

La réalisation de véhicules innovants permet de réduire la consommation d'énergie des véhicules. Les masses des véhicules sont réduites, la technologie hybride est implémentée dans tous les domaines du transport. Mais cela n'est pas suffisant pour réduire la consommation. Des formations à l'éco-conduite peuvent aider les conducteurs à optimiser la consommation d'énergie. Ces dernières changent le style de conduite de l'opérateur dans les différents domaines du transport dont la diversité des ressources énergétiques des véhicules est variée (électrique, fossile, etc.).

Néanmoins la formation n'a qu'un effet temporaire sur l'opérateur humain malgré une réduction d'énergie consommée pouvant aller jusqu'à 20% dans le domaine de l'automobile (Luu, 2011). La cause principale de ce constat est l'incapacité ou la difficulté du conducteur à déterminer la stratégie de conduite qui lui permettra de réduire la consommation d'énergie pendant la tâche de conduite (Luu, 2011).

Systèmes technologiques réalisés pour réduire la consommation d'énergie Pour réduire la consommation d'énergie des véhicules (à énergie électrique, fossile, etc.), l'industrie du transport a amélioré l'aérodynamisme des véhicules, réduit leur masse et ajouté de nouvelles spécificités. Plusieurs systèmes technologiques, dont l'objectif est l'amélioration de la performance énergétique existent, nous présenterons une liste non exhaustive :

1. **Les micro technologies** : la consommation d'un véhicule est fortement et directement liée à la traînée. La réduction de la traînée permet de réduire les forces de frottement, provoquées par l'aérodynamisme du véhicule, et a pour conséquence l'amélioration des performances des véhicules (qu'ils soient de type ferroviaire, automobile, naval, aérien, etc.). La recherche sur la thématique des surfaces de riblets (surface munie de micro nervures) est un sujet très étudié depuis les années 1980 jusqu'à aujourd'hui (Bao-wei, Xiaojuan, et Guang, 2009; Chu et Karniadakis, 1993; Stenzel, Wilke, et Hage, 2011; Walsh Lindemann, 1984).
2. **L'hybridation des véhicules** : afin de réduire la consommation des énergies fossiles, la conception de véhicules hybrides (fossile + électrique) augmente. Nous constatons que, dans le domaine de l'automobile, le marché du véhicule hybride a augmenté de 16% en 2014 par rapport à 2013. L'inconvénient est l'augmentation

de la masse du véhicule mais malgré cette dernière, l'hybridation du véhicule permet de réduire la consommation d'énergie. L'hybridation repose sur l'optimisation de l'utilisation de deux motorisations du véhicule afin de réduire la consommation d'énergie. La multi-modalité du transport repose sur l'optimisation de l'utilisation du moyen de transport pour permettre la réalisation d'un trajet en consommant le moins d'énergie possible [20].

3. **La réduction des masses** : pour réduire les effets résistifs et la surconsommation engendrée, les industriels tentent de diminuer la masse du véhicule, en diminuant celle de la batterie ou du moteur. La masse est présentée comme un paramètre influençant la consommation d'énergie. La diminution de celle-ci à l'aide de procédés techniques semble être une solution pour réduire la consommation. Néanmoins pour des véhicules à capacité importante (Fret, Avion, etc.) la masse varie en fonction du nombre de passagers mais également de la masse des marchandises transportées. C'est pourquoi cette solution n'est pas la plus adéquate pour réduire la consommation énergétique sur le long terme.
4. **Système à récupération d'énergie** : les véhicules électriques et véhicules hybrides incluant pour seconde motorisation un moteur électrique utilisent les systèmes à récupération d'énergie [20]. L'utilisation de ces systèmes à récupération d'énergie s'explique par le fait que :
 - l'énergie de propulsion représente 80 à 85% de la consommation énergétique ;
 - l'énergie cinétique représente 40 à 50% de l'énergie de propulsion ;
 - l'énergie récupérable est estimée entre 30 à 50% de l'énergie cinétique.

Ce qui donne une opportunité nette de récupération d'énergie de 10 à 20% sur la consommation totale (NEYRET, 2013).

3.2 Consommation et facteurs d'émissions

3.2.1 Facteurs de surconsommation de carburant

La consommation du carburant dépend de plusieurs facteurs qui peuvent relever de trois catégories en lien avec : le véhicule, les conditions opérationnelles d'exploitation et le conducteur.

Les paramètres relatifs au véhicule proprement dit sont l'aérodynamique du véhicule, le moteur, le système de transmission, les systèmes électroniques, les pneumatiques (résistance au roulement), les systèmes supplémentaires (climatisation, GPS...). Les études de l'ADEME et de l'ENERGECO identifient ces facteurs comme des sources potentielles de surconsommation de carburant du véhicule. Le fait de ne pas entretenir le moteur expose le propriétaire aux risques d'affronter des pannes coûteuses ... et d'entraîner une importante surconsommation de carburant (pouvant aller jusqu'à 25%, soit environ 8l/100 km

supplémentaires). Un sous-gonflage des pneus entraîne une augmentation de la résistance au roulement et donc une surconsommation de carburant. Les données de Michelin font état d'une surconsommation d'environ 1,2% pour un sous-gonflage de 0,3 bar. Ou encore, le fait d'augmenter la résistance aérodynamique du véhicule même à vide, peut augmenter la consommation de 10%. Ce chiffre peut atteindre les 15%. Un dernier exemple et non le moindre, concerne l'utilisation d'équipements supplémentaires, qui semble extrêmement coûteuse en carburant. L'intégration des systèmes complexes pour améliorer la sécurité et le confort induit donc une consommation supplémentaire. Quand elle fonctionne, la climatisation augmente la consommation de carburant de 6% sur autoroute pour un écart de température inter-externe de 5 ° et atteint jusqu'à 20% en ville. L'impact énergétique de la climatisation limite l'effet des progrès importants réalisés par les constructeurs pour réduire la consommation des véhicules.

La deuxième catégorie concerne l'ensemble des facteurs liés aux conditions d'exploitation opérationnelle du véhicule. Ils comprennent le type de trajet (urbain, inter-urbain dont une des caractéristiques est la fréquence des arrêts), le type de route (montagne, planéité, sinuosité,...), les conditions du trafic, la géométrie de la route (la pente, la rugosité,...). Même si peu d'études quantifient la différence de consommation entre différents types de trajets, on se doute bien que la consommation n'est pas la même sur une route plane et sur une route avec relief, de même entre une route droite et une route avec des virages fréquents. Une augmentation de 15 à 20% de la consommation de carburant en hiver par rapport à l'été est notée en Europe. Finalement, la consommation dans un embouteillage s'avère très élevée par rapport à la consommation en trafic fluide.

La troisième catégorie concerne donc le conducteur. La conduite peut engendrer des sur-consommations non négligeables. Dans [NRC95], on constate que la conduite agressive (accélération et décélération brutales) en situation de congestion est estimée engendrer une augmentation de 10% de la consommation. De même, avec la vitesse et la transmission, la variation entre conducteurs peut atteindre 20% due à la différence de l'utilisation des boîtes de vitesse [Din00]. Les véhicules d'aujourd'hui connaissent beaucoup de changement par rapport aux générations précédentes, et par conséquent, le conducteur doit lui aussi adapter sa conduite à la performance offerte par son véhicule. Cela fait partie de la tendance d'une conduite écologique qui d'après plusieurs études [CEHW79, BBD+09, BB09, CIE07, JFE99, RSM+06, OEE98] permet d'obtenir un gain de consommation de 15 à 20% en augmentant en même temps le confort et en diminuant aussi les risques d'accidents.

L'ensemble des éléments donnés (certainement non exhaustifs) permet d'avoir une première idée des sources potentielles de réduction de la consommation et des émissions dans le transport.

3.2.2 Déterminants de la consommation

La puissance moteur totale requise pour se mouvoir dépend de la puissance requise pour contrer les forces d'opposition au mouvement et avancer à la vitesse désirée, de celle requise pour le fonctionnement des accessoires, de la puissance nécessaire pour contrer la

friction interne dans le moteur, et de l'efficacité de la transmission. Rappelons également que l'énergie consommée par le véhicule est égale au produit de la puissance moteur totale requise et du temps de fonctionnement du véhicule, mais que le rendement moyen aux roues n'est que de 14 à 26% de l'énergie consommée du fait des pertes diverses (transmission, mise en chauffe, alimentation, arrêts et fonctionnement à puissance non maximale (US Department of Energy 2013)). Nous détaillons par la suite les principaux facteurs de consommation énergétique.

3.2.3 Facteurs de résistance au mouvement

La consommation énergétique d'un véhicule est directement liée aux forces de résistance au mouvement qui lui sont appliquées, puisque ces forces doivent être contrées pour que le véhicule puisse se mouvoir. Pour comprendre cette résistance au mouvement nous devons nous intéresser à la force de traînée d'un véhicule. On note la force de traînée \vec{F}_x dirigé selon l'axe x comme représenté sur la figure, c'est-à-dire le long de l'axe longitudinal du véhicule et dans la direction opposée à celle de l'avancement. On définit les autres directions \vec{y} et \vec{z} selon le repère direct lié au véhicule $R_m = (\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

On définit classiquement un coefficient de force de traînée, C_x sans dimension qui lie l'amplitude de F_x à la vitesse de l'objet par rapport au fluide environnant selon :

$$C_x = \frac{F_x}{1/2 S_x \rho V_\infty^2} \quad (3.1)$$

Comme nous pouvons le voir dans l'équation le coefficient de force de trainée est proportionnel à la force de résistance au mouvement, plus celle ci sera grande, plus le C_x sera grand, et plus celui ci sera grand, plus la consommation de carburant d'un véhicule sera importante [21].

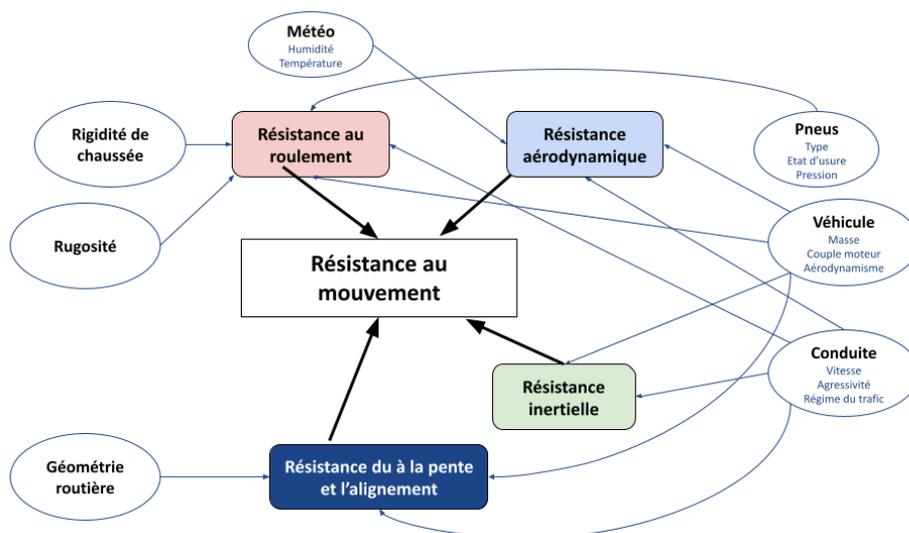


FIG. 3.2 : Schéma récapitulatif des facteurs de résistance au mouvement

Dans la figure qui suit nous représentons les éléments de résistance au mouvement, autrement dit les facteurs qui peuvent augmenter l'intensité de cette force de part la multiplicité des paramètres.

3.2.4 Facteurs d'émissions véhicule Poids Lourd

Dans cette section, nous allons donner suite à ce qui a été développé dans le dernier point et expliciter le lien entre les éléments de la figure 3.2 et la résistance au mouvement qui explique le lien de causalité entre facteurs d'émissions et consommation de carburant.

Caractéristiques du véhicule

Dans la catégorie des caractéristiques du véhicule, on y retrouve 10 facteurs différents qui sont énumérés et décrits dans cette section.

1. **Catégorie de véhicule :** les émissions sont différentes d'un type de véhicule à un autre. Par exemple, il y a des autobus, des automobiles, des camions légers, des motocyclettes, et tout autre véhicule hors route, tel que les récréatifs (motoneige, quatre roues, etc.) et la machinerie (tracteurs, tondeuses, souffleuses, balayeuses de rues, etc.). De plus, un camion lourd peut contenir différentes caractéristiques, telles que le nombre d'essieux, le nombre de remorques, la longueur de la remorque, etc. Ce facteur est alors contrôlable lors de l'achat d'un véhicule. Souvent, les besoins de l'entreprise vont fortement guider par le choix de ses caractéristiques. Toutefois, en étant au courant des effets que ces caractéristiques ont au niveau économique et environnemental, la décision peut être prise en considérant autre chose que les besoins de l'entreprise en rapport à sa flotte de transport [22].
2. **Poids du véhicule :** le poids du véhicule joue un rôle très important en ce qui a trait aux émissions. Aux États-Unis, entre les années 1975 et 1985, le poids d'un véhicule moyen a diminué, puis a augmenté considérablement jusqu'en 2005. Au cours des dernières années, la tendance est demeurée plus stable. Le resserrement progressif de la législation fédérale en matière de consommation de carburant a fait une différence. Il est de plus en plus courant de voir des fabricants de véhicules promouvoir leurs initiatives de réduction du poids. Les fabricants réduisent le poids des véhicules en recourant à des matériaux plus légers, comme l'aluminium et des composites de pointe, tout en apportant des modifications à la conception. Ces améliorations permettent de réduire davantage le poids des véhicules puisque la taille d'autres composants peut être réduite, permettant en fin de compte de fabriquer de plus petits moteurs sans nuire au rendement, alors plus le poids est réduit, moins de puissance est requise. En 2007, une étude du Massachusetts Institute of Technology (MIT) a estimé que, d'ici 2035, une réduction de 35% de la consommation de carburant serait observée, accréditée à la diminution de 20% des poids des véhicules à leur fabrication. Ces estimations tiennent compte du poids supplémentaire attribuable aux futures composantes exigées en matière de sécurité et aux caractéristiques de

confort. Une réduction de poids de cette ampleur pourrait réduire la consommation de carburant du véhicule sans nuire aux caractéristiques actuelles de sécurité et de rendement du véhicule.

3. **Type de carburant** : les émissions d'échappement de CO_2 varient selon le type de carburant en raison de leur densité. Les carburants d'hydrocarbures plus denses, comme le diesel, renferment plus de carbone et, par conséquent, produiront davantage de CO_2 pour un volume donné de carburant. À l'inverse, l'éthanol engendre seulement 1,61 kg de CO_2 par litre, tandis que la moyenne se trouve autour de 2,34 kg. D'autres carburants existent comme l'essence, le gaz naturel, le GPL, etc. Toutefois, les 2 principaux carburants utilisés dans les véhicules lourds sont l'essence et le diesel [22]. Ils ont des caractéristiques totalement différentes. Les émissions d'échappement de CO_2 de divers carburants de transport sont fournies dans le tableau ci-dessous :

Type de carburant	Émissions d'échappement de CO_2 (kg/L)
Essence	2.29
E10 (10% éthanol + 90% essence)	2.21
E85 (85% éthanol + 15% essence)	1.61
Gazole	2.66
B5 (5% biodiesel + 95% diesel)	2.65
B20 (20% Biodiesel + 80% diesel)	2.62

TAB. 3.1 : Émissions d'échappement de CO_2 de divers carburants de transport

4. **Âge du véhicule** : l'âge du véhicule peut se calculer en kilométrage ou en année. Dans tous les cas, plus le véhicule est vieux, plus il est polluant, et ce, dû à la dégradation de son système de contrôle d'émissions. Grâce à l'avancement technologique des dernières décennies, les véhicules sont beaucoup plus économiques et polluent moins. En effet, Paré-Le Gal (2009) a démontré que les véhicules de 1995 et moins représentaient seulement 20% du parc automobile du Québec, tout en étant responsables de 80% de la pollution automobile [12]. Et c'est d'autant plus applicable aux camions lourds puisqu'ils occupent beaucoup de place sur le réseau routier dans le monde, en particulier québécois et canadien. En outre, de petites variations dans les procédés de fabrication des véhicules peuvent causer des différences dans la consommation de carburant entre deux véhicules de même marque et de même modèle, et certains véhicules n'atteignent pas la consommation optimale de carburant avant d'avoir roulé de 6 000 à 10 000 km [3]. Toutefois, on ne peut dire que le fait d'opérer un vieux véhicule soit un important facteur d'émissions.
5. **Cylindrée du moteur** : la cylindrée est le volume total de tous les cylindres et est exprimée en litres. Que ce soit à essence ou diesel, la cylindrée d'un moteur diffère d'un camion à l'autre. La cylindrée est mesurée par litres et est considérée

comme la grosseur du moteur. D'un côté, plus la cylindrée sera petite, moins il y a d'émissions, mais de l'autre côté, plus la cylindrée est petite, moins le véhicule a de puissance. Alors, dans le cas de véhicules lourds, une force minimum est essentielle. D'ailleurs, de nouvelles technologies existent afin d'adapter la cylindrée d'un camion, tout dépendamment celle dont le véhicule nécessite au moment de l'utilisation. Par exemple, un camion vide a besoin de beaucoup moins de force que lorsqu'il est plein, donc l'outil technologique permettra de réduire la puissance du moteur pour le besoin actuel et s'ajuster lorsqu'il sera plein, etc. Alors, la cylindrée du moteur affecte énormément les émissions de GES.

6. **Type de transmission** : la transmission représente le moyen de couplage entre le moteur et les roues d'un véhicule. Elle occasionne des pertes d'énergie qui varient d'une catégorie de véhicule à l'autre. Le type de transmission influence la consommation de carburant, donc par le fait même, les émissions. Il existe divers types de transmissions fréquemment retrouvées dans les véhicules lourds, tels que la manuelle, le double débrayage, automatique et l'automatiser.

Les deux derniers types sont ceux qui peuvent améliorer l'efficacité énergétique d'un véhicule lourd. Elles éliminent le changement de vitesse manuel alors la différence majeure réside dans l'utilisation ou non d'un embrayage. Les principaux avantages d'une transmission automatique sont le changement de rapport à pleine puissance qui procure une meilleure accélération, des vitesses moyennes plus élevées (important pour des cycles courts avec beaucoup d'arrêts et de départs) et une économie accrue de carburant. Le meilleur moyen de réduire la consommation de carburant est de s'assurer que le moteur travaille dans la gamme optimale de tours par minute pour l'efficacité énergétique. Une transmission automatique permet alors de réduire au minimum le temps passé hors de cette gamme. Pour les véhicules lourds, le choix de la transmission se fait en même temps que celui de la spécification du moteur. Ces deux choix sont liés puisqu'on cherche à optimiser la zone de fonctionnement du moteur pour un cycle de travail représentatif. Néanmoins, si on compare une transmission automatique et une transmission manuelle, elles n'ont pas une énorme différence en termes d'émissions. D'ailleurs, ce facteur n'est pris en compte dans aucune méthode de calcul. Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de GES.

7. **Configuration des pneus** : des pneus de faible résistance au roulement peuvent aider à moins consommer. Les pneus, surtout à cause de ce dernier aspect, représentent entre 20 et 30% de la consommation de carburant des véhicules. D'ailleurs, le bon gonflage des pneus joue un rôle important dans les émissions de CO_2 . D'après des tests réalisés par Stephen Boucher, en choisissant bien ses pneus, il est possible de réduire de 10% la consommation en carburant du véhicule. Des pneus verts permettent des gains considérables, en contrepartie, la tenue de route est en retrait par rapport aux pneus classiques, il faut en être conscient. La distance de freinage est plus grande avec des pneus verts.
8. **Viscosité de l'huile** : la viscosité de l'huile motrice est une mesure de résistance à l'écoulement d'un fluide. Elle s'exprime par deux grades ; un grade à froid et un grade

à chaud. La viscosité d'une huile est la mesure de l'épaisseur ou de sa résistance à l'écoulement en fonction de la température. La viscosité est définie par 2 grades : un grade à froid et un grade à chaud. Le premier grade indique la fluidité de l'huile à froid, c'est la capacité à démarrer le moteur et à amorcer la pompe à huile. Plus il est faible, plus l'huile est fluide. Le second indique la performance du lubrifiant à haute température. Plus il est élevé, plus épais sera le film d'huile à chaud alors plus l'huile supporte de hautes températures ce qui favorise la protection et l'étanchéité. Toutefois, plus le nombre est bas, meilleure est la réduction de frottement à chaud, il favorise donc les économies de carburant.

En bref, le choix de l'huile n'a que de petites répercussions sur les émissions des GES. Le choix de la viscosité est en fonction des caractéristiques du véhicule et des habitudes du conducteur. Le choix dépend de la longueur des trajets que le camion a l'habitude de parcourir, si la circulation sera majoritairement urbaine ou plutôt autoroute,...etc.

9. **Aérodynamisme** : une caractéristique de plus en plus étudiée dans le transport routier est l'aérodynamique. De grandes économies de carburant sont possibles grâce à divers dispositifs à installer sur les véhicules ainsi que plusieurs ajustements faisables sur les camions et les remorques. Le Conseil national de recherches du Canada a effectué une étude en testant 20 changements qui affectent l'aérodynamique de camions lourds sur de longues distances. En combinant tous les éléments, ils sont arrivés avec une économie de 25% de litres de carburant. Ce n'est donc pas un facteur à négliger d'autant plus que celui-ci est 100% contrôlable par les gestionnaires de flottes de transport. Les quatre principales zones ciblées afin de minimiser la traînée sont, l'avant du tracteur, l'espace entre le tracteur et la remorque, les côtés et le dessous de la remorque et finalement l'arrière de la remorque.

De plus, avoir les fenêtres ouvertes est aussi un exemple de diminution de l'aérodynamique du véhicule, spécialement à haute vitesse. Et maintenant, voici des exemples d'équipement duquel un tracteur routier est doté : déflecteur et carénage de toit de cabine, extensions latérales de cabine, carénages qui recouvrent les réservoirs et le châssis du tracteur, rétroviseurs aérodynamiques, pare-chocs aérodynamique, pare-soleil aérodynamique. Le facteur de l'aérodynamique est primordial dans le calcul des émissions de GES. Il devra donc être pris en considération comme une variable explicative du modèle de prédiction des données de consommation de carburant et sera matérialisé à travers le type de véhicule.

Un aérodynamisme efficace est crucial pour améliorer la consommation de carburant et réduire la pollution. Si vous réduisez le facteur de traînée, vous améliorez l'efficacité, et réduisant la résistance au roulement. Les dispositifs de réduction de la traînée aérodynamique rendent le passage de l'air au-dessus du camion plus fluide et évitent de brasser ou d'énerver l'air inutilement, réduisant ainsi la consommation de carburant du véhicule.

Si la traînée aérodynamique est minimale à faible vitesse, elle prend des proportions colossales à grande vitesse. La puissance nécessaire pour la surmonter est propor-

tionnelle au cube de la vitesse, soit V^3 . Par exemple, si l'on double la vitesse, il faut huit fois plus de puissance pour vaincre la traînée aérodynamique, ce qui se traduit par une augmentation de la consommation de carburant à des vitesses plus élevées [21].

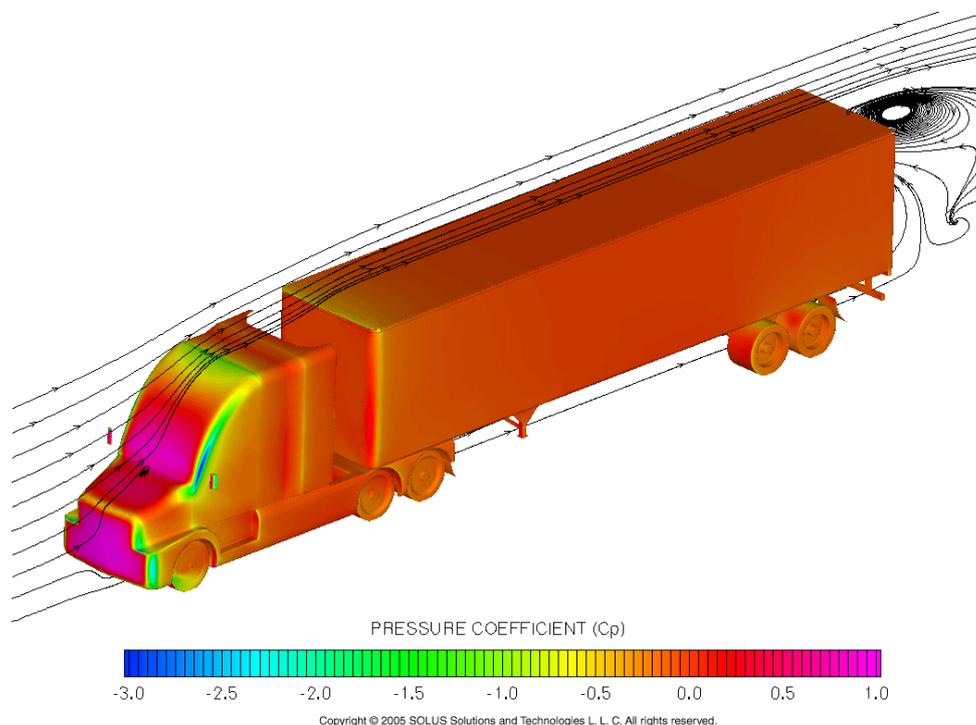


FIG. 3.3 : Camion de type Maraîcher en mouvement sous infrarouge

En réduisant le coefficient de traînée, l'aérodynamisme des camions permet de réduire la pression de l'air sur la carrosserie ou l'avant de la remorque en présentant à l'air entrant un véhicule de forme plus lisse. L'air qui s'écoule au-dessus et autour de la cabine est doucement dévié autour et au-dessus de la carrosserie ou de la remorque. L'aérodynamisme approprié de la carrosserie lisse le flux d'air autour des bords d'attaque de la carrosserie, ce qui aide l'air à rester attaché aux côtés de la carrosserie par la suite, et réduit ainsi la traînée de l'air. L'écoulement plus facile de l'air réduit également la pression sur l'avant du corps. Pour illustration, comme on peut le faire dans la figure 3.3 les déflecteurs de pavillon, fixe et latéraux permettent de bifurquer l'air ce qui réduit la surface de contact et de frottement avec l'air.

10. **Fréquence de l'entretien** : un entretien régulier et efficace est bénéfique pour tous les véhicules. Dans une étude de l'entretien des véhicules, il est constaté que plus de 60% des véhicules avaient une moyenne de 5% d'amélioration de l'économie de carburant après l'entretien. Cela était particulièrement évident sur les véhicules plus anciens qui n'ont pas de système de gestion de moteur en boucle fermée [17]. L'entretien du véhicule peut améliorer l'efficacité du carburant en diminuant la résistance de frottement particulière et donc en augmentant l'efficacité thermodynamique. L'effet de l'efficacité thermodynamique est habituellement déterminé dans

le calcul de la demande de puissance qui a été discuté dans la section précédente [6]. Néanmoins, la qualité ou la fréquence de l'entretien ne constitue pas un paramètre dans quelque méthode de calcul des émissions.

Caractéristiques des conditions opérationnelles

La catégorie des caractéristiques du trajet est très importante et 7 facteurs y sont expliqués. Ces derniers sont généralement gérés par les humains, donc ce sont des facteurs assez contrôlables jusqu'à un certain point.

1. **Poids du chargement** : comme il est discuté précédemment dans le facteur du poids du véhicule, le poids du chargement est un facteur majeur concernant les émissions de GES et est en lien direct avec la consommation de carburant.
2. **Distance à parcourir** : dans un même environnement, plus la distance à parcourir sera petite, moins il y aura d'émissions de CO₂. Pour diminuer les distances, plusieurs problèmes de tournées de véhicules (VRP) existent.
3. **Type de chaussée** : différents types de chaussée existent et leurs comportements changent d'une sorte à l'autre en augmentant ou diminuant la force de friction. Ce qui diffère Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre entre les chaussées est leurs compositions. Il est souvent impossible de remarquer à l'œil nu quel type de chaussée il est question, car les principales caractéristiques de chacune se cachent sous la couche de surface. Il existe trois types de chaussées, les chaussées souples (traditionnelles et à bitumineuses épaisses), les chaussées semi-rigides (à assise traitée aux liants hydrauliques, à structure mixte et à structure inverse) et les chaussées rigides béton (classique et à dalle épaisse). Évidemment, plus une chaussée est rigide, moins le véhicule doit forcer et moins d'émissions sont dégagées. Pour l'utilisation de ce facteur dans les méthodes de calcul d'émissions de GES, trois sortes de chaussées sont considérées, l'asphalte, le béton et le composite. Ainsi chaussée en mauvais état qui augmente la résistance au roulement augmente de jusqu'à 20% de consommation [22].
4. **État de la chaussée** : l'état de la chaussée est particulièrement considérable dans un pays où l'hiver est présent et surtout dans une province où il est assez féroce. Les changements de températures, la quantité d'investissements gouvernementaux, l'utilisation du transport routier comme principal mode de transport des entreprises sont tous des aspects qui nuisent à l'état des routes. En effet, moins une route est lisse, plus les émissions de GES augmentent. Il est toutefois très difficile, pour ne pas dire impossible, de bien estimer ce facteur, mais une chose est sûre, il a une très grande incidence sur les émissions de CO₂. Pour les besoins des méthodes de calcul des émissions de GES, deux types d'états de chaussée sont considérés seulement soit pendant deux saisons, l'été et l'hiver [18]. C'est une vague estimation, mais les données réelles seraient impossibles à récolter en temps réel. Toutefois, ce sont des caractéristiques assez précises pour que l'on remarque que l'effet sur les émissions de GES est important.

5. **Relief de la route** : le relief de la route, mesuré en degré, joue un rôle dans la consommation d'essence d'un véhicule lourd. Si le camion doit monter une pente abrupte, il faut des facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre devra consommer beaucoup plus de carburant que s'il était dans une pente descendante. Toutefois, le moyen pour consommer le moins de carburant possible est la constance, c'est-à-dire de rouler sur une route avec un relief de zéro, soit à plat. Il est facile de déterminer le gradient d'un segment de route. Cependant, ce qui rend complexe la considération de ce facteur dans les méthodes de calcul de GES, c'est qu'il n'existe aucune base de données ayant tous les degrés de toutes les rues afin de les corrélés à une tournée de véhicules. Par contre, ce facteur influence d'autres facteurs plus faciles à quantifier comme la consommation de carburant par unité de distance. Donc, il est possible de prendre en compte ce facteur par l'entremise d'autres variables.

6. **Degré d'utilisation des appareils auxiliaires électroniques** : quoique son effet soit moins important que plusieurs autres facteurs, le degré d'utilisation des appareils auxiliaires électroniques peut augmenter les émissions de GES. Ce sera surtout lors de longs trajets, lorsque les chauffeurs sont dans une halte de longue durée, l'utilisation des ports auxiliaires demandera plus d'énergie. Pour contrer ces émissions, il existe des systèmes électriques auxiliaires qui fournissent l'électricité à l'équipement et aux accessoires à partir de batteries qui est plus écologique.

7. **Trafic** : dans cette catégorie, 2 caractéristiques importantes sont décrites, la vitesse moyenne et la congestion routière. La vitesse, étant constamment en variation selon des situations totalement incontrôlables, a une nature très dynamique et c'est pour cette raison qu'elle est très difficile à mesurer avec exactitude. Différentes méthodes de calcul d'émissions de GES vont prendre comme mesure la vitesse moyenne. Tandis que d'autres vont prendre le type de congestion routière ou le type d'environnement (rural, urbain, etc...). Ce qui est important à noter sont les sérieux effets qu'ont la vitesse, l'accélération et la décélération sur les émissions de GES.
 - (1) **Vitesse moyenne** : Il existe maintenant des dispositifs sur les véhicules qui calculent toutes sortes de données, tels que la vitesse moyenne entre deux points. Certaines méthodes de calcul utilisent cette donnée. Elle tiendra compte de la moyenne entre toutes les accélérations et les décélérations pendant une période. Cette donnée est ensuite utilisée pour calculer la consommation moyenne de carburant dans un trajet, normalement exprimée en consommation de litres / 100 kilomètres. Cette dernière ne démontre pas beaucoup de précision puisque les effets des accélérations en soi ne sont pas clairement démontrés. Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre.
 - (2) **Congestion routière** : il existe quatre types de congestion routière, en ordre décroissant de congestion : la congestion « stop and go », la congestion saturée, la congestion chargée et la congestion fluide. Certaines méthodes estiment des facteurs pour chaque type de congestion et l'appliquent à leurs modèles.

Caractéristiques du conducteur

Le comportement du conducteur va aussi affecter de beaucoup les émissions. Comme mentionné précédemment, la constance dans la vitesse est la façon de consommer le moins possible. Toutefois, ce facteur dépend beaucoup du type de conduite du chauffeur. Le mode de conduite a une incidence directe sur les émissions de GES. Les accélérations rapides, les freinages fréquents, les faibles vitesses de longue durée peuvent augmenter la consommation de carburant jusqu'à 25%. Ce facteur est très lié au facteur du type de transmission. Comme il a été mentionné, l'optimalité peut être atteinte avec la transmission automatique pour ne pas laisser place à de variations non nécessaires de la part du conducteur. Lorsque l'on compare la consommation de carburant d'un automobiliste calme et d'un automobiliste agressif, on remarque jusqu'à 40% de différence dans la consommation de carburant [11]. Ce facteur est plus ou moins contrôlable, c'est-à-dire que le gestionnaire de flotte de transport peut sensibiliser les chauffeurs en leur offrant de la formation par exemple. Toutefois, il ne sera jamais en mesure de contrôler totalement le mode de conduite des conducteurs. Le type de conducteur n'est malheureusement pris en compte dans aucune des méthodes de calcul existantes dû à sa dynamique difficilement contrôlable. Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre.

1. **Le temps passé à l'arrêt** : sur un trajet est un indicateur fortement lié à la consommation. En effet, le temps passé à l'arrêt est comptabilisé dans le calcul de la consommation d'essence mais correspond à une distance parcourue nulle. Ainsi lorsque l'on convertit la consommation en litres au 100km, les périodes passées à l'arrêt augmentent considérablement l'estimation de la consommation de carburant.

Le calcul du temps passé à l'arrêt pour chaque trajet nous permettra de comprendre des consommations élevées de certains trajets qui ne sont pas forcément liés au style de conduite proprement dit. Cet indicateur est ainsi très corrélé au nombre d'arrêts aux feux au cours du trajet.

2. **Temps passé en frein moteur** : le temps passé en frein moteur est défini comme le temps passé avec une vitesse non nulle mais pas de pression sur la pédale d'accélérateur. Le véhicule est alors en prise, c'est-à-dire que l'alimentation en carburant du moteur est coupée et que ce sont les roues qui entraînent le moteur. Cette technique est évidemment très représentative d'une conduite économique.
3. **Temps passé avec une vitesse non optimale** : le temps passé avec une vitesse non optimale est défini comme le temps passé avec un régime moteur supérieur à 3000 tr/min et une pression exercée sur la pédale d'accélérateur (autrement dit, le régime moteur est élevé et on n'est pas en frein moteur). Une partie de la puissance du moteur est perdue par friction interne et ces pertes augmentent avec le régime moteur. Ainsi le temps passé avec une vitesse non optimale contribue à une augmentation de la consommation de carburant car le régime moteur est trop élevé.

3.3 L'Eco-conduite comme levier de réduction des émissions de GES

La définition et principe de la conduite éco-énergétique “ Selon Sivak et Schoettle (Sivak et Schoettle, 2012) l’opérateur humain est le principal acteur de la consommation de son véhicule car il va faire différents choix qui vont englober la consommation énergétique du véhicule sur le long et moyen termes. Les choix stratégiques, tactiques et opérationnels permettent à eux trois, si l’opérateur fait les bons choix, de réduire la consommation de 45% au total. L’éco-conduite, l’éco-pilotage et l’éco-navigation sont un style de conduite de véhicule (terrestre, aérien et naval) dont l’objectif est de réaliser un parcours en ayant la consommation d’énergie la plus basse possible.”

La conduite éco-énergétique est le résultat de recherches scientifiques qui remettent en cause le style de conduite de l’opérateur humain. Plusieurs études démontrent qu’en modifiant leur style de conduite, certains conducteurs peuvent réduire la consommation de 15 à 20% (Azzi, 2012; M.-F. Chang, Evans, Herman, et Wasielewski, 1976; Luu, 2011; Saint Pierre et Andrieu, 2010; Yamabe et al., 2011). Ce style de conduite est inculqué aux conducteurs au cours de la formation à l’éco-conduite. Cette formation est proposée au conducteur dans le but d’uniformiser le comportement des conducteurs sur les routes, voies aériennes et routes marines. Un conducteur sachant appliquer chacun des principes de l’éco-conduite est nommé un éco-conducteur.

Les principes communs à l’éco-conduite sont définis en 3 niveaux qui sont applicables à tous les domaines du transport : les niveaux stratégique, tactique et opérationnel (Sivak et Schoettle, 2012). Ces niveaux représentent le niveau décisionnel sur lesquels les principes d’éco-conduite interviennent sur la tâche principale selon (Michon, 1985), ici il s’agit de la conduite économique :

- **Le niveau stratégique** : La contrainte temporelle d’action est faible et demande plus de réflexion de l’opérateur. Ce niveau précède la conduite du véhicule (choix du parcours, le temps de parcours, le profil du parcours, l’entretien du véhicule, le choix du véhicule, etc.); néanmoins il est parfois difficile d’opérer sur ce niveau, quand le choix du parcours est unique, et que le profil de celui-ci est fixé en amont.
- **Le niveau tactique** : Le temps de réflexion est court mais la contrainte temporelle moyenne ou courte. Ce niveau concerne la phase de conduite (actions anticipatrices de conduite - arrivée à une intersection, aux feux de signalisation, modification de parcours, la charge du véhicule, etc.);
- **Le niveau opérationnel** : Le temps de réflexion et la contrainte temporelle sont courts durant la phase de conduite (style de conduite du véhicule : conduite sportive, conduite en sous régime, conduite optimale, conduite anticipatrice, passage de rapport changement de direction, procédure de freinage ou d’arrêt, suivi de trajectoire/consigne, etc.).

3.3.1 L'enjeu de l'éco-conduite

Une des pistes donc pour la réduction de l'empreinte carbone du transport, serait la création d'aides à la conduite efficaces à plusieurs niveaux (sécurité, fiabilité, économies). Le développement des systèmes ISA (Intelligent Speed Adaptation), qui permettent d'adapter automatiquement le véhicule à la vitesse légale, a ainsi laissé penser à un effet sur la réduction de consommation de carburant. Mais des études ont montré que si l'impact de ces systèmes sur la sécurité et l'accidentologie est maintenant bien connu, leur impact sur la réduction de consommation est moins avéré. Ainsi une étude réalisée par le LIVIC sur le limiteur de vitesse LAVIA a montré certains effets pervers liés au système (le conducteur « colle » à la limitation de vitesse et n'utilise pas un rapport de boîte adapté). La conduite induite par de tels systèmes ne peut donc pas être associée simplement à une conduite économique. En revanche, de nombreuses études ont montré un fort impact du style de conduite sur la consommation de carburant. Ainsi une conduite économique, souvent désignée par le terme éco-conduite, permettrait de réduire jusqu'à 25% la consommation de carburant. Il s'agit donc de faire prendre conscience aux conducteurs que leur comportement est la clé de progrès immédiats de consommation et par conséquent de réduction de rejets polluants. Au contraire, une conduite agressive augmente énormément la consommation de carburant et les émissions de gaz mais elle ne réduit que très peu le temps de parcours.

Ainsi un essai réalisé en Europe a démontré que la conduite agressive, les départs précipités aux feux de circulation et les arrêts brusques réduisaient la durée de déplacement de seulement 4% (l'équivalent de 2,5 minutes sur un déplacement de 60 minutes). Cependant, la consommation de carburant augmentait de 37% et certaines émissions toxiques étaient 5 fois plus élevées.

L'enjeu serait donc de former les chauffeurs à l'éco conduite et de sensibiliser les transporteurs sur le potentiel gain sur le carburant qu'ils peuvent réaliser.

Il est indéniable que l'innovation technologique permet de réaliser d'énormes progrès en matière de réduction de la consommation de carburant et d'effets de serre, néanmoins ces solutions répondent aux besoins de réduction des émissions pour des véhicules neufs, hors dans le cas de LHA, l'âge moyen des camions de la flotte de transport est de 11 ans, il est donc indispensable d'intégrer une solution qui peut s'adapter facilement aux besoins de LHA et qui soit facilement implémentée. L'éco-conduite semble être une bonne piste, qui permettra à LHA de réduire rapidement les émissions sur son scope 3.

3.3.2 Principes de l'éco-conduite

Les principes de l'éco-conduite pour le niveau stratégique : Le premier principe consiste à planifier le trajet, la planification du trajet permet de définir le parcours à suivre entre le point de départ et la destination d'arrivée. Cela a pour objectif l'anticipation d'événements au cours du trajet tels que les ralentissements, l'utilisation des routes les moins sinueuses,...etc.[20].

Un parcours avec peu de variation de vitesse permettra de réduire la consommation énergétique de 9% (Sivak et Schoettle, 2012) par rapport à un parcours dont la vitesse limite varie sur de courtes distances et dont l'amplitude est grande, ou sur une route composée essentiellement de stops obligeant l'arrêt et le redémarrage du véhicule. Le profil 19 de la route (en pente, sinueuse, en plaine, etc.) aura un impact sur la consommation de 15 à 20% (Sivak et Schoettle, 2012). Les conditions de circulation du parcours à réaliser (condition fluide ou embouteillage ou temps de pluie, etc.) ont un impact sur la consommation d'énergie de 20 à 40% (Sivak et Schoettle, 2012).

Le second principe porte sur l'entretenir du véhicule, un bon entretien du véhicule permet de réduire le risque d'augmentation de la consommation. L'huile du moteur peut faire économiser entre 1 et 2% de carburant (Sivak et Schoettle, 2012), une bonne circulation d'air (gaz d'échappement, filtre à air non bouché, etc.) peut entraîner jusqu'à 40% d'économie d'énergie (Sivak et Schoettle, 2012). Enfin la pression des pneus qui diffère de 10% de la pression nominale entraîne une surconsommation énergétique de 1 ou 2% (Sivak et Schoettle, 2012).

Le dernier principe concerne la répartition de la charge, et éviter de surcharger le véhicule, une répartition optimal des masses dans le véhicule permet de réduire les forces résistives de frottement s'exerçant sur le véhicule.

Les principes d'éco-conduite au niveau tactique : Au niveau tactique les principes de l'éco-conduite sont les suivants :

- Observer et anticiper l'évolution du trafic : Les conditions de circulation du parcours à réaliser (condition fluide ou embouteillage ou temps de pluie, etc.) ont un impact sur la consommation d'énergie de 20 à 40% (Sivak et Schoettle, 2012) en fonction du temps et de la distance à parcourir. Par exemple, anticiper l'évolution des courants marins permet de profiter des flux permettant une utilisation réduite de la puissance motrice d'un bateau ;
- Utiliser à bon escient les options du véhicule : l'utilisation des équipements de bord comme l'air climatisé qui, en fonction de la vitesse et la température souhaitée, réduira la consommation d'énergie entre 5 et 25% par rapport à une conduite du véhicule avec les fenêtres ouvertes. En effet, l'ouverture de celles-ci réduit l'aérodynamisme du véhicule et augmente la consommation de carburant due à l'augmentation des forces résistives s'exerçant sur le véhicule (Sivak et Schoettle, 2012) ;
- Limiter les accélérations brutales et conserver une vitesse stable pour réduire la consommation d'énergie du véhicule (Azzi, 2012; Enjalbert, 2014; Shinpo, 2007). En effet, une conduite dont la dynamique en accélération sera rapide semble plus économique mais il est démontré qu'une conduite dont la dynamique de l'accélération est modérée, a un meilleur impact sur la consommation de 31% par rapport à la première (Sivak et Schoettle, 2012).

Les principes de l'éco-conduite au niveau opérationnel : Quant au dernier niveau, à savoir l'opérationnel, les principes de l'éco-conduite sont les suivants :

- Conserver un régime moteur bas : Par exemple, pour un véhicule automobile à carburant diesel, passer les rapports de vitesse entre 1200 et 2500 tours par minute, permet d'économiser de 5 à 10% de carburant en moyenne (<http://www.ecoconduite.org/basesintro.php>, 2013; Luu, 2011; Mobigreen. fr, 2013; Saint Pierre et Andrieu, 2010; Shinpo, 2007; Slim Azzi, 2012) ;
- Ne pas pousser la pédale/manipulateur d'accélération au maximum mais jusqu'à 60% voire 80% en fonction du moteur du véhicule. (Azzi, 2012; Gulbrandsen, 1986; Luu, 2011; Mobigreen. fr, 2013; Saint Pierre et Andrieu, 2010; Shinpo, 2007) ;
- Ne pas dépasser une vitesse de 80km/h, ce qui permet de réaliser jusqu'à 10% d'économie de carburant).
- Eviter de freiner, l'anticipation permet de décélérer progressivement en relâchant l'accélérateur (ADEME/PREDIT, 2009; ADEME, 2009; Luu, 2011; Mobigreen. fr, 2013; Saint Pierre et Andrieu, 2010; Shinpo, 2007; Slim Azzi, 2012).

3.3.3 Récidive comportementale

La récidive comportementale fait référence au retour à des comportements antérieurs ou habituels, en dépit d'une formation ou d'un apprentissage visant à modifier ces comportements. Dans le contexte de l'éco-conduite, cela signifierait que malgré avoir été formé aux pratiques de conduite éco-responsables, une personne retombe dans ses anciennes habitudes de conduite moins respectueuses de l'environnement. Cela peut inclure des comportements tels que la conduite agressive, l'accélération brusque, la surconsommation de carburant, etc.

Malgré la formation à la conduite éco-conduite, il a été montré que les conducteurs reprennent leurs habitudes de conduite. Sur le long terme la réduction de carburant n'est plus que de 4.7 à 8% d'économie (Saint Pierre et Andrieu, 2010). Cela s'explique par le fait que la conduite écoénergétique sans système d'aide est plus fatigante qu'une conduite normale (Yamabe et al., 2011). Selon Yamabe, lors de certaines phases de conduite, le conducteur ne sait pas quel geste et à quel moment il doit appliquer une règle d'éco-conduite. Ce manque d'information engendre du stress et une surcharge de travail pour le conducteur. Ce qui l'encourage à adopter un nouveau style de conduite sans se préoccuper de la consommation d'énergie selon Yamabe (Yamabe et al., 2011).

Néanmoins, les auteurs (Yamabe et al., 2011) soulignent le fait qu'en adoptant une conduite éco-énergétique, le conducteur a économisé 2,1 km/l (le conducteur a pu réaliser 2,1 kilomètres en plus pour un litre de carburant ce qui fait pour 20 litre 42 km de parcouru en plus), pour une conduite économique sans système d'aide par rapport à la conduite normale. L'utilisation d'un système d'aide à l'éco conduite améliore la performance d'éco-conduite en permettant de parcourir 2,51 km/l par rapport à une conduite normale et représente un gain de 0,41 km/l pour une conduite économique avec système d'aide par rapport à une éco-conduite sans système d'aide. Yamabe (Yamabe et al., 2011) conclut que

21 le niveau de fatigue physique diffère en fonction du type de route auquel le conducteur est confronté mais aussi en fonction de son comportement de conduite [20].

3.4 Interdépendance causale des indicateurs de performance de la maintenance et de l'implémentation de l'éco-conduite

Pour absorber les effets de récurrence comportementale, un certain nombre d'actions peuvent être mis en place, pour le suivi des consignes de l'éco-conduite, notamment plusieurs indicateurs de performance liés à la maintenance du véhicule. On peut admettre qu'un rapport de causalité existe entre la durée d'usure de certains consommables, comme les pneus ou les plaquettes de frein et le type de conduite. Notre diagnostic portera sur la fréquence de changement de certains consommables, pour différentes catégories de poids lourds, avec la fréquence de changement du matériel consommable.

3.4.1 Usure des véhicules

L'usure d'un véhicule dépend de plusieurs facteurs comme le kilométrage cumulé, l'âge, mais également les conditions d'utilisation, le type de véhicule et la maintenance. Elle dépend également de la période de conception du véhicule : ainsi, d'anciennes générations de véhicules ont eu par exemple des carburateurs qui se déformaient à haute température, ou des carrosseries qui se dégradent rapidement car elles n'étaient pas protégées par cataphorèse, mais également le style de conduite. On peut considérer deux grandeurs pour estimer l'utilisation maximale en cycle de vie d'un véhicule : sa durée de vie et sa longévité kilométrique. L'âge d'un véhicule est en règle générale bien corrélé avec son kilométrage cumulé (Kolli 2012).

Si on s'intéresse aux pièces d'usure des véhicules, nous pouvons en déduire un certain nombre de choses sur la corrélation qui peut exister entre la fréquence d'usure de ces pièces et le type de conduite adoptée par les chauffeurs. D'après Le Maître et al. (1998), le coefficient d'impact global imputé au style de conduite vaudrait 6 tandis que celui lié à la trajectoire vaudrait 15. Le véhicule lui-même, à travers l'alignement de ses roues (géométrie du train roulant), aurait un coefficient d'impact de 1.5, pour un coefficient global du facteur véhiculaire incluant poids et suspensions équivalent à 2. Sur la base de ces études antérieures le lien intrinsèque de l'usure des consommables des véhicules avec le style de conduite, ne peut être négligée [23].

Conduite et Pneumatiques

Les pneumatiques routiers sont constitués de polymères; du caoutchouc vulcanisé mélangé à d'autres matériaux. L'usure des polymères correspond à une perte de matière

de surface due aux mouvements de cisaillement interfaciale entre le polymère et la surface avec laquelle il est en contact.

Cycle de vie : La durée de vie d'un pneumatique automobile est déterminée par l'épaisseur de la gomme en bande de roulement, la qualité de la gomme ainsi que par des facteurs liés à la conduite et à la route. Le type de véhicule, qui influe sur la taille des pneumatiques, est également un facteur important. Aujourd'hui, les pneumatiques PLF peuvent parcourir en moyenne 200 000 km (EY 2016), 25% de plus s'ils sont recreusés, 200 000 de plus s'ils sont rechapés (i.e. réutilisation de la carcasse pneumatique) et encore 25% supplémentaires si les pneus rechapés sont à leur tour recreusés (Michelin 2007). En 2015, 40% des pneus de PL vendus en France étaient rechapés (EY 2016).

Une maintenance optimale des pneus PLF permet de parcourir une distance 2.5 fois plus longue que la distance moyenne réalisée par les pneus VP. Ceci s'explique principalement par la différence du volume de gomme usable sur les différents pneus considérés, bien que la pression engendrée sur la route par les pneus PLF (environ 0.8 MPa) soit 4 fois plus importante que celle des pneus VP (environ 0.2 MPa) et donc que l'usure par adhésion voire abrasion soit relativement plus importante : sans considérer le rechapage et le recreusage, un PLF présente des pneumatiques plus grands (en largeur de bande de roulement et diamètre) et une épaisseur de gomme en bande de roulement plus élevée que ceux équipant les VP, d'où un volume de gomme à user plus important. Un pneumatique PL rechapé coûterait par ailleurs environ 40% moins cher qu'un pneumatique de première monte, et permettrait d'augmenter l'adhérence de 10% et d'économiser jusqu'à 2L de carburant aux 100 km.

Pression des pneus : La figure 3.4 de pneus testés à haute vitesse examinés à l'infrarouge, montre que la chaleur des pneus (qui est la signe visible d'une résistance au mouvement) augmente à mesure que la pression de gonflage diminue. Chaque 0.7 barre (10 psi) de sous-gonflage augmente la consommation de carburant d'environ 1%. Cependant les Pneus usés à 50% → économie de carburant de 5% de mieux que nouveau. Le désalignement d'un essieu directeur est également une des causes supplémentaires de flexion des pneus qui augmente d'environ 2% la consommation de carburant.

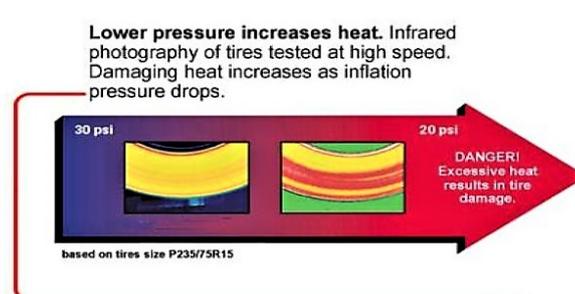


FIG. 3.4 : Pneus roulant à haute vitesse sous infrarouge (DIT before you drive LA)

Chaque 0.7 barre (10 psi) de sous-gonflage augmente la consommation de carburant d'environ 1%. Cependant les Pneus usés à 50% → économie de carburant de 5% de mieux que nouveau. Le désalignement d'un essieu directeur est également une des causes supplé-

mentaires de flexion des pneus qui augmente d'environ 2% la consommation de carburant.

L'impact de la Conduite : Le type de conduite, accélération, vitesse ...etc, impactent fortement la consommation du véhicule. L'éco-conduite sur parcours mixte permettrait une économie d'énergie d'environ 14% comparée à une conduite standard, quand on relèverait une surconsommation moyenne de 40% pour une conduite sportive/agressive (Fonseca, Casanova, et Espinosa 2010). Sur route extra-urbaine, elle économiserait jusqu'à 25% d'énergie comparée à une conduite standard (Van Mierlo et al. 2004). Sur autoroute, une conduite sportive implique une surconsommation moyenne de plus de 12%, tandis qu'une écoconduite permet une réduction jusqu'à 5.7% (Gense 2000). En milieu urbain, les différences de consommation induites par des conduites sportives ou économiques sont encore plus marquées du fait des phases énergivores d'accélération et de décélérations.

La vérification de la pression des pneus est imputable au comportement de conduite du chauffeur. Un chauffeur précautionneux vérifie la pression de ses pneus avant un chargement et l'adoption de ces bonnes pratiques permet de réaliser des économies de consommation.

Conduite et plaquettes de frein

Les pièces détachées d'un véhicule n'ont pas toutes la même durée de vie moyenne, et leur vitesse d'usure dépend en partie de l'utilisation faite du véhicule et de l'environnement dans lequel évolue le véhicule. Les variations de vitesse, impliquant des accélérations (et décélérations), et dépendant elles-mêmes de la fluidité du trafic, du type de conduite, de la géométrie de la route, des obstacles et des frictions en bord de route, affectent l'usure de la voiture et donc celle de ses pièces.

Lorsque vous sollicitez davantage les freins, plusieurs phénomènes physiques et de frottement se produisent. Le système de freinage d'un véhicule utilise généralement des plaquettes de frein qui sont pressées contre les disques de frein (ou tambours dans certains cas). Lorsque vous appuyez sur la pédale de frein, cela actionne un mécanisme qui applique une force sur les plaquettes, les poussant contre les disques de frein en rotation. Lorsque les plaquettes de frein entrent en contact avec les disques, un frottement se produit. Ce frottement génère une résistance qui s'oppose au mouvement du véhicule. Le frottement entre les plaquettes de frein et les disques de frein est le résultat de l'interaction entre les surfaces rugueuses des matériaux. Lorsque les plaquettes sont pressées contre les disques, les aspérités des surfaces entrent en contact et s'engagent les unes avec les autres, créant une force de friction. Cette force de friction convertit l'énergie cinétique du véhicule en chaleur. Plus l'on sollicite les freins, plus le frottement et la génération de chaleur sont importants, plus l'on accélère l'usure des plaquettes de frein. Et en conséquence la détérioration est plus accrue.

3.4.2 Fréquence de maintenance

Dans le but d'établir un diagnostic par rapport à la fréquence d'usure de certains consommables, nous nous sommes rapprochés auprès des transporteurs, après avoir récolté les données concernant les plans de maintenance de l'un des transporteurs de Lafarge Algérie, nous avons comparé la fréquence de maintenance telle qu'elle se pratique auprès de ce prestataire avec les standards constructeurs (Renault Truck et Michelin).

En effet plus la fréquence d'usure est élevée plus la fréquence de maintenance sera élevée. La figure 3.5 illustre bien que la fréquence de maintenance plus élevée que celle qui est préconisée par les constructeurs, bien que le type de conduite n'explique pas ces résultats à elle seule, d'autres paramètres peuvent expliquer une fréquence d'usure plus importante en Algérie (notamment l'état des routes, la qualité des pièces de rechange...etc). Néanmoins cette fréquence plus élevée peut également s'expliquer par les comportements de conduite agressifs.

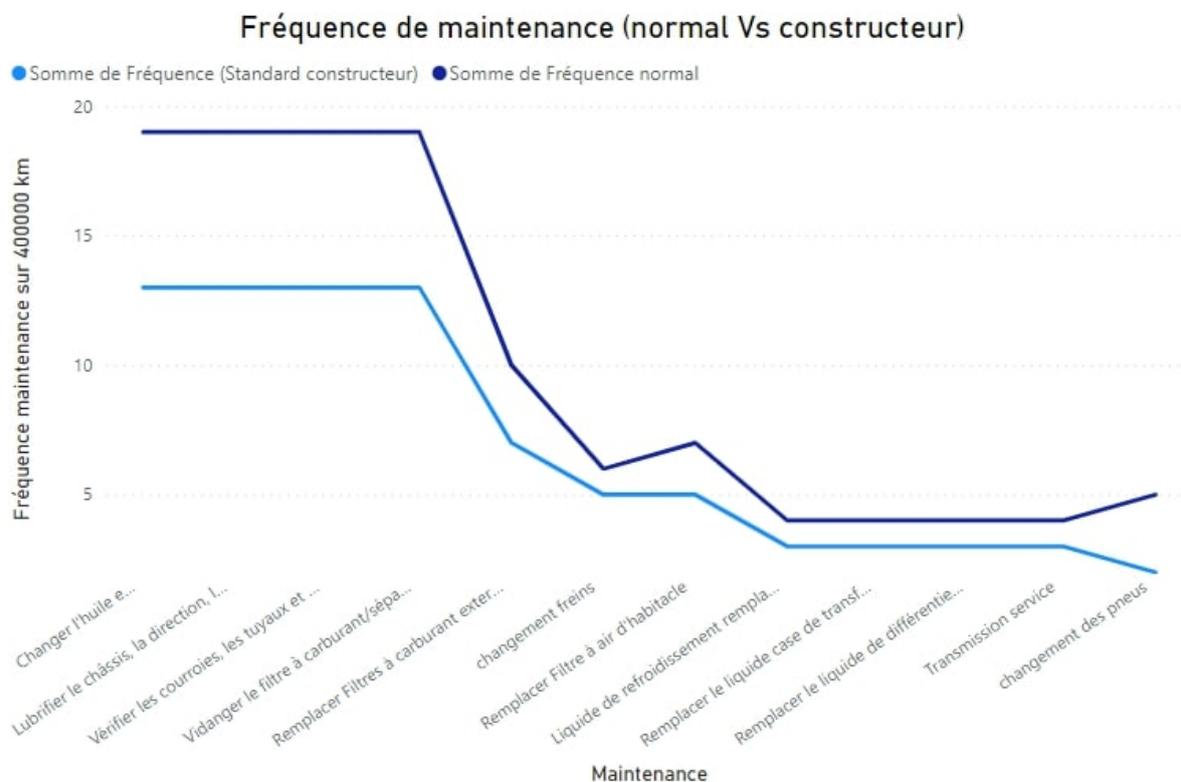


FIG. 3.5 : Fréquence maintenance consommables

3.5 Modélisation, Prédiction et Prévision

3.5.1 Estimation des paramètres du modèle K-means

Contexte méthodologique

Selon (Cochran 1977, Krathwohl 1982) on peut affirmer que la validité interne d'une étude réalisée à l'aide d'échantillons est supérieure à celle d'une étude qui engloberait la population tout entière. En effet, la relative rapidité de la cueillette d'information auprès d'échantillons et l'économie qui en découle permettent d'obtenir un degré d'exactitude sensiblement supérieur à une prise d'information auprès de l'ensemble de la population. Alors qu'un échantillon est une partie de la population choisie spécialement pour la représenter, l'échantillonnage est le processus par lequel ce choix est opéré. Il est donc évident que la généralisation des résultats obtenus dans toute recherche est tributaire des techniques d'échantillonnage. Le choix de cette technique est donc primordial pour la validité des résultats obtenus à la suite de ce processus [24].

La représentativité d'un échantillon : Dans le langage courant, la représentativité est considérée comme une propriété intrinsèque de l'échantillon. Ainsi, Larousse définit l'échantillon comme une « petite quantité d'un produit quelconque, qui sert à apprécier la qualité du tout (...) ». Malheureusement, quand on mène une étude sur le terrain, la complexité et la taille des populations que l'on veut décrire sont autant d'obstacles à la représentativité des échantillons. On contourne ces difficultés à l'aide de méthodes diverses qui permettent d'identifier un échantillon représentatif tout en fournissant des indications pour évaluer les effets de l'erreur échantillonnage, qui est inévitable quelque soit la méthode d'échantillonnage utilisée. La représentativité parfaite ne peut être garantie, cependant elle peut être améliorée en définissant correctement les objectifs de la recherche et la population ainsi que la taille des échantillons [24].

Définir l'objectif : Un ensemble d'objectifs énoncés dans une optique opérationnelle précisera la nature et la source des données requises et garantira que la totalité des informations nécessaires soient recueillies et que toute redondance soit éliminée. L'objectif dans le cadre de cette étude est d'estimer la consommation de carburant pour une flotte de transport qui livre à destination de l'ensemble du territoire national et ce dans le but de calculer les émissions de gaz à effet de serre du réservoir jusqu'à la roue dans un premier temps et ajuster la grille tarifaire sur le fuel cost per km dans un second temps.

Définir la population : Avant de définir un échantillon valable, il est indispensable de connaître les caractéristiques de la population cible. Une population est un ensemble dont les éléments comportent une ou plusieurs caractéristiques communes. À vrai dire, c'est l'ensemble des mesures qualitatives ou quantitatives de ces caractéristiques qui définit la population ; les individus ou entités appartenant à la population ne sont que les porteurs des caractéristiques en question.

Dans notre étude, notre population est l'ensemble des rotations de la assurés par la flotte de transport mis à disposition de Lafarge Algérie pour les activités de transport de marchandises (inbound ou outbound).

Pour définir une population, il faut d'abord déterminer une règle qui permet d'identifier les éléments ou unités échantillonnales de la population ; en outre, le choix d'un échantillon optimal implique qu'on en spécifie la structure interne, puisque ce sont les propriétés de cette structure qui conditionnent le choix d'une méthode d'échantillonnage susceptible d'augmenter la représentativité de l'échantillon retenu.

Quant à la structure interne de cette dernière, dont dépend, la détermination d'une méthode d'échantillonnage appropriée, il s'agit d'une question relativement complexe dont l'étude doit faire appel aux expériences acquises en la matière, sinon à une pré expérimentation en bonne et due forme. Il faut au moins répondre le plus objectivement possible à aux questions suivantes :

- La population est-elle homogène par rapport à la (aux) caractéristique(s) étudiée(s) ?
- Dans le cas d'une population hétérogène, existe-t-il des groupes homogènes au sein de la population ?

Dans notre cas, la population de rotations n'est pas homogène par rapport aux caractéristiques étudiées à savoir l'indice de congestion routière, le type de trajet ou de parcours, et la vitesse moyenne estimée, ces caractéristiques influencent directement notamment la consommation de carburant, hors dans notre étude, nous cherchons justement à estimer cette consommation de carburant. Hors la consommation de carburant par km pour un trajet de Msila à Destination d'Alger ou d'El Bordj, n'est pas la meme. C'est ce que nous tenterons d'explicitier à travers les résultats de notre échantillonnage. Et c'est cette hétérogénéité qui nous fait porter notre choix sur la méthode d'échantillonnage stratifié.

Constitution de la base de données : Dans ce qui suit, nous souhaitons estimer la consommation de carburant moyenne de la flotte de transport de Lafarge Algérie, pour des livraisons à destination de l'ensemble du territoire.

Le but est d'évaluer la consommation moyenne de carburant pour différents profils de parcours et d'extrapoler les résultats obtenus sur l'échantillon au reste de la population.

Chaque cluster sera constitué d'un certain nombre de de wilayas de destination pour les livraisons, nous avons des trajets différents, l'échantillon n'est pas homogène par rapport à plusieurs caractéristiques qui sont considérés comme des facteurs d'émissions, car leur variabilité à une incidence majeur sur la variation de la consommation de carburant.

Selon qu'un camion livre à destination d'Alger ou d'Adrar, sa consommation de carburant par km ne sera pas la même, car le profil de la route n'est pas le même, le relief non plus, la congestion routière ne sera pas la même et par conséquent la vitesse moyenne de circulation sera différente.

Dans ce qui suit nous allons évaluer les caractéristiques qui vont servir à alimenter notre modèle de machine learning (K-means) qui va nous aider à identifier des clusters (groupes homogènes), à partir de la nous pourrons passer à l'étape crucial l'échantillonnage.

Evaluation des vitesses moyennes de circulation par wilayas

L'un des paramètres d'entrée de notre modèle de machine learning, est la vitesse de circulation moyenne d'un camion sur une wilaya donnée. Il est déjà connu que la vitesse de circulation moyenne obtenue par le suivi des conducteurs par le service IVMS est estimée à 43.78 Km/h. Cependant, cette dernière ne peut être considérée comme fixe et stable sur tout le territoire national, car il est bien connu que la vitesse moyenne peut varier de manière considérable selon la destination et les Wilayas, selon différents facteurs influençant chaque région du pays, allant du type de la route (autoroutes, routes nationales, Wilayales et communales) jusqu'au trafic routier dû au niveau de congestion routière et au seuil de saturation par type de voie.

L'objectif de cette étude consistera donc à estimer les variations de vitesses qui existent entre les différentes Wilayas, en se basant sur le type de routes ainsi que le niveau de trafic routier présent dans chacune d'entre elles. Cependant, en considérant le manque important et la non accessibilité des statistiques et données issues d'études faites sur ce sujet en Algérie. Il nous a été impératif pour assurer la continuité de notre travail de développer une approche empirique qui nous permettra d'évaluer les vitesses moyennes de circulation dans chaque Wilaya, en se basant sur les statistiques accessibles sur le site de l'ONS, les réglementations et décrets du ministère de transport Algérien sur la circulation routière dans le pays, les données fournies par le service Google Maps ainsi que les différentes études et approches sur le domaines du trafic routier et le dimensionnement des routes utilisées dans d'autres pays.

Le travail sera réparti en deux temps, dans un premier temps nous allons estimer la vitesse hypothétique de circulation sur chaque Wilaya en se basant uniquement sur les limitations de vitesses des poids lourds sur les différentes routes, telles qu'elles ont été posées par ministère du transport, ainsi que le kilométrage du réseau routier disponible selon ses différents types (autoroutes, routes nationales, routes Wilayales, routes communales).

Dans un second temps, nous allons estimer la vitesse de circulation sur les différentes Wilayas durant les heures de pointes et de congestion routière, dépendamment des statistiques fournies par l'ONS sur le parc automobile Algérien présentées en .2, de plus des approches et méthodes utilisées pour l'estimation du niveau de trafic sur les réseaux routiers Français (une méthode principalement utilisée pour le dimensionnement des routes) ainsi que les approches anglo-saxonnes permettant d'évaluer la fluidité et le niveau de service possible dans ces dernières.

Évaluation des vitesses moyennes par Wilaya selon le réseau routier :

La première étape de cette démarche consiste à collecter l'ensemble des données présentées dans la figure sous forme de tableau 24, concernant le kilométrage de chaque type de route (Autoroute, Nationale, Wilayale, Communale) dans chacune des Wilayas du pays en se basant sur la description du réseau routier Algérien présenté en .5 ainsi qu'à partir des statistiques obtenues les sites de l'annuaire économique de Wilaya, de l'atlas routier du ministère du transport et des travaux publics, les données de kilométrage des autoroutes fournies par Google Maps.

En second lieu, afin d'identifier les limitations de vitesses des poids lourd sur les différents types de routes, nous nous sommes basés principalement sur le décret ministériel n°4/381 du 28/11/2004, article 24, limitant la vitesse des poids lourds de capacité supérieure à 19 tonnes à 80km/h sur les autoroutes, à 70km/h sur toutes autres routes hors agglomérations et à 40km/h pour les routes traversant des agglomérations. Aussi, et en vue du manque des statistiques sur le nombre de voies de chaque type de route mentionnés précédemment, nous avons établi les hypothèses suivantes :

- Les autoroutes (Est-Ouest, Nord-Sud, Pénétrantes, Rocades) comme étant des routes à 2*3 voies, à 80km/h de vitesse moyenne de circulation pour PL.
- Les routes nationales comme étant des routes à 2*2 voies, à 70km/h de vitesse moyenne de circulation pour PL.
- Les routes Wilayales et communales comme étant des routes à 1*2 voies, à 40km/h de vitesse moyenne de circulation pour PL.

Ces hypothèses ont été posé en considérant les routes communales et Wilayales comme étant mise en oeuvre principalement pour le déplacement des véhicules à l'intérieur d'une même commune, ou d'une même Wilaya (ie. Déplacement entre les communes d'une Wilaya) et peuvent ainsi être considérées comme des routes traversant dans la majorité des cas des agglomérations. Donc la vitesse de circulation dans ces 2 types de routes peut être affectée à une valeur de 40km/h. De même, les routes nationales représentent des routes s'étendant sur plusieurs wilayas du pays et traversent donc majoritairement des zones non agglomérées. Donc la vitesse de circulation sur ce type de route peut être considérée comme étant égale à 70km/h. A partir de ces hypothèses, nous avons calculé la vitesse moyenne hypothétique de circulation sur chaque Wilaya en effectuant la vitesse moyenne issue des hypothèses précédemment posées à chaque wilaya, ainsi la vitesse moyenne représente ici une moyenne pondérée par le % en type de route.

$$\begin{aligned} Vitesse_{moyenne_{wilaya}} &= V_{AR} \cdot \%Km_{AR} + V_{RN} \cdot \%Km_{RN} \\ &+ V_{RW} \cdot \%Km_{RW} + V_{RC} \cdot \%Km_{RC} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Tel que :

V_{AR} : représente la vitesse sur autoroute ;

V_{RN} : représente la vitesse sur route national ;

V_{RW} : représente la vitesse sur route wilayale ;

V_{RC} : représente la vitesse sur route communale.

Estimations des vitesses moyennes par Wilaya par l'introduction de l'indice de congestion routière

Après avoir déterminé les vitesses de circulation moyennes hypothétique sur chaque Wilaya en se basant sur la complexité du réseau routier existant. Cette étape consistera à estimer l'impact qu'aura le trafic routier sur la variation de ces vitesses, par rapport au niveau d'agglomération présent dans chaque région. De ce fait, l'objectif de cette partie est de déterminer le niveau de service (LOS) du réseau routier de chaque Wilaya, par le calcul du ratio V/C précédemment présenté dans le chapitre 2 de l'état de l'art. De sorte que la capacité de chaque réseau routier d'une Wilaya sera calculée en se basant sur les hypothèses établies dans la partie précédente sur le nombre de voies de chaque type de route, présentant le seuil de gêne et de saturation des différents types de voies en termes d'UVP. La capacité du réseau routier d'une Wilaya sera ainsi calculée par la moyenne de la capacité théorique de chaque type de route, pondérée par le kilométrage existant de chaque route sur la Wilaya concernée, selon l'équation suivante :

$$CS_{wilaya} = CS_{2*3voies} \cdot Km_{AR} + CS_{2*2voies} \cdot Km_{RN} + CS_{1*2voies} \cdot Km_{RW} + CS_{1*2voies} \cdot Km_{RC} \quad (3.3)$$

Tels que :

CS_{wilaya} : Capacité de saturation moyenne du réseau routier par wilaya ;

$CS_{2*3voies}$: Capacité de saturation moyenne d'une route 2*3 voies ;

$CS_{2*2voies}$: Capacité de saturation moyenne d'une route 2*2 voies ;

$CS_{1*2voies}$: Capacité de saturation moyenne d'une route 1*2 voies.

Le résultat de l'équation suivante est obtenu en termes d'UVP/jour. Afin de déterminer le nombre de véhicules circulant sur le réseau routier d'une Wilaya, nous nous sommes référés aux statistiques fournies par l'ONS sur le parc automobile national circulant en Algérie durant l'année 2019, présenté dans le Tableau 22. D'autre part, dû aux manques d'études statistiques établies et afin d'appliquer cette démarche, il est important de poser l'hypothèse que les flux journaliers de véhicules entrant (provenant de Wilaya voisines vers la Wilaya considérée) et sortant (provenant de la Wilaya considérée vers les Wilayas voisines) dans la Wilaya étudiée sont égaux, laissant ainsi à considérer uniquement les flux de circulation intra-wilaya, issus du parc automobile présent sur cette dernière.

Considérant que les capacités de saturation de chaque Wilaya sont données en UVP, il est nécessaire de convertir le nombre de véhicules total en cette unité. Pour cela, nous

Chapitre 3. Solutions et Contribution

avons considéré dans nos calculs les véhicules légers à 1 UVP comme étant des véhicules 2 roues, véhicules de tourisme et des camionnettes, et les véhicules lourds à 2 UVP comme étant des camions, des autobus et des tracteurs routiers, et ce, en se référant à la définition d'une UVP dans le chapitre 2 de l'état de l'art. Il est à préciser que nous avons uniquement considéré dans nos calculs les véhicules précédemment mentionnés car ils représentent à eux seuls plus de 90% du parc automobile national, ce qui est largement suffisant à l'aboutissement de notre étude. Ainsi, et selon les hypothèses précédentes et aux notions présentées dans le chapitre 2, le nombre d'unités de véhicules particuliers sur chaque Wilaya se calcule comme suit :

$$\begin{aligned}
 UVP_{total/wilaya} = & 1 * (NB_{moto} + NB_{VT} + NB_{camionnettes}) + \\
 & 2*(NB_{camion} + NB_{AB} + NB_{TR} + NB_{TA} + NB_{VS})(3.4)
 \end{aligned}$$

A noter que nous n'avons pas inclus les véhicules de type remorques dans nos calculs, car une remorque seule ne peut être en circulation, pour éviter qu'un véhicule ne soit comptabilisé 2 fois, nous avons volontairement omis d'inclure les remorques. Car une remorque est forcément rattachée à un tracteur. A titre d'exemple, si notre parc véhicule compte 6 tracteurs et 12 remorques, nous aurons au final 6 camions en circulation et 6 remorques en circulation, qui sont comptabilisés comme 6 véhicules roulant au total.

Pour en revenir à notre UVP, il est impossible que la totalité du parc automobile existant sur une Wilaya soit en circulation simultanément durant la même journée. Ainsi, afin d'estimer le pourcentage maximal de véhicule qui peut circuler simultanément dans une même heure de la journée, nous nous sommes basés sur le rapport de la direction des transports de la Wilaya d'Alger de l'année 2016, citant que le nombre de véhicules circulant simultanément dans la Wilaya durant ses heures de pointes est estimé à 450 000 véhicules. L'équivalent du tiers du parc automobile de la Wilaya durant cette année. De ce fait, nous avons généralisé les résultats de cette étude et posé l'hypothèse que le nombre total de véhicules circulant simultanément sur une ville ou Wilaya durant les heures de pointe peut être estimé à 1/3 du parc automobile total de la Wilaya concernée.

$$UVP_{en.circulation/wilaya} = 1/3 * (UVP_{total/wilaya}) \quad (3.5)$$

Ainsi, afin de déterminer le nombre total de véhicules en circulation par jour, nous avons effectué le calcul suivant :

$$UVP_{en.circulation/wilaya/jour} = \frac{UVP_{en.circulation/wilaya} * Vitesse_{moyenne/wilaya} * 24}{Kilomtrage_{total/wilaya}} \quad (3.6)$$

Donc, afin d'identifier le nombre de véhicules circulant par Wilaya par jour, nous utilisons le nombre total de véhicule en circulation par Wilaya (UVP), qu'on multiplie par la vitesse moyenne de circulation calculée dans le titre précédent (Km/h), et divisée par le kilométrage total du réseau routier de la Wilaya, afin d'obtenir une valeur du nombre d'UVP de circulation par Wilaya par heure (UVP/h), qui sera multiplié par le nombre d'heures par jour pour enfin déduire le résultat final. Enfin, la détermination du niveau de service LOS du réseau routier d'une Wilaya se fait par le calcul du ratio V/C , se présentant comme étant :

$$V/C = \frac{(UVP_{en.circulation/wilaya/jour})}{CS_{wilaya}} \quad (3.7)$$

3.5.2 Résultats du clustering

Après avoir estimé les différents paramètres du modèle de classification (LOS, Vitesse en circulation, Vitesse moyenne, Indice de congestion routière...etc), nous avons adopté le modèle K-means. Pour obtenir le nombre de cluster optimal, nous avons utilisé la méthode du coude. Suite à cela nous avons mesuré la qualité de la classification en calculant l'inertie intra-classe et l'inertie inter-classe (voir résultats en .3). Et enfin nous avons obtenu 4 clusters, chaque cluster représente un groupe de wilayas qui partagent une répartition de données plus au moins homogène par rapport aux paramètres du modèle de classification qui caractérisent la variable "*trajet type*" qui sera utilisé ultérieurement dans la modélisation de la consommation de carburant. Nous partons du principe qu'au vu de l'interdépendance des paramètres du modèle K-means et de la consommation de carburant. Si la la distribution des données est hétérogène par rapport au 58 wilayas considérés pour ces dits paramètres, alors la consommation de carburant suivra le même comportement. D'où la nécessité d'un échantillonnage stratifié.

Les résultats de ce clustering serviront à identifier des groupes homogènes autrement dit des catégories de populations, sur lesquelles on procédera à un échantillonnage stratifié, ciblé par type de trajet, nous avons repartis l'ensemble des combinaisons (Site, Destination) qui représente 99 combinaisons possible sur les 4 clusters identifiées, par la suite nous avons fait un échantillonnage aléatoire sur chaque cluster, de telle sorte à ce que l'ensemble des couples (Site de chargement, Wilaya de livraison) soient inclus dans l'échantillonnage, autrement dit on associe à chaque cluster un échantillonnage, l'échantillon est exhaustif par rapport à la représentation de l'ensemble des combinaisons possibles de livraison et aléatoire par rapport à d'autres variables comme le poids de chargement ou le type de camion qui matérialise l'aérodynamisme du véhicule.

Pour rappel l'objet de l'échantillonnage est la consommation de carburant par trajet, nous tentons d'avoir la plus grande représentativité possible par rapport à cette variable qui peut présenter des fluctuations en fonction du type de parcours, du relief des routes, la consommation de carburant varie d'une destination à une autre, il est donc important que cette variabilité apparaisse dans notre échantillonnage.

Le clustering est donc la première étape de l'échantillonnage stratifié.

3.5.3 Échantillonnage

Après avoir repartis les 99 combinaisons possibles sur les 4 clusters qui représentent chacun un trajet type. Nous avons procédé à l'échantillonnage, comme expliqué plus haut, pour chaque cluster nous avons relevé la consommation de carburant pour au moins 30 rotations. Nous avons obtenu à la fin 154 rotations, pour chaque rotation, nous avons relevé la consommation de carburant, le type de camion, la vitesse, le poids de chargement, le site de livraison, le site de chargement, la distance parcouru, ainsi que l'âge du véhicule. La figure 3.6 donne un aperçu de l'échantillonnage.

Type Trajet (cluster)	Trajet	Site	Destination	Type de camion	Poids de chargement (tonne)	Age camion	Vitesse (km/h)	Distance (km)	Consommation (L / 100km)
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	Cocotte	34,44	2018	61,73	40	52,33
A	BISKRA-ELMENIAA	BISKRA	EL MENIAA	Maraicher	39,6	2017	62,65	693	54,4
A	BISKRA-ELMENIAA	BISKRA	EL MENIAA	Plateau	38,20	2016	62,65	693	51,3
A	BISKRA-GHARDAIA	BISKRA	GHARDAIA	Cocotte	39	2018	62,65	462	60
A	BISKRA-GHARDAIA	BISKRA	GHARDAIA	Maraicher	39,6	2018	62,65	462	53,54
A	BISKRA-ILLIZI	BISKRA	ILLIZI	Cocotte	34,18	2019	62,25	1403	39,61
A	BISKRA-ILLIZI	BISKRA	ILLIZI	Cocotte	34,54	2017	62,25	1403	41,85
A	BISKRA-OULEDDJELLAL	BISKRA	OULED DJELLAL	Cocotte	34,38	2018	61,73	111	42,93
A	BISKRA-OULEDDJELLAL	BISKRA	OULED DJELLAL	Cocotte	34,5	2019	61,73	111	43,68
A	BISKRA-OULEDDJELLAL	BISKRA	OULED DJELLAL	Maraicher	39,6	2018	61,73	111	53,66
A	BISKRA-OULEDDJELLAL	BISKRA	OULED DJELLAL	Maraicher	40	2018	61,73	111	56,67
A	BISKRA-SOUKAHRAS	BISKRA	SOUK AHRAS	Cocotte	34,36	2018	62,86	305	56,41
A	M'SILA-ADRAR	M'SILA	ADRAR	Cocotte	37,29	2019	64,83	1334	44,35
A	M'SILA-AIN-DEFLA	M'SILA	AIN-DEFLA	Plateau	30,8	2015	62,52	335	53,34
A	M'SILA-AINSALAH	M'SILA	AIN SALAH	Plateau	39,6	2016	64,24	1168	55,93
A	M'SILA-BECHAR	M'SILA	BECHAR	Cocotte	30,8	2015	61,73	929	47,93
A	M'SILA-BISKRA	M'SILA	BISKRA	Cocotte	37,24	2015	61,73	216	53,3
A	M'SILA-ELMENIAA	M'SILA	EL MENIAA	Maraicher	39,6	2016	62,65	778	50,39
A	M'SILA-GHARDAIA	M'SILA	GHARDAIA	Maraicher	19,8	2018	62,65	507	49,79
A	M'SILA-ILLIZI	M'SILA	ILLIZI	Maraicher	35,11	2017	62,25	1755	42,89
A	M'SILA-OULEDDJELLAL	M'SILA	OULED DJELLAL	Cocotte	38	2016	61,73	238	66,3
A	M'SILA-OULEDDJELLAL	M'SILA	OULED DJELLAL	Maraicher	39,6	2018	61,73	238	59,44
A	M'SILA-SOUKAHRAS	M'SILA	SOUK AHRAS	Cocotte	35,20	2015	62,86	398	59,82
A	M'SILA-SOUKAHRAS	M'SILA	SOUK AHRAS	Cocotte	39,84	2018	62,86	398	80,53
A	OGGAZ-ADRAR	OGGAZ	ADRAR	Cocotte	34,9	2015	64,83	1302	40,77
A	OGGAZ-AIN-DEFLA	OGGAZ	AIN-DEFLA	Plateau	30	2013	62,52	249	38,22
A	OGGAZ-BECHAR	OGGAZ	BECHAR	Cocotte	34,9	2015	61,73	656	54,58
A	OGGAZ-BECHAR	OGGAZ	BECHAR	Cocotte	35,02	2019	61,73	656	49,69
A	OGGAZ-ELBAYADH	OGGAZ	EL BAYADH	Cocotte	29,65	2017	67,8	339	50,91

FIG. 3.6 : Résultats de l'échantillonnage sur la consommation de carburant

Ici nous sommes confrontés à un problème de disponibilité de données sur la consommation de carburant par trajet, l'idée était de proposer une approche pour faire une approximation sur la consommation de carburant, dans le but de calculé les émissions de gaz à effet de serre issues de la catégorie Upstream Transportation associée au SCOPE 3.

Rappelons que dans le cas ou nous aurions eu des données qui remontent automatiquement sur système, nous n'aurions pas eu besoin de passer par un clustering, une modélisation, un échantillonnage et une prédiction. A ce propos, ce sont les données de l'échantillonnage effectué qui vont entraîner notre modèle de prédiction. De telle sorte à ce que l'on puisse généraliser les résultats de l'échantillonnage au reste des rotations pour l'année 2022. L'idée serait d'entraîner le modèle qui donne la meilleure qualité de prédiction sur les données dont on dispose, afin qu'il puisse prédire la consommation intelligemment en prenant en compte les variables (Poids de chargement, type de camion, type de trajets, âge camion, vitesse ...etc).

Plus haut nous avons posé une hypothèse théorique selon laquelle la consommation de carburant suivrait le même comportement que les variables qui expliquent cette consommation, et en effet les résultats de l'échantillonnage montre bel et bien que la consommation de carburant varie par trajet type, la moyenne de consommation de carburant par cluster n'est pas la même. Ce qui nous rassure dans le choix de l'approche. L'objectif d'approche était de représenter le plus fidèlement la variation de consommation et les résultats confirment que cette objectif a été atteint.

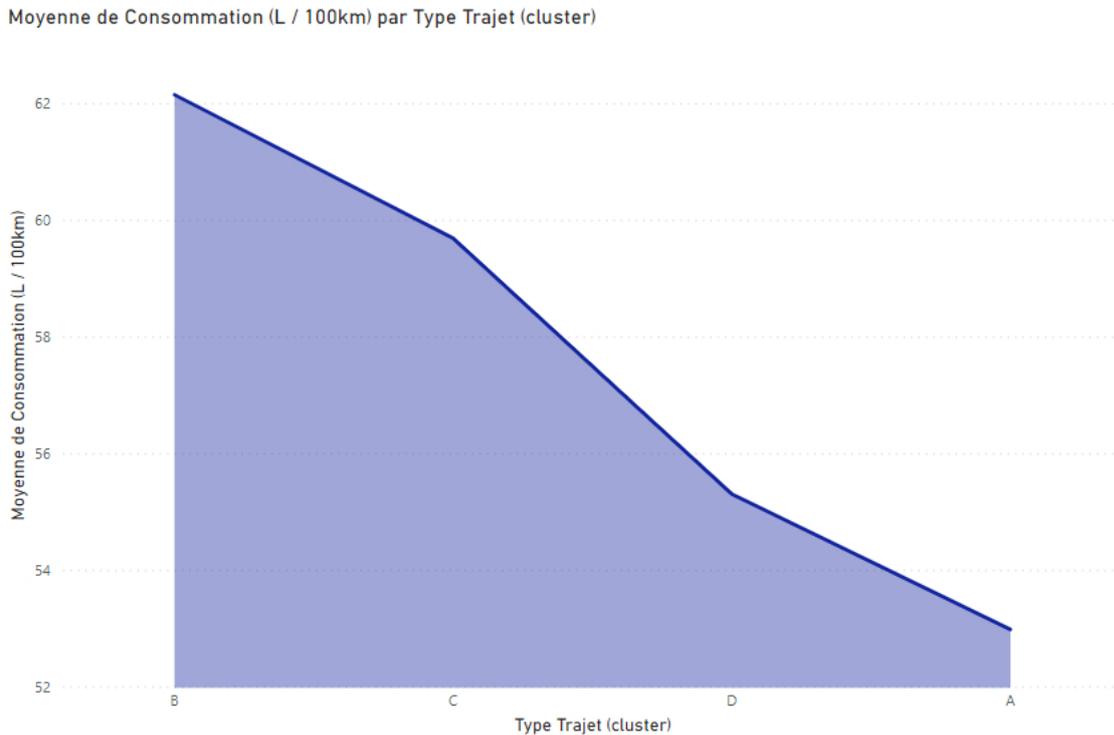


FIG. 3.7 : Moyenne de consommation par type de trajet (par cluster)

La prochaine étape consiste à prédire la consommation de carburant pour le reste des rotations.

3.5.4 Prédiction de la consommation de carburant

Modélisation mathématique : Voici le modèle mathématique qui prend en considération l'ensemble des variables (Trajet type qui caractérise le type de parcours, trajet qui intègre le point de chargement et de déchargement, poids de chargement qui comprend

$$Y_{cc} = f(V_{TT}, V_T, V_{PC}, V_{TC}, V_{AG}, V_{VM}, V_D) \quad (3.8)$$

Avant de prédire la consommation, il est crucial de passer par les étapes clés suivantes :

1. Établir le lien entre les variables exogènes et endogène, autrement dit confirmer que les variables du modèle expliquent significativement la variable endogène y consommation de carburant ;

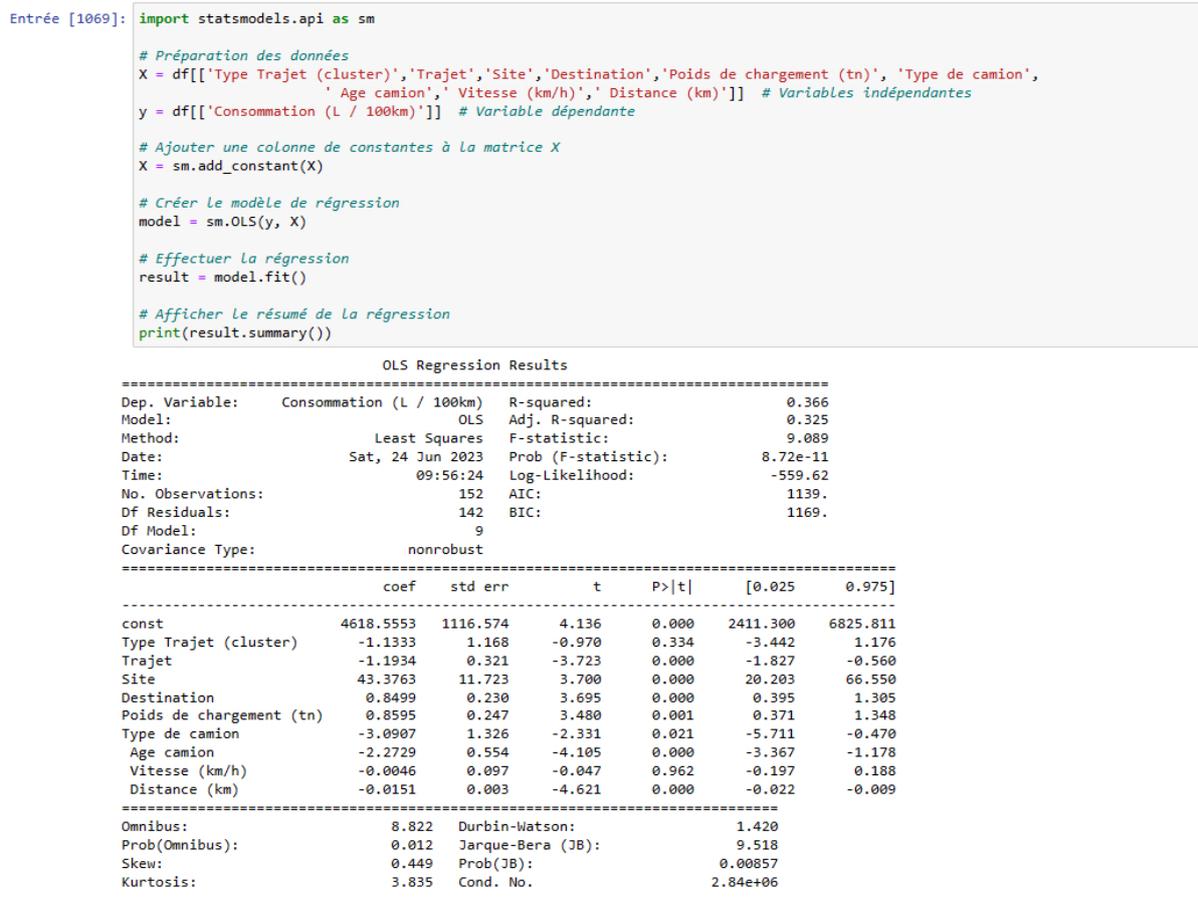


FIG. 3.8 : Régression MCO

Interprétation des résultats :

- Étude de la fiabilité par ANOVA : valeur du coefficient de corrélation multiple $R^2 = 0.366$ le modèle n'est donc pas suffisamment fiable.
- Etude de la fiabilité par inférence statistique : Test de linéarité t-test

$$\begin{cases} H_0 : \text{il n'y a pas de lien corrélation linéaire statistiquement significatif} \\ H_1 : \text{il existe un lien de corrélation linéaire statistiquement significatif} \end{cases} \quad (3.9)$$

On voit bien que $|t_{calcul}| > t_{critique}$ pour un seuil de 5% et un degré de liberté de 152 pour les variables (Trajet, Site, Destination, Poids de chargement (tn), Type de camion, Age camion, Distance (km)), H_1 acceptée, présence de linéarité positive, pour ces variables.

Néanmoins $|t_{calcul}| < t_{critique}$ pour les variables Type de trajet et vitesse, H_0 acceptée, absence de linéarité positive.

Les résultats de ce test d'hypothèse montrent bien que certaines variables ont une relation linéaire avec la variable endogène, cela dits les variables comme

vitesse n'ont pas de relation linéaire, ça ne veut pas pour dire pour autant que cette variable exogène n'explique pas Y .

Suite l'analyse de fiabilité par ANOVA, nous avons procédé à une régression pas à pas, en comparant la qualité de la prédiction du modèle complet avec un modèle réduit contenant uniquement les variables qui ont été validé par ANOVA (voir résultats en 40)

$$\begin{cases} H_0 : \text{absence de différence significative entre modèle complet et modèle réduit} \\ H_1 : \text{il existe une différence significative} \end{cases} \quad (3.10)$$

La statistique de Fisher est calculée pour comparer le modèle complet (H_1) avec le modèle réduit (H_0). Dans notre contexte, la statistique de Fisher mesure la variation de la somme des carrés des résidus (RSS) entre les deux modèles, ajustée en fonction du nombre de variables explicatives et du nombre total d'observations. Dans notre cas, $F_{calcul} = 0.602 > F_{critique}$

La valeur critique est utilisée pour déterminer si la statistique de Fisher est suffisamment éloignée de la valeur critique pour rejeter l'hypothèse nulle (H_0). De part les résultats nous concluons qu'il y a une différence significative entre les deux modèles. Cela suggère que le modèle complet (H_1) est significativement meilleur que le modèle réduit (H_0), ce qui indique que les variables supplémentaires incluses dans le modèle complet sont importantes pour expliquer la variable dépendante.

Au regard des résultats des tests d'hypothèse, nous retiendrons l'ensemble des variables pour la suite.

2. Choisir le modèle qui donne la meilleure qualité de prédiction, pour se faire nous allons comparer les valeurs des différentes métriques (L'erreur quadratique moyenne MSE, la racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE ainsi que le coefficient de détermination R carré, qui nous renseignent sur la dispersion des erreurs résiduels et l'approximation de la variance de la variable dépendante Y qui représente la consommation de carburant ;

Modèle	Données	Métriques		
		MSE	RMSE	R^2
Régression Linéaire	Test	8.05	9.11	0.086
	Train	97.45	9.87	0.39
Polynomial Regression	Test	307.29	17.52	-2.37
	Train	48.01	6.92	0.7
Arbre de Décision	Test	165.94	12.88	-0.82
	Train	0	0	1
xgboost Regression	Test	45.03	6.71	0.51
	Train	2.57	0.001	0.99
Adaboost Regression	Test	50.35	7.09	0.45
	Train	43.71	6.61	0.75
Castboost Regression	Test	29.16	5.4	-46.7
	Train	0.46	0.68	-323.46
RandomForest Regression	Test	30.87	5.55	0.7
	Train	15.7	3.9	0.9

TAB. 3.2 : Comparaison des résultats des modèles de prédiction

Les résultats montrent clairement que le meilleur modèle de prédiction est le RandomForest Regression. Si on venait à interpréter les résultats on constate qu'il a l'erreur la plus faible et la R^2 le plus élevé. Si l'on considère par exemple le modèle xgboost il est vrai qu'on a l'impression dans un premier temps qu'il présente de bons résultats, néanmoins on est dans une situation "d'overfeating" de surentraînement avec ce modèle.

3. Nettoyage de la base de données réalisation 2022 de telle sorte à faire matcher les deux data set (réalisation 2022 et échantillon consommation carburant), cette étape consiste à faire correspondre les colonnes des deux tableaux ;

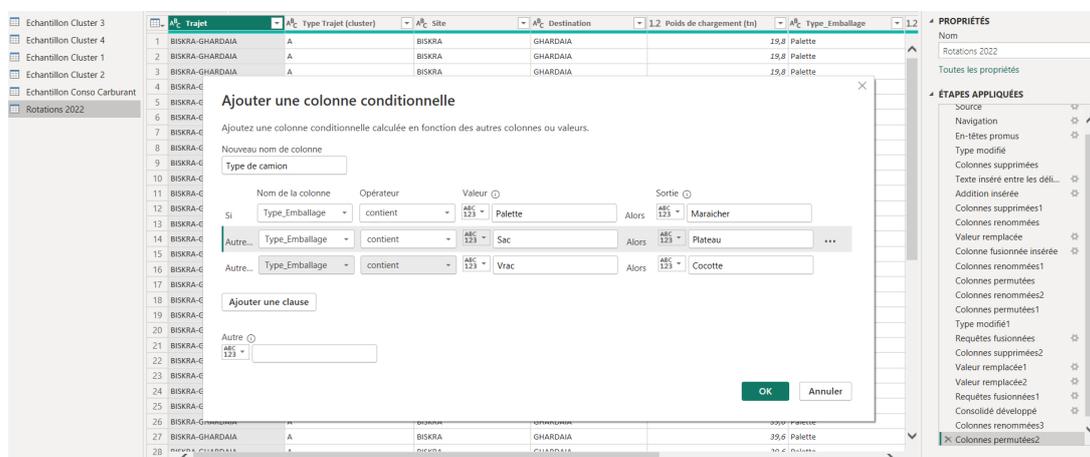


FIG. 3.9 : Nettoyage de la base de données réalisation 2022

4. Exporter les données à partir de Power BI en fichier excel qui peut être importer sur jupyter notebook afin d'appliquer le modèle de prédiction.

Type Trajet (cluster)	Trajet	Site	Destination	Poids de chargement (tn)	Type de camion	Age camion	Vitesse (km/h)	Distance (km)
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	11,7	Maraicher	2019	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	15,4	Maraicher	2018	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	17,6	Maraicher	2008	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	17,6	Maraicher	2012	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	1500	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	2011	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	2013	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	2014	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	2015	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	2016	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	2017	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	19,8	Maraicher	2018	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	22	Maraicher	2008	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	22	Maraicher	2012	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	22	Maraicher	2013	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	22	Maraicher	2016	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	22	Maraicher	2018	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	26,4	Maraicher	2015	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	26,4	Maraicher	2016	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	26,4	Maraicher	2019	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	26,4	Maraicher	2020	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	29,64	Cocotte	2017	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	30,8	Maraicher	1500	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	30,8	Maraicher	2007	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	30,8	Maraicher	2011	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	30,8	Maraicher	2013	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	30,8	Maraicher	2015	61,73	40
A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	30,8	Maraicher	2016	61,73	40

FIG. 3.10 : Exportation des données à partir de Power BI Desktop

5. Et enfin prédire les données de consommation de carburant en appliquant le modèle retenu "RandomForest Regression" (voir en Annexe section .4.3). Tout en s'assurant que notre code nous renvoie un fichier excel contenant l'ensemble de nos données de prédiction. Vous trouverez en 40 un aperçu des 44 premières lignes du fichier retourné par notre modèle à savoir *Ralisationprdition*.
6. Cette étape étant terminée il ne reste plus qu'à consolider les résultats des prédictions sur la consommation de carburant, appliquer Fuel-based method (transportation) de préconise par la norme GHG protocol pour retrouver à partir de la distance parcourue, la consommation de carburant par trajet, et consolider l'ensemble des résultats en utilisant une fonction somme.

3.5.5 Calcul des émissions

La méthode basée sur les carburants doit être utilisée lorsque les entreprises peuvent obtenir des données sur la consommation de carburant auprès des fournisseurs de transport (par exemple, camions, trains, avions, navires).

Les entreprises doivent également tenir compte de toute énergie supplémentaire utilisée et des émissions fugitives (par exemple, perte de réfrigérant ou climatisation). Lorsque

les données relatives à la consommation de carburant ne sont pas disponibles, l'entreprise peut calculer la consommation de carburant en utilisant les éléments suivants - le montant dépensé en carburants et le prix moyen des carburants - la distance parcourue et le rendement énergétique du véhicule - le montant dépensé pour les services de transport, la part du coût des carburants (en pourcentage du coût total des services de transport) et le prix moyen des carburants.

Dans notre cas, Lafarge Algérie dispose du service IVMS qui peut récolter les données concernant la consommation de carburant, les camions sont trackés du point de chargement jusqu'au site de livraison, et l'information est extraite à partir des plateformes dédiées au service.

Les données d'activités nécessaires :

Pour effectuer ce calcul nous devons collecter des données sur :

- Les quantités de carburant (diesel, essence, kérosène, biocarburants) consommées ;
- Les quantités d'émissions fugitives (provenant par exemple de la climatisation et de la réfrigération) ;
- La distance parcourue ;
- Le rendement énergétique moyen du véhicule, exprimé en litres de carburant consommés par tonne et par kilomètre transporté ;
- Volume et/ou masse des marchandises achetées dans le véhicule ;
- Informations sur la réfrigération éventuelle des produits pendant le transport.

Facteurs d'émission nécessaires :

Pour calculer les émissions nous devons collecter les données concernant :

- Les facteurs d'émission des carburants, exprimés en unités d'émissions par unité d'énergie consommée (par exemple, kg de CO_{2e}/litres, CO_{2e}/Btu)
- Pour les véhicules électriques (le cas échéant), les facteurs d'émission de l'électricité, exprimés en unités d'émissions par unité d'électricité consommée (par exemple, kg CO_{2e}/kWh)
- Facteurs d'émissions fugitives, exprimés en unités d'émissions par unité (par exemple, kg CO_{2e}/kg de fuite de réfrigérant)
- Les facteurs d'émission devraient au minimum inclure les émissions provenant de la combustion des combustibles et, dans la mesure du possible, les émissions du carburant du puits jusqu'à la roue (c'est-à-dire de l'extraction, du traitement et du transport jusqu'au point d'utilisation).

La formule de calcul des émissions pour la catégorie 4 du SCOPE 3 avec la méthode Fuel Based

$$CO_2 \text{ e emissions from transportation} = \sum \text{quantity of fuel consumed (L)} \times \text{EF for the fuel (kg CO}_2\text{e/L)} + \sum \text{quantity of electricity consumed (kWh)} \times \text{EF for electricity grid (kg CO}_2\text{e/kWh)} \quad (3.11)$$

Les données d'activités sont résumé dans le tableau suivant, c'est sur la base de ces données que le calcul des émissions sera fait :

Données d'activités	Valeurs
Total distance parcourue (Km)	41361700
Rendement énergétique moyen (L/100 Km)	60.83
Total consommation carburant (L)	25163131.95
Total quantité Rendu livrée en local (tonne)	5336869.4

TAB. 3.3 : Reporting des émissions Upstream Transportation pour l'année 2022

En appliquant la méthode fuel based on obtient le résultat suivant pour les émissions Upstream Transportation :

$$\text{Total Emissions from Upstream Transportation (KgCO}_2\text{e)} = 66933930.99 \quad (3.12)$$

$$CO_2 \text{ indirect emissions from upstream transportation SCOPE 3} = 12.54 \text{ kg/CO}_2 \text{ per ton transported} \quad (3.13)$$

3.6 Test sur l'éco-conduite et prévision

3.6.1 Principes fondamentaux et avantages de l'éco-conduite

Dans le contexte du projet Ecodrive de l'UE [25], les règles d'or de l'éco-conduite sont les suivantes :

1. Passer à la vitesse supérieure dès que possible. Passer à la vitesse supérieure entre 2 000 et 2 500 tr/min.
2. Maintenir une allure constante. Enclencher la plus haute vitesse possible et conduire avec un régime moteur faible.

3. Anticiper le trafic. Regarder le plus loin possible et anticiper le trafic environnant.
4. Décélérer progressivement. S'il faut ralentir ou s'arrêter, décélérer progressivement en relâchant l'accélérateur à temps et en laissant la voiture en prise (utilisation du frein moteur).
5. Vérifier régulièrement la pression des pneus. Une pression 25% trop faible accroît la résistance au roulement de 10% et la consommation de carburant de 2%.

L'éco-conduite dispose d'un potentiel permettant de faire des économies de carburant considérables. Mais outre la réduction de consommation de carburant, les autres avantages de l'éco-conduite sont :

- La réduction d'émissions de gaz à effets de serre notamment en termes de CO₂, lequel exerce un impact direct sur le réchauffement du climat ;
- La diminution des risques d'accidents grâce à une meilleure anticipation et à une conduite plus souple (cependant cela n'a pas encore été prouvé dans le cadre de l'écoconduite pour les apprentis-conducteurs ou les novices) [25] ;
- Le trajet est plus confortable pour le conducteur et ses passagers grâce au style de conduite plus fluide ;
- Le véhicule est moins bruyant grâce à une conduite à plus faible régime ;
- Réduction des frais liés à la maintenance des véhicules grâce à une conduite plus économiques, qui permet de réduire le taux d'usure des consommables.

3.6.2 Déroulement et Résultat du Test

L'idée générale est d'effectuer une expérience interne en utilisant des moyens déjà disponibles (camion, circuit bien connu, IVMS). L'expérience s'est déroulée sur 2 jours (25 et 26 juin 2023). Le chauffeur a effectué deux fois le même parcours : une première fois sans aucune consigne et une autre fois en respectant des consignes destinées à économiser du carburant.

Le circuit utilisé a pour point de départ Lafarge cimenterie Msila (LCM) et pour point de livraison Boufarik (Alger, Algérie), ce circuit correspond à un trajet de type inter-urbain, plutôt rural, et comportant une variabilité intéressante des situations de conduite et de relief et de parcours.

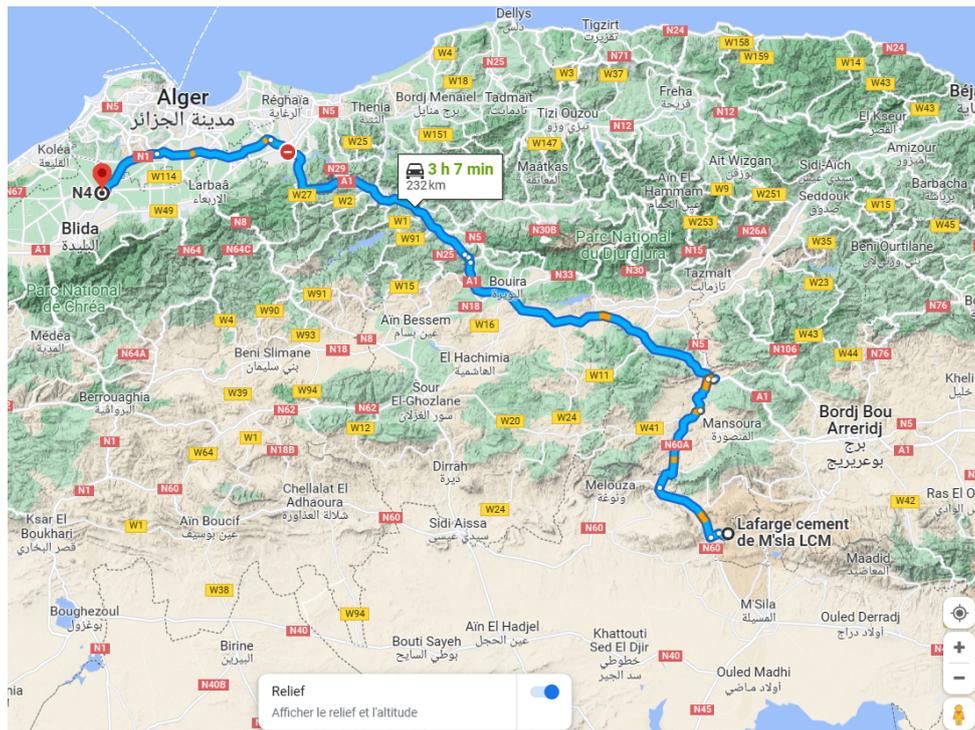


FIG. 3.11 : Circuit correspondant au trajet choisi pour le test d'éco-conduite

Outre le choix du circuit, il faut choisir préalablement un chauffeur candidat et un camion candidat, afin que les résultats du test soient pertinents.

1. **Choix du chauffeur** : après avoir menés plusieurs entretiens avec les transporteurs de Lafarge Algérie, notre choix s'est porté sur l'un d'entre eux, en s'appuyant sur des critères comme : la structuration, les pratiques métiers, la sensibilité à l'éco-conduite, la qualité de la relation B2B. Une fois le choix arrêté sur l'un des transporteurs, un conducteur a été proposé par le transporteur en question au regard de plusieurs critères : régularité disponibilité, ancienneté, expérience, coopération, sensibilité à la conduite économique et communication.
2. **Choix du camion** : pour le pas biaiser l'issue du test, le camion doit être relativement neuf, avec des pneus en bons états, c'est pour cette raison qu'il faut mesurer la pression des pneus avant le démarrage. Une inspection véhicule a donc été effectuée avant le chargement, afin de s'assurer que la pression des pneus soit correcte, et que le véhicule soit en état de rouler dans les meilleures conditions. L'inspection du camion s'est donc faite par le Superviseur Sécurité Routière de LLA. Et les résultats sont résumés dans la figure suivante :

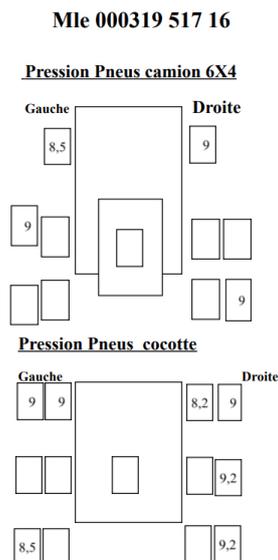


FIG. 3.12 : Inspection pression pneus cocotte test

Résultats : Le chauffeur a effectué deux parcours, un en respectant les consignes et un autre sans appliquer les consignes d'éco-conduite. Avant de mesurer la différence de consommation de carburant, il faut s'assurer que les consignes ont bien été respectées. Pour se faire il faut visualiser les rapports d'analyse de la consommation, d'analyse des vitesses, rapports temps moteur et évaluation conducteur, associées au circuit test. Ces rapports renseignent sur le style de conduite.

Vitesse

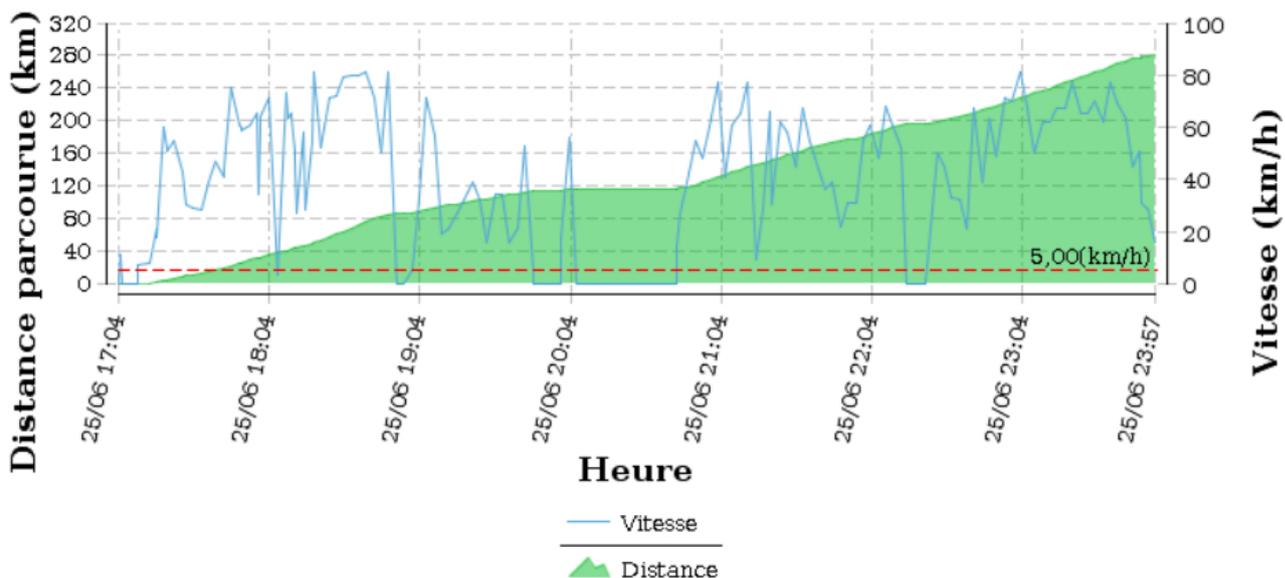


FIG. 3.13 : Rapport de vitesse du circuit test

Chapitre 3. Solutions et Contribution

On remarque que la vitesse de circulation limite de 80km a été respectée, il y a eu tout au long du parcours une seule violation à 23:04 ou la vitesse a légèrement dépassé le seuil supérieur.

Paramètres de la carte de score

Paramètres de la carte de score	Freinage Brusque	Accélération Excessive	Excès de vitesse	HOS violation de conduite	HOS Au Repos
Points de pénalité	1	1	1	1	1
Durée Cumulée En Violation			60	600	600



L'évaluation des conducteurs												
Conducteur	Mois	Distance (km)	Freinage Brusque: Points de pénalité	Freinage Brusque Occurrences (km/h/s)	Accélération Excessive Points de pénalité	Accélération Excessive Occurrences (km/h/s)	Excès de vitesse Points de pénalité	Excès de vitesse Durée (hh:mm:ss)	HOS dépassant les heures de conduite Points de pénalité	HOS dépassant les heures de conduite Durée (hh:mm:ss)	Score Total	
MUSTAPHA ABOUDA	June	280.45	0.42	5	0.17	2	0.69	0:08:20	0	00:00:00	1.28	

Evaluation Log													
Conducteur	Total Trip Duration (S)	Total Distance (Km)	Day Trip Driving Duration (S)	Night Trip Driving Duration (S)	Max Driving Duration In Day (S)	Max Driving Duration In Night (S)	Min Break Duration In Day	Min Break Duration In Night	Min Rest Duration In Day (S)	Min Rest Duration In Night (S)	Total Hos Driving Duration (S)	Total Hos Resting Duration (S)	Excès de vitesse (s)
MUSTAPHA ABOUDA	20848	280.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIG. 3.14 : Rapport d'évaluation conducteurs

Pour ce qui est de l'accélération brusques, on en compte 2 et 5 freinages brusques, ce qui reste globalement correcte, bien qu'une amélioration peut se faire dans ce sens, le SCORE CARD chauffeur s'élève à 1.28. Le chauffeur se situe dans la zone verte pour ce qui est du seuil de notation.

Diagramme d'activité globale de la période

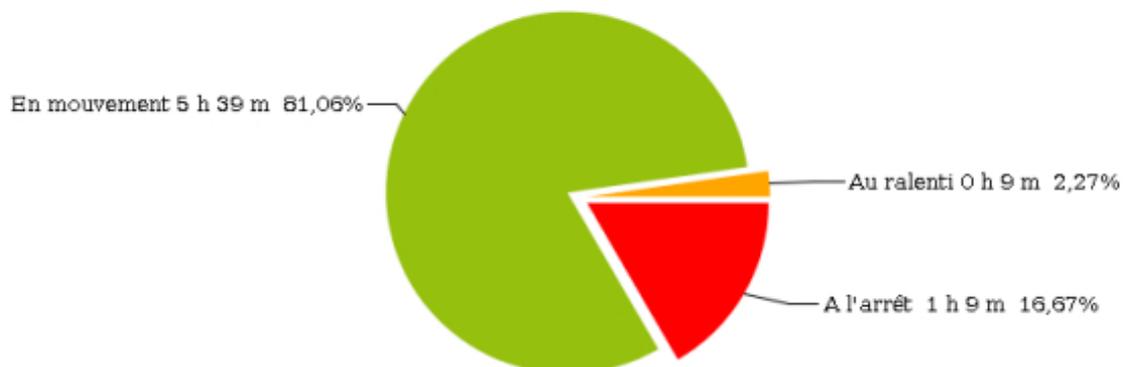


FIG. 3.15 : Rapport d'activité globale du circuit test

Chapitre 3. Solutions et Contribution

Comme nous l'avons vu précédemment, la consommation de carburant au ralenti est généralement plus élevée que lorsque le véhicule est en mouvement. Cela s'explique par le fait que le moteur fonctionne à un régime relativement bas, ce qui entraîne une combustion moins efficace du carburant. De plus, le moteur au ralenti est soumis à des pertes par frottement interne, ce qui augmente encore la consommation de carburant. Par conséquent l'une des consignes de l'éco-conduite est de réduire le plus possible les temps qui correspondent à un moteur au ralenti, le digramme 3.6.2 montre que le temps du moteur au ralenti est de 9mn ce qui correspond à 2.27% du temps de service. Ce résultat est correcte et dénote d'une amélioration par rapport à un parcours avec conduite normal ou le temps du moteur au ralenti peut s'élever à 15 ou 20% du temps de service. Il faut noter la distinction entre que le temps de service et de conduite. Le temps de service correspond au temps qui s'écoule du point de départ au point d'arrivée, ce temps comprend les heures de conduite pure et les temps de repos. Quand le temps de conduite correspond à la durée ou le moteur est en marche, que le véhicule soit en mouvement ou au ralenti.

Par conséquent le temps du moteur passé à l'arrêt qui équivaut à 1h09m, correspond à 16.67% du temps de service. Ce temps correspond au temps de conduite. Cette indicateur nous renseigne sur la gestion de la fatigue. Sur la base du diagramme d'activité la chauffeur a respecté le temps de gestion de fatigue qui est de 15mn chaque 2h de conduite, pour 6h de conduite le chauffeur s'est arrêté pendant 1h9m. Cette indicateur est important dans l'éco-conduite, dans le sens ou l'état d'esprit du chauffeur et par conséquent son style de conduite est sous l'influence de sa gestion de la fatigue. Plus un chauffeur sera fatigué, plus il aura tendance à avoir une conduite agressive et agitée.

Statistiques

Capacité du réservoir: 610 L

Date	Consommation (L)	Volume de remplissage (L)	Volume de vidage (L)	Distance parcourue (Km)
juin 25, 2023 (dimanche)	6.10	0.00	183.00	280.13

La consommation totale de carburant pour le parcours test est de 183 litres, pour une distance totale parcourue de 280.13 km. La consommation moyenne est donc de 65 litres/100 km => 0.65 L/km parcouru, tandis que la consommation de carburant pour le même trajet sans consignes d'éco-conduite est de 204.49 litres. Ce qui correspond à une moyenne de consommation de 73 litres/100 km => 0.73 L/km. Le gain de consommation de carburant pour ce test s'élève donc à 10.95% d'économie par rapport à un parcours sans éco-conduite.

Pour le parcours choisi, le potentiel de réduction des émissions est de 58 kg eCO_2 . L'économie de carburant est de 21.48 litres.

Taux de consommation de carburant par rapport à la distance parcourue

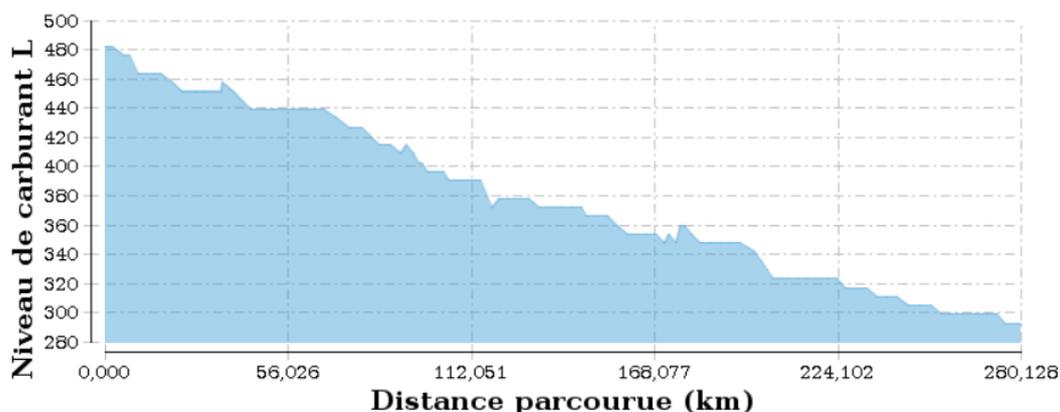


FIG. 3.16 : Rapport de consommation du circuit test

Les résultats de ce test seront certes généraliser au reste des parcours, pour mesurer le potentiel de réduction des émissions de GES, sur la catégorie 4 "Upstream Transportation". Néanmoins, nous attirons l'attention sur le fait que la multiplication de tests et le prolongement de la durée de formation des chauffeurs à l'éco-conduite. Peut conduire à de meilleurs résultats.

3.7 Emissions évitées

Maintenant qu'on sait combien est ce qu'on émet de CO_2 il convient enfin de calculer le potentiel de réduction des émissions par l'implémentation de l'éco-conduite. Tout d'abord il faut savoir distinguer les 3 leviers de contribution à l'objectif net zéro planétaire :

1. Réduction de l'empreinte de l'entreprise ;
2. Évitement d'émissions chez des tiers ;
3. Séquestration du CO_2 de l'atmosphère dans des puits de carbone.

Dépendamment du cadre dans lequel on se situe, la méthode de calcul et l'approche serait différente, il est donc importer de bien se situer afin de préserver la cohérence global de la démarche. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons au second levier, l'évitement des émissions chez les tiers (les transporteurs), par l'incitation à l'adoption d'une solution d'éco-conduite.

Principe : Les émissions évitées mesurent la contribution d'une organisation à la décarbonation de l'économie en dehors de son périmètre d'activité. Les émissions évitées sont estimées au regard d'un scénario de référence contrefactuel qui traduit la situation la plus probable qui aurait eu lieu en l'absence de la solution bas carbone.

Une solution évite des émissions si elle permet une réduction par rapport à la situation de référence, c'est-à-dire, si les émissions induites sont plus faibles dans la situation avec la solution. Dans ce cas, les émissions évitées sont données par la différence d'émissions induites entre les deux situations. Si la situation avec la solution induit plus d'émissions que la situation de référence, on parle alors d'émissions ajoutées.

Type d'émissions évitées : Une émission évitée peut, en fonction des cas, traduire :

- Une vraie réduction des émissions ayant eu lieu chez le client, par rapport à une situation précédente plus émettrice ;
- Une moindre augmentation des émissions du client, par rapport à un scénario contrefactuel fictif qui aurait induit plus d'émissions que la situation actuelle.

Cette différence de nature physique parmi les émissions évitées est prise en compte dans le référentiel Net Zero Initiative. Ainsi, deux sous-catégories d'émissions évitées sont définies :

1. **Les émissions évitées de type « réduction »** EE_R : part des émissions évitées (EE) correspondant à une réduction réelle des émissions par rapport à la situation précédente.
2. **Les émissions évitées de type « moindre augmentation »** EE_{MA} : part des émissions évitées (EE) correspondant à une augmentation des émissions par rapport à la situation précédente, mais moindre que dans le scénario de référence.

Les émissions évitées de type moindre augmentation et réduction respectent l'équation suivante :

$$EE = EE_{MA} + EE_R \quad (3.14)$$

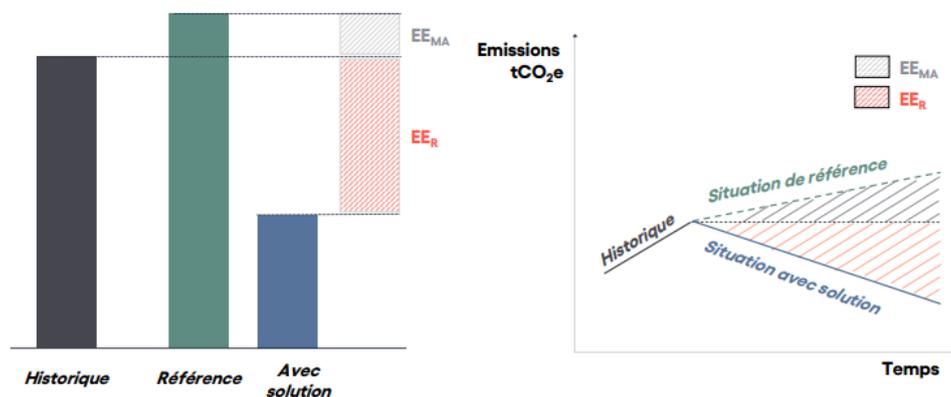


FIG. 3.17 : Vision agrégée sur l'ensemble de la durée de vie de la solution (gauche) et annuelle (droite) (NZI Pilier B)

Toutes les situations d'émissions évitées ne sont pas des situations « hybrides » comprenant les deux types. Si par exemple la solution décarbone significativement le système par rapport à l'état précédent, mais que ce système se serait de toute façon un peu décarboné en l'absence de ce projet (situation de référence en baisse, due par exemple à la tendance du marché ou à la réglementation), EE_R ne sera pas égal à l'écart entre les niveaux avant-projet /après-projet, mais bien à l'écart entre le projet et le scénario de référence.

Nous pouvons faire face également à une situation où la solution induit une augmentation des émissions par rapport à la situation précédente du système, mais pas autant que ce qu'il se serait passé en l'absence de la solution, les émissions évitées sont dans ce cas 100% des émissions de « moindre augmentation » (EE_{MA}).

3.7.1 Reporting

On a trois catégories d'émissions évitées :

- Par les produits et services vendus ;
- Par les investissements ;
- Par le financement de projets en dehors de la chaîne de valeur.

Et plusieurs indicateurs selon le NZI à prendre en considération lors du calcul des émissions évitées, entre autre le choix :

- De la situation de référence ;
- Temporalité de calcul ;
- Périmètre de calcul ;

- Évolution des émissions évitées au cours du temps ;
- Choix du niveau de précision des hypothèses.

Sélection des solutions du portefeuille

Avant de passer au reporting des émissions, il faut choisir ou sélectionner au préalable les solutions du portefeuille les plus pertinentes pour une telle évaluation, la sélection est basée sur les critères suivants :

- **Compatibilité de la solution avec l'objectif 1.5°C** : Cette compatibilité peut être jugée à l'aune des critères suivants :
 - La solution fait partie des solutions décrites dans le rapport AR6 du Groupe III du GIEC pour la décarbonation ;
 - La solution est éligible à la Taxonomie Européenne pour les activités durables ;
 - L'intensité carbone de la solution est alignée avec une trajectoire 1,5°C pour son secteur, sur toute sa durée de vie.
- **Non-préservation d'une activité incompatible 1.5°C** : La solution ne doit pas favoriser le maintien à long-terme d'une activité incompatible avec l'objectif 1,5°C (exemples : panneau solaire pour un nouveau forage pétrolier, optimisation des moteurs de véhicules individuels d'intensité carbone très élevée, etc.)
- **« Do no significant harm »** : La solution ne doit pas provoquer de dommages significatifs sur des indicateurs autres que le climat.

Nous devons donc nous assurer en amont que la solution proposée satisfait bel et bien ces critères.

Choisir une temporalité de calcul

Il existe deux temporalités de calcul différentes pour les émissions évitées :

1. **Calcul sur la durée de vie** : les émissions évitées sont calculées une seule fois à l'année de la vente/mise en service de la solution et sur toute sa durée de vie (calcul dit a priori ou ex-ante). Si la solution évitant les émissions est une solution qui est vendue à un client final, sans suivi ou contrat associé engageant sur la durée, Net Zero Initiative recommande que ses EE soient calculées sur l'ensemble de sa durée de vie et déclarées à l'année de vente.

Cette recommandation assure la cohérence temporelle entre la déclaration par l'entreprise des émissions de la phase d'utilisation de la solution, qui sont également

calculées sur l'ensemble du cycle de vie de la solution et déclarées à l'année de vente dans la catégorie Scope 3 " Utilisation des produits vendus".

Dans ce cas, l'entreprise doit :

- Établir la trajectoire des émissions futures de la solution, et évaluer le volume de GES que la solution est susceptible d'émettre pendant toute sa durée de vie ;
- Établir la trajectoire des émissions dans le scénario de référence, et évaluer le volume de GES qui aurait été émis pendant toute la durée de vie de la solution ;
- Évaluer les émissions évitées en calculant la différence.

Le calcul doit tenir compte des effets dynamiques (rebonds)² tels que la décarbonation future du mix énergétique, ou encore la dégradation de la performance de la solution et de la référence au cours du temps. Elle doit également utiliser des hypothèses raisonnables et fondées sur la durée de vie de la solution. Enfin, elle doit prendre en compte les éventuels effets rebond.

2. **Calcul annuel** : les émissions évitées sont calculées chaque année, grâce à un suivi de la solution sur sa vie (calcul dit a posteriori ou ex-post). Si la solution évitant les émissions est une solution louée à un client ou est directement exploitée par l'entreprise dans le cadre d'un contrat, Net Zero Initiative recommande que ses émissions évitées soient calculées et déclarées par l'entreprise chaque année, pendant toute la durée du contrat.

Cette recommandation assure la cohérence temporelle entre la déclaration par l'entreprise des émissions de la phase d'utilisation de la solution, qui sont également calculées et déclarées sur une base annuelle, soit dans le scope 3 " Actifs loués ". Dans ce cas, l'entreprise doit :

- (1) **Au début du contrat / mise en service de la solution** : définir la solution de référence qui aurait été choisie sans la solution de l'entreprise, et estimer sa trajectoire de fonctionnement au cours du temps sur toute la durée de vie ou tout le contrat, qui prend en compte des éventuels remplacements ou dégradations de performance.
- (2) **Chaque année** :
 - Évaluer les émissions réelles de la solution ;

²Effets rebonds : l'augmentation de consommation liée à la réduction des limites à l'utilisation d'une technologie, ces limites pouvant être monétaires, temporelles, sociales, physiques, liées à l'effort, au danger, à l'organisation...etc ». Il en découle le corollaire suivant : les économies d'énergie ou de ressources initialement prévues par l'utilisation d'une nouvelles technologies sont partiellement ou complètement compensées à la suite d'une adaptation du comportement de la société.

- Évaluer les émissions dans le scénario de référence, en se basant sur les performances de la situation contrefactuelle déterminée à l'année de mise en service, et sur les données réelles de mix énergétique de l'année en cours ;
- Calculer et déclarer les émissions évitées par la solution sur cette année.

Contrairement à l'option 1 – Calcul sur la durée de vie, il n'est pas nécessaire de prévoir :

- Ni la décarbonation future du mix énergétique, puisque le facteur d'émission réel est connu à l'année de calcul.
- Ni la performance future de la solution, puisque son utilisation réelle est connue chaque année.

Le calcul des émissions évitées, étape par étape

Ces étapes détaillent l'approche générale proposé par Net Zero Initiative pour le calcul des émissions évitées.

1. **Calcul des émissions avec la solution** : Ce sont les émissions qui ont réellement lieu. Pour ce faire, il est nécessaire de définir un scénario d'utilisation de la solution. Ce scénario est défini par le contexte dans lequel s'insère la solution (contexte de vente, pays d'utilisation, profil du consommateur, etc.). En définissant la situation avec la solution, on détermine par la même occasion le contexte dans lequel s'insère la solution, ce qui est indispensable à la définition de la situation de référence (Étape 2).

Nous allons résumer le travail qui a déjà été fait pour calculer les émissions de gaz à effet de serre :

- **Étape 1** : Recueillir les données sur l'activité recueillir les données brutes au sujet des activités émettrices pertinentes ;
- **Étape 2** : Trouver les coefficients d'émission pertinents ;
- **Étape 3** : Consulter les potentiels de réchauffement planétaire. Sans oublier que l'« équivalent de dioxyde de carbone » (éq. CO₂) est utilisé pour quantifier l'incidence de chaque gaz à effet de serre en calculant la quantité de CO₂ qui entraînerait le même effet de réchauffement. Par exemple, la conduite d'un véhicule génère principalement du dioxyde de carbone, mais aussi du méthane et de l'oxyde nitreux. Puisque ces deux gaz contribuent davantage au réchauffement planétaire que le dioxyde de carbone, ils doivent être pris en compte dans le calcul des émissions.

L'équivalent CO₂ permet de combiner les différents gaz produits par une activité et d'exprimer les émissions en une unité commune, plutôt que de déclarer

les émissions distinctes de chaque gaz. Pour convertir les émissions en équivalent CO2 il faut connaître le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) de chaque gaz ;

- **Étape 4** : Effectuer le calcul en tenant compte des effets dynamiques tels que : la décarbonation future du mix énergétique, ou encore la dégradation de la performance de la solution et de la référence au cours du temps, des effets rebonds, dégradation du rendement de la solution et de la référence.

$$CO2_{\text{équivalent}} = GES * PRP_{\text{dugaz}} \quad (3.15)$$

$$GES = \text{données sur l'activité} * \text{coefficient d'émission du gaz (kgCO2/t)} \quad (3.16)$$

2. **Calcul des émissions induites par la situation de référence** : La seconde étape du calcul des émissions évitées consiste à calculer les émissions qui auraient eu lieu en l'absence de la solution. Cette situation, qui par définition n'a pas eu lieu, est à approcher par un scénario contrefactuel : le scénario de référence.

À noter que la situation de référence est, comme la situation avec la solution, toujours une trajectoire d'émissions dans le temps. Elle peut également prendre la forme d'une quantité totale d'émissions, qui est la somme des émissions annuelles pendant toute la durée de vie de la solution. Dans le cas d'un calcul annuel des émissions évitées, la trajectoire d'émissions est simplement mise à jour en utilisant les données d'entrée correspondantes à l'année de calcul. Net Zero Initiative identifie deux grands types de scénarios de référence :

- **Situation précédente** : Prolongement dans le temps des émissions de GES avant l'introduction de la solution décarbonante. Cette trajectoire d'émissions tient compte de la décarbonation tendancielle de l'énergie.
- **Moyenne du contexte marché** : Correspond à la moyenne des émissions de gaz à effet de serre (GES) des alternatives qui auraient pu être utilisées à la place de la solution décarbonante. Ces alternatives doivent correspondre au contexte dans lequel la solution décarbonante a été mise en œuvre. Lorsque l'alternative spécifique est clairement identifiée (approche unitaire), la moyenne du contexte marché se compose d'un seul terme, à savoir les émissions de GES de cette alternative

Le choix du scénario de référence³ constitue la clé de voûte du calcul des émissions évitées car il doit éviter de surestimer l'impact positif d'une solution. La crédibilité du calcul en dépend.

³Le scénario de référence doit refléter au mieux la situation qui aurait eu lieu sans la solution : il est donc fortement dépendant du contexte dans lequel s'insère la solution.

Chapitre 3. Solutions et Contribution

Puisque le contexte dans lequel s'insère la solution a été défini lors du calcul de la situation avec la solution, il est à reprendre pour la définition de la situation de référence.

Net Zero Initiative définit une typologie de contextes, chaque type ayant un scénario de référence associé.

- **Contexte de nouvelle demande** : contexte dans lequel la solution vient répondre à une croissance de la demande. Dans ce contexte, les émissions sont nulles dans la « situation précédente » ;
- **Contexte de demande existante** : contexte dans lequel la solution vient répondre à une demande déjà existante. Elle remplace ou améliore un système existant. Dans ce contexte, les émissions de la situation précédente sont non nulles.

Le choix du scénario de référence se fait alors selon le processus présenté dans la figure suivante :

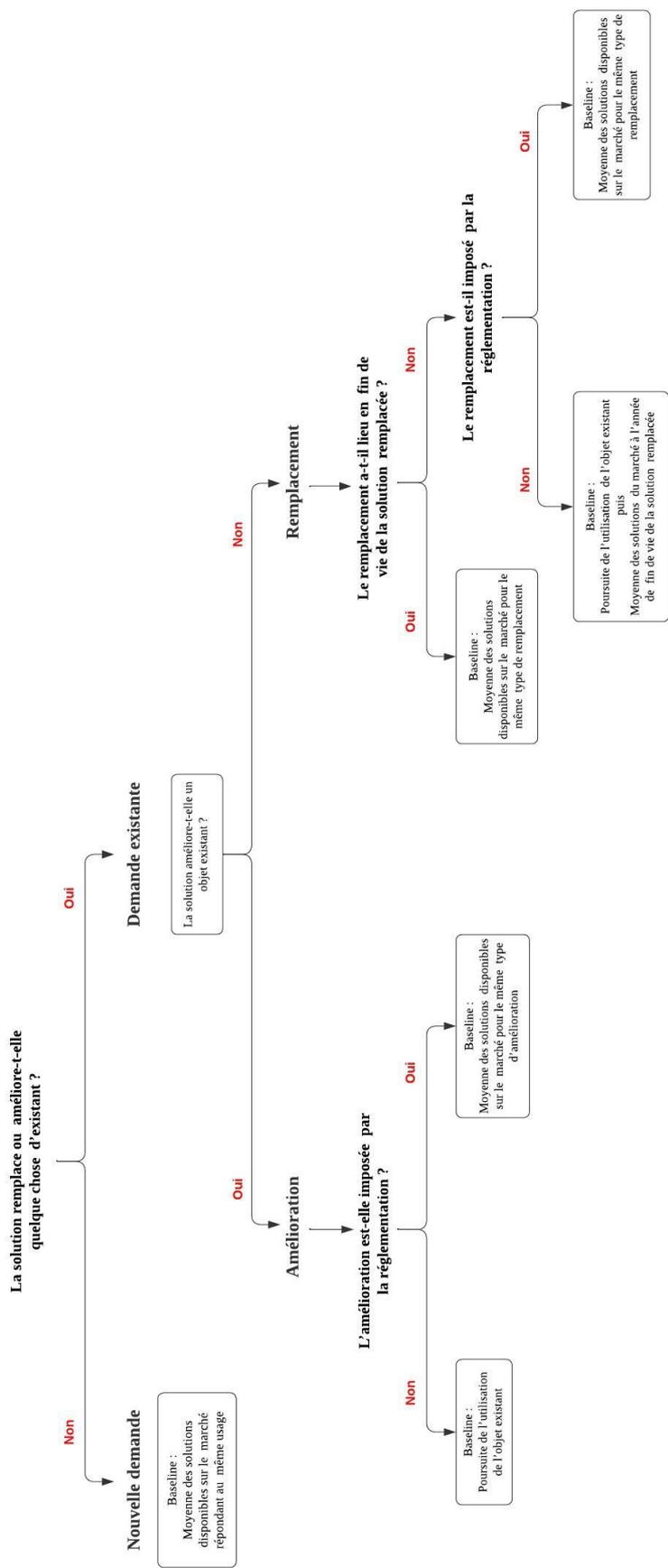


FIG. 3.18 : Arbre de décision résumant les contextes et situations de références associé

Notre solution s'insère dans un contexte de demande existante. Ou cette dernière optimise un système existant.

Cette optimisation du système existant n'est pas imposée par la réglementation, *le scénario de référence est la situation précédente*, c'est à dire le prolongement dans le temps des émissions de GES du système s'il n'y avait pas eu l'optimisation.

Calcul des émissions évitées

La solution décarbonante dans le cadre de ce travail est l'éco-conduite qui permet sur la base des tests qui ont été effectués en amont une réduction de 10.95% de la consommation de carburant. Pour ce qui est de la temporalité de calcul, le calcul peut se faire annuellement, car les données sur l'activité peuvent être rapportées à l'année d'activité, contrairement à un produit qui sera mis en vente, la solution que nous proposons est davantage un service qui permet de réduire les émissions des activités de transport. Et par conséquent la décarbonisation du mix énergétique (si décarbonisation il y a) peut être prise en compte pour ce qui est de la projection des trajectoires des courbes correspondant au scénario 1 (de référence) et le scénario 2 (avec solution).

La solution proposée s'inscrit dans le contexte d'une demande existante, qui servira à améliorer ou optimiser l'efficacité énergétique de l'activité de transport qui aura pour conséquence une réduction de la consommation de carburant et donc des émissions de gaz à effet de serre qui lui sont associées.

Cette solution d'amélioration, dans le cadre de l'exercice d'une activité en Algérie n'est pas imposée par la réglementation par conséquent nous avons pris comme base de calcul des émissions évitées **la poursuite de l'utilisation de l'objet existant** qui en d'autres termes signifie, une absence d'alternative ou de solution permettant la réduction des émissions liées au transport de marchandises. Pour expliciter le propos on prendra un exemple, si l'étude de l'éco-conduite s'inscrivait par exemple dans un cadre réglementaire qui contraint les transporteurs à réduire leurs émissions, on aurait pu prendre comme base de calcul les émissions évitées en adoptant d'autres types de motorisations (moteur électrique, hybride, hydrogène vert ou encore bio carburant). Dans notre cas nous avons pris comme base de calcul la poursuite des émissions sans solution décarbonante.

Nous avons projeté les courbes des émissions de gaz à effet de serre des deux scénarios, en supposant un taux de croissance annuel de 3% par rapport à l'historique. Nous avons également supposé que le mix énergétique algérien demeurerait telle qu'elle (nous nous sommes positionnées dans le pire scénario possible en ce qui concerne l'éventuelle décarbonisation du mix énergétique pour faire une estimation au pire cas et ce dans le but de ne pas surestimer l'effet de réduction des émissions de gaz).

La figure suivante représente la trajectoire des émissions de gaz à effet de serre pour ce qui est de la catégorie 4 du SCOPE 3 :

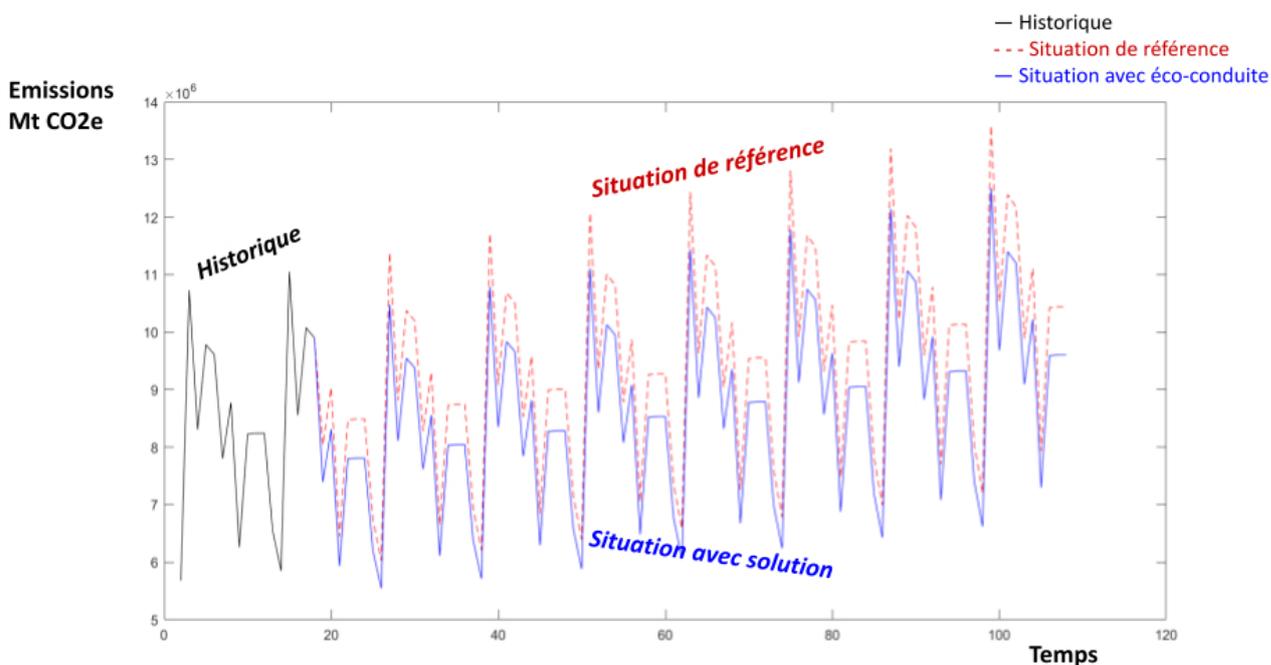


FIG. 3.19 : Vision agrégée de 2022-2030 de la différence des émissions entre les deux scénarios avec et sans solution

Après avoir visualisé la trajectoire de nos courbes, la prochaine étape consiste à calculer simplement l'aire entre les deux courbes (Situation de référence et situation avec la solution). Pour ce faire nous avons importé les données sur MATLAB, nous avons procédé à un simple calcul d'intégrale en utilisant la fonction "trapeze".

La méthode des trapèzes est une technique d'approximation numérique pour le calcul d'intégrales. Elle consiste à diviser l'intervalle d'intégration en plusieurs sous-intervalles, puis à approximer l'aire sous la courbe à l'intérieur de chaque sous-intervalle par un trapèze. Dans notre cas la fonction trapèze va calculer l'aire sous chaque courbe puis soustraire la valeur de l'intégrale de la fonction 2 à la fonction 1.

La méthode des trapèzes revient à estimer l'intégrale d'une fonction comme l'intégrale de son interpolation linéaire par intervalles.

$$\begin{aligned}
 EE_{MtCO_2e} &= \int_a^b f_{SC1}(x) dx - \int_a^b f_{SC2}(x) dx = \\
 &= \frac{b-a}{n} \left(\frac{f_{SC1}(a) + f_{SC1}(b)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} f \left(a + k \frac{b-a}{n} \right) \right) + R_n(f_{SC1}) - \\
 &= \frac{b-a}{n} \left(\frac{f_{SC2}(a) + f_{SC2}(b)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} f \left(a + k \frac{b-a}{n} \right) \right) + R_n(f_{SC2}) \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

Le potentiel de réduction des émissions pour la catégorie 4 Upstream Transportation par l'adoption d'une solution d'éco-conduite est donnée par le résultat du calcul suivant :

$$EE_{MtCO_2e} = \int_a^b f_{SC1}(x) dx - \int_a^b f_{SC2}(x) dx = 67.22 \text{ Mt CO}_2 \text{ e} \quad (3.18)$$

3.7.2 Nature de l'usage d'une solution décarbonnée

Certaines activités sont destinées à réduire les émissions d'usages d'activités très carbonées. Par exemple, certaines entreprises proposent des services d'entretien des véhicules thermiques qui permettent d'allonger la durée de vie des véhicules et parfois de réduire leur consommation. Une telle activité permet de réduire les émissions sur la chaîne de valeur, et peut donc donner le droit à des émissions évitées pour l'entreprise qui la réalise. Cependant, il est important de noter qu'une activité qui dépend de l'usage de moteur thermique n'a pas vocation à prospérer sur le long terme dans un monde qui vise le net zéro planétaire. Certaines activités, comme l'éco-conduite en fait partie, ont une utilité sur le court terme pour la baisse des émissions ” mais seront contraintes de se contracter à plus long terme si nous respectons collectivement nos engagements climatiques.” Le graphique ci-dessus illustre les quatre situations pouvant se produire et classe le portefeuille de solution LA, par rapport au contexte et la nature de l'activité :

1. Un produit ou service contribue à un usage bas carbone et évite des émissions ;
2. Un produit ou service contribue à un usage carboné et évite des émissions ;
3. Un produit ou service contribue à un usage carboné et ajoute des émissions ;
4. Un produit ou service contribue à un usage bas-carbone et ajoute des émissions.

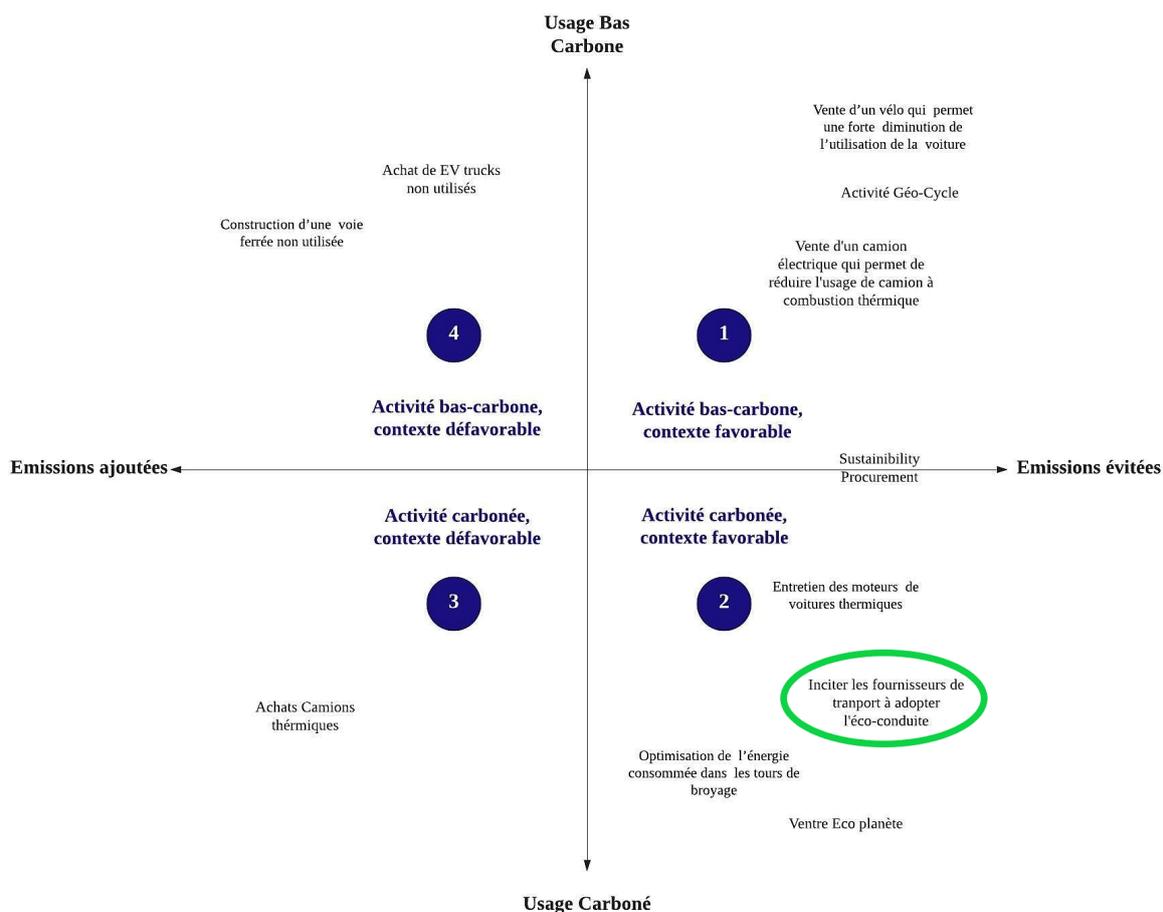


FIG. 3.20 : Illustration de la différence entre effet décarbonant (émissions évitées) et nature décarbonée de l'usage adressé

Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté la démarche suivie, pour la mesure du potentiel de réduction des émissions de la catégorie 4 "Upstream Transportation and Distribution" qui représente pour Holcim "Transportation and distribution services purchased by Holcim to distribute products (outbound logistics), in vehicles and facilities not owned or controlled by Holcim". Par l'implémentation de l'éco-conduite. Après avoir mené plusieurs entretiens avec les transporteurs, les conducteurs et avoir effectué des tests sur l'éco-conduite, nous avons présenté les résultats les plus concluants. Malgré la difficulté de la tâche, nous avons obtenu des résultats satisfaisants, significatifs et surtout exploitables pour se projeter dans un avenir où l'éco-conduite serait adoptée par l'ensemble des fournisseurs de transport de Lafarge Algérie.

Il est évident que l'éco-conduite joue un rôle essentiel dans la réduction de la consommation des véhicules poids lourds, la préservation des ressources énergétiques et la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Bien que la réduction de la consommation

de carburant soit un sujet d'actualité et fasse l'objet de nombreuses recherches depuis plusieurs années, et revêt une importance particulière compte tenu des contraintes économiques croissantes liées aux carburants et des préoccupations écologiques.

Cependant, malgré la nécessité de réduire la consommation énergétique des véhicules, d'autres facteurs dissuadent les acteurs du secteur des transports d'accorder une plus grande importance à cette question, nous pouvons en citer quelques uns :

- Les véhicules de transport professionnels doivent optimiser leur charge utile ;
- Le respect des délais de livraison exerce une influence sur l'état d'esprit du conducteur et donc sur son style de conduite ;
- Certains acteurs du transport montrent peu d'intérêt pour les questions environnementales ;
- Les transporteurs, en particulier les plus expérimentés, sont réticents au changement et ont adopté les mêmes pratiques de conduite depuis des années ;
- Le faible coût du carburant en Algérie n'incite pas les transporteurs à mettre en œuvre des mesures efficaces de réduction de la consommation, car ils ne perçoivent pas suffisamment d'intérêt économique pour s'emparer de cette question.

C'est à cet effet, que nous pensons que l'éco-conduite peut être une solution faisable, réalisable, garantissant des résultats, à l'unique condition que les transporteurs y voit un intérêt et une rentabilité économique. Il serait donc intéressant de se pencher sur l'effet d'un éventuel de l'éco-conduite sur l'amortissement des véhicules et la réduction du coût de transport. Et ce dans le but de faire adopter cette proposition plus facilement que ça soit par les transporteurs ou par les conducteurs, il serait donc également nécessaire de mettre en place des primes de rendement qui prennent en compte la qualité de la conduite d'un point de vue efficacité énergétique.

Conclusion et perspectives

La décarbonisation de la logistique de transport constitue un enjeu crucial pour la transition bas carbone et l'intégration des enjeux climatiques dans les stratégies des acteurs clés de l'industrie, en particulier celles qui émettent le plus de GES. Dans ce contexte, il est primordial de calculer et de quantifier de manière précise les émissions de gaz à effet de serre et relever fidèlement les chiffres lors de l'établissement du bilan carbone de l'entreprise concernée. Afin d'éviter toute sous-estimation ou surestimation, il est important de se référer aux bons cadre méthodologique et d'adopter les méthodes de calcul appropriées. Une évaluation rigoureuse permet de prendre des décisions éclairées et de mettre en place des stratégies efficaces pour réduire l'empreinte carbone.

Lorsque nous examinons les perspectives d'avenir, il est encourageant de constater que de nombreuses alternatives aux énergies fossiles émergent dans le domaine du transport de marchandises. Bien que la question des énergies fossiles soit névralgique en Algérie, et que le coût du carburant soit abordable, ce qui dissuade les acteurs du marché local de questionner leurs rapports à la consommation de carburants fossiles, il serait néanmoins intéressant de se pencher sur l'étude d'autres alternatives comme les biocarburants ou encore l'électrique, que ça soit en terme de rendement énergétique, de réduction des émissions CO_2 et de sécurisation des approvisionnements dans un pays qui fonctionne essentiellement grâce à une énergie qui est en quantité limitée.

L'utilisation de modes de transport plus durables offrent des solutions prometteuses. Cependant, il est important de souligner que la transition vers ces alternatives ne se fera pas du jour au lendemain. Elle nécessite une approche globale, systémique et l'adoption de plusieurs leviers d'action complémentaires.

L'éco-conduite permet en effet une réduction intéressante des émissions comme nous avons pu le voir dans ce chapitre, ce potentiel de réduction peut être plus importante, si l'accompagnement, le sérieux et les moyens de contrôle, de formation et de gestion de la résistance au changement sont au rendez vous.

Néanmoins une décarbonisation plus efficace nécessite plus d'investissements et la mise en place de plusieurs initiatives, conjointement. Autrement dit, la décarbonisation de la logistique de transport ne peut pas reposer uniquement sur une seule solution. L'éco-conduite, par exemple, représente une approche intelligente et à faible coût, bénéfique à la fois pour l'entreprise et ses fournisseurs de services de transport. Cela permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi de réaliser des économies substantielles sur les coûts de transport. Cependant, pour obtenir des résultats

Conclusion et Perspectives

pertinents et durables, il est essentiel de combiner l'éco-conduite avec d'autres actions telles que l'optimisation des itinéraires, l'utilisation de véhicules plus efficaces sur le plan énergétique et l'amélioration de l'efficacité globale des opérations logistiques.

Bibliographie

- [1] *Vulnérabilité environnementale (PVCCI)*. 2020.
- [2] *HOLCIM Accelerating Green Growth*. <https://annual-report.lafargeholcim.com/2021/home>.
- [3] *HOLCIM Integrated Annual Report 2021*. <https://annual-report.lafargeholcim.com/2021/home>.
- [4] Joëlle MORANA. “L’Utilisation D’Indicateurs Logistiques : Une Etude Exploratoire Via Le Modele Scor”. In : *Logistique et Management* à paraître (2009).
- [5] Jean-Yves ROSSIGNOL. *Impact climatique des activités*. ISTE Group, 2019.
- [6] *Our World In DATA*. 2020.
- [7] *NET ZERO INITIATIVE Le Guide Pilier B Calculer et valoriser ses émissions évitées*. <https://www.carbone4.com/>.
- [8] ADEME. “GUIDE DES FACTEURS D’EMISSIONS Version 6.1 Calcul des facteurs d’émissions”. In : *Bilan Carbone Entreprises et collectivités* (2010).
- [9] Samuel LE FEON. “Evaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France - Approche par Analyse de Cycle de Vie”. Thèse de doct. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2014.
- [10] Michel SAVY. *Le transport de marchandises*. Groupe Eyrolles, 2007.
- [11] SAUVANT KARL, MENDOZA KRISTIN et INCE IRMAK. *The Rise of Transnational Corporations from Emerging Markets*. Edward Elgar Publishing, 2008.
- [12] Armand ALBERGEL et al. “Mise en place d’une méthodologie pour un bilan environnemental physique du transport de marchandises en ville”. In : *Consommation-Emissions-Qualité de l’air* 88 (2006).
- [13] Léo GERVILLE-RÉACHE, Vincent COUALLIER et Nicolas PARIS. “ECHANTILLON REPRESENTATIF (D’UNE POPULATION FINIE) : DEFINITION STATISTIQUE ET PROPRIETES”. In : (déc. 2011).
- [14] Alvaro PIRES et al. “Échantillonnage et recherche qualitative : essai théorique et méthodologique”. In : *La recherche qualitative. Enjeux épistémologiques et méthodologiques* 169 (1997), p. 113.
- [15] Batta MAHESH. “Machine learning algorithms-a review”. In : *International Journal of Science and Research (IJSR).[Internet]* 9.1 (2020), p. 381-386.
- [16] Philippe BESSE. “DATA Mining II. Modélisation Statistique et Apprentissage”. In : *Publications du laboratoire de statistique et probabilité* (2005), p. 103.

Bibliographie

- [17] Roman TIMOFEEV. “Classification and Regression Trees (CART) Theory and Applications”. Thèse de doct. Humboldt University, Berlin, 2004.
- [18] Lior ROKACH et Oded MAIMON. “Data mining with decision trees. Theory and applications”. In : *Mach Percept Artif Intell* 69 (jan. 2008).
- [19] *GHG Protocol - Chapter 4: Upstream Transportation and Distribution*. <https://ghg-protocol..>
- [20] Salvatore LA DELFA. “SECAAC : Système d’Eco-Conduite Auto-Adaptatif au Conducteur”. Thèse de doct. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2017.
- [21] Kévin MARIETTE. “Contrôle en boucle fermée pour la réduction active de traînée aérodynamique des véhicules”. Thèse de doct. Université de Lyon, 2020.
- [22] Marie-Pier TRÉPANIÉ et Leandro C COELHO. *Facteurs et méthodes de calcul d’émissions de gaz à effet de serre*. CIRRELT, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, 2017.
- [23] Anne BORTOLI. “POUR UN ENTRETIEN ROUTIER DURABLE”. Thèse de doct. Ecole des Ponts ParisTech, 2018.
- [24] Djavid AJAR, Clément DASSA et Hélène GOUGEON. “L’échantillonnage et le problème de la validité externe de la recherche en éducation”. In : *Revue des sciences de l’éducation* 9.1 (1983), p. 3-21.
- [25] Cindie ANDRIEU. *Analyse statistique d’une expérience d’étude de l’éco-conduite : vers la conception d’un « éco index »*. 2009.

Annexes

.1 Facteurs d'émissions

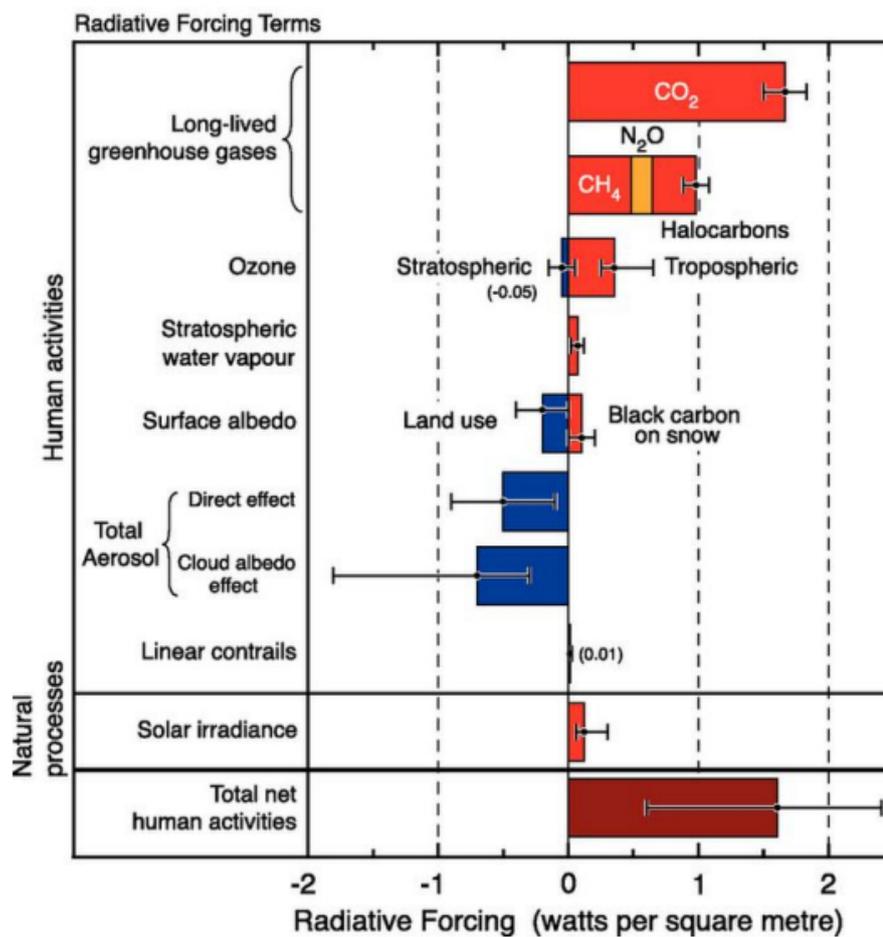


FIG. 21 : Les contributions relatives des différentes causes du forçage radiatif entre 1750 et 2005

.2 Estimation des features du modèle K-means

.2.1 Répartition du parc national automobile

Wilaya	Véhicule Tourisme	Camion	Camionnette	Autocars/Autobus	Tracteur/Routier	Tracteur Agricole	Véhicules Spécial	Remorque	Moto	TOTAL
Wilaya d'Adrar *	14 482	4 585	10 275	900	1 154	1 481	455	1 448	843	35 623
Wilaya de Chlef	77 079	8 956	32 696	4 096	2 243	6 358	263	6 413	3 218	141 322
Wilaya de Laghouat	18 690	3 700	5 476	811	787	1 597	248	1 248	569	33 126
Wilaya d'Oum El Bouaghi	35 310	4 579	11 714	629	887	2 321	159	1 684	1 709	58 992
Wilaya de Batna	109 329	15 797	31 489	1 899	3 728	5 452	382	8 758	3 450	180 284
Wilaya de Béjaïa	120 994	16 855	41 988	4 464	4 748	4 144	281	7 694	6 724	207 892
Wilaya de Biskra *	47 998	7 566	22 549	1 222	1 405	2 413	179	2 300	4 148	89 780
Wilaya de Béchar *	14 709	3 395	5 416	595	540	515	39	733	432	26 374
Wilaya de Blida	227 096	20 052	72 837	3 843	1 854	3 755	122	3 038	18 678	361 275
Wilaya de Bouira	59 102	9 781	22 463	1 484	1 992	5 671	103	6 079	1 705	108 390
Wilaya de Tamourasset *	9 264	2 957	8 306	285	625	297	14	618	203	22 669
Wilaya de Tébessa	57 423	6 290	14 364	749	1 205	2 289	94	1 831	864	85 109
Wilaya de Tlemcen	101 301	10 182	29 471	1 533	1 436	7 388	89	1 814	2 832	156 046
Wilaya de Tiaret	38 904	8 818	15 595	705	1 327	5 375	37	1 473	704	72 938
Wilaya de Tizi Ouzou	137 135	13 449	43 337	5 212	2 535	4 151	108	6 034	1 657	213 618
Wilaya d'Alger	1 274 996	76 596	239 568	22 268	20 726	3 738	1 861	24 013	25 476	1 689 242
Wilaya de Djelfa	41 057	9 281	18 184	502	882	4 040	26	2 092	1 704	77 768
Wilaya de Jijel	48 996	6 287	16 456	1 524	1 178	1 809	23	1 680	2 617	80 570
Wilaya de Sétif	100 516	9 808	40 397	1 567	2 035	4 772	127	3 683	13 826	176 731
Wilaya de Saïda	29 281	5 817	11 424	611	516	4 692	8	1 803	690	54 842
Wilaya de Skikda	84 583	6 490	22 803	1 571	1 258	6 149	60	4 877	2 167	129 958
Wilaya de Sidi Bel Abbès	54 523	6 697	16 957	1 001	896	5 795	49	1 519	1 345	88 782
Wilaya d'Annaba	155 851	6 528	24 796	1 940	1 629	3 183	184	2 808	3 697	200 616
Wilaya de Guelma	36 667	3 247	9 009	732	473	4 019	17	3 656	2 291	60 111
Wilaya de Constantine	165 545	13 532	37 678	2 423	1 874	5 090	341	2 853	2 185	231 521
Wilaya de Média	52 091	10 460	29 853	1 151	1 603	7 700	4	7 333	2 323	112 518
Wilaya de Mostaganem	63 282	9 718	27 077	1 436	1 184	6 178	90	2 350	1 199	112 514
Wilaya de M'Sila	53 883	9 042	23 802	1 069	5 546	4 468	717	7 583	1 959	108 069
Wilaya de Mascara	45 856	10 544	24 414	814	717	6 482	31	1 522	825	91 205
Wilaya de Ouargla *	51 813	8 666	22 476	1 706	3 537	886	361	3 760	1 064	94 269
Wilaya d'Oran	249 561	13 730	48 660	5 500	3 760	2 884	48	3 297	4 525	331 965
Wilaya d'El Bayadh	10 233	4 645	6 699	361	263	1 654	32	399	744	25 030
Wilaya d'Ilizi *	3 550	1 370	2 510	224	190	119	135	275	25	8 398
Wilaya de Bordj Bou Arreridj	61 899	7 630	21 666	789	1 813	3 993	93	4 253	2 742	104 878
Wilaya de Boumerdes	98 726	15 796	42 488	3 817	3 075	4 702	132	5 744	3 480	177 960
Wilaya d'El Tarf	36 577	2 741	9 691	634	368	3 729	9	1 592	693	56 034
Wilaya de Tindouf	1 608	833	1 283	54	251	71	6	227	14	4 347
Wilaya de Tissemsilt	16 535	2 446	7 730	308	226	2 289	3	802	281	30 620
Wilaya d'El Oued *	33 338	2 867	15 001	695	853	1 284	73	1 897	2 127	58 135
Wilaya de Khenchela	26 600	2 707	9 290	403	409	2 209	38	1 016	434	43 106
Wilaya de Souk Ahras	22 287	1 434	5 360	369	200	1 832	17	803	1 641	33 943
Wilaya de Tipaza	95 750	7 215	30 030	2 264	933	1 932	32	2 856	4 324	145 336
Wilaya de Mila	47 989	5 598	16 645	867	1 027	2 715	43	1 725	1 532	78 141
Wilaya d'Ain Defla	34 252	5 060	15 656	727	546	4 156	21	2 465	1 844	64 727
Wilaya de Naâma	8 260	4 550	4 052	208	339	360	25	430	210	18 434
Wilaya d'Aïn Témouchent	28 581	3 051	9 619	577	611	3 286	17	884	493	47 119
Wilaya de Ghardaïa *	20 664	5 634	12 846	740	1 097	662	69	1 090	1 926	44 728
Wilaya de Relizane	26 875	4 707	12 456	679	688	4 392	28	1 791	1 641	53 257
TOTAL	4 151 041	421 689	1 204 552	87 968	87 169	164 477	7 293	154 243	139 780	6 418 212

FIG. 22 : Répartition du parc national automobile selon le genre et la Wilaya-2018 (ONS)

Wilaya	Véhicule Tourisme	Camion	Camionnette	Autocar Autobus	Tracteur Routier	Tracteur Agricole	Véhicule Spécial	Remorque	Moto	TOTAL
Wilaya d'Adrar *	5 113	815	1 540	87	324	65	14	198	687	8 843
Wilaya de Chlef	11 763	613	2 707	195	151	329	11	188	2 030	17 987
Wilaya de Laghouat	17 705	1 006	4 804	312	172	344	58	193	676	25 270
Wilaya d'Oum El Bouaghi	15 886	954	3 718	215	178	376	44	178	973	22 522
Wilaya de Batna	30 710	3 005	7 184	450	815	375	104	793	2 405	45 841
Wilaya de Béjaïa	30 728	1 519	7 606	891	577	324	20	602	6 415	48 682
Wilaya de Biskra *	10 261	935	4 152	170	183	119	24	188	4 391	20 423
Wilaya de Bécharr *	10 684	767	2 974	241	380	48	10	374	946	16 424
Wilaya de Blida	79 312	2 078	16 469	850	558	333	34	445	18 152	118 231
Wilaya de Bouïra	25 792	1 179	6 132	395	282	491	38	351	1 674	36 334
Wilaya de Tamansrasset *	8 134	1 365	3 339	74	368	27	8	332	210	13 857
Wilaya de Tébessa	19 736	1 108	3 711	138	223	492	16	179	990	26 593
Wilaya de Tlemcen	23 352	680	3 734	191	134	489	13	240	3 909	32 742
Wilaya de Tiaret	25 366	1 732	6 158	269	124	848	14	222	1 018	35 751
Wilaya de Tizi Ouzou	19 257	1 059	4 459	420	194	246	43	308	1 173	27 159
Wilaya d'Alger	154 118	3 597	23 667	1 255	1 512	357	228	1 269	12 847	198 850
Wilaya de Djelfa	40 921	4 379	12 922	464	364	1 096	58	341	3 206	63 751
Wilaya de Jijel	21 828	1 380	5 154	514	189	126	18	245	3 292	32 746
Wilaya de Sétif	34 540	2 396	10 548	552	728	525	48	651	5 738	55 726
Wilaya de Saïda	21 281	1 028	4 117	144	133	549	25	236	1 153	28 666
Wilaya de Skikda	27 005	949	5 439	386	209	673	32	518	2 262	37 473
Wilaya de Sidi Bel Abbès	33 152	1 124	4 986	218	247	923	21	270	1 595	42 536
Wilaya d'Annaba	35 039	497	3 971	343	257	236	19	280	2 442	43 084
Wilaya de Guelma	15 759	568	2 984	190	128	469	7	253	1 960	22 318
Wilaya de Constantine	58 305	1 084	9 081	510	247	446	57	304	1 822	71 856
Wilaya de Médéa	26 661	1 428	8 099	497	220	477	11	247	2 298	39 938
Wilaya de Mostaganem	19 084	1 168	4 744	104	188	493	16	220	1 474	27 491
Wilaya de M'Sila	36 151	3 859	11 686	430	2 020	893	94	1 507	3 250	59 890
Wilaya de Mascara	20 518	1 542	5 073	239	134	484	21	209	952	29 172
Wilaya de Ouargla *	27 384	2 287	10 844	693	1 096	290	338	1 079	1 992	46 003
Wilaya d'Oran	41 416	1 285	6 210	517	425	211	23	413	4 148	54 648
Wilaya d'El Bayadh	5 063	714	1 842	76	33	197	8	43	927	8 903
Wilaya d'Illizi *	1 445	259	470	39	39	48	7	33	41	2 381
Wilaya de Borçj Bou Arrendj	30 301	1 291	9 200	366	816	412	41	806	3 329	46 562
Wilaya de Boumardès	32 426	2 054	9 018	691	710	541	41	547	3 752	49 780
Wilaya d'El Tarf	16 990	340	2 565	146	76	324	8	227	847	21 523
Wilaya de Tindouf	775	76	274	16	33	2	8	24	41	1 249
Wilaya de Tissemsilt	17 469	655	3 125	92	67	328	15	115	577	22 443
Wilaya d'El Oued *	19 127	1 936	10 239	317	499	142	38	493	2 052	34 843
Wilaya de Khenchela	17 283	690	4 216	165	112	378	43	151	658	23 696
Wilaya de Souk Ahras	16 509	481	2 565	185	82	482	14	177	1 628	22 123
Wilaya de Tipaza	37 666	546	7 191	237	140	248	9	149	5 477	51 663
Wilaya de Mila	21 810	798	5 384	240	202	378	18	190	1 464	30 484
Wilaya d'Aïn Defla	11 697	602	2 996	190	81	346	8	148	2 001	18 069
Wilaya de Naâma	5 285	681	1 246	53	81	55	8	79	417	7 905
Wilaya d'Aïn Temouchent	22 742	535	4 522	109	138	405	8	203	1 270	29 932
Wilaya de Ghardaïa *	10 821	986	4 333	289	270	52	14	295	3 080	20 140
Wilaya de Relizane	18 885	1 133	4 718	185	187	657	6	287	2 319	28 377
TOTAL	1 233 255	61 163	282 116	15 350	16 326	18 149	1 761	16 800	125 960	1 770 880

FIG. 23 : Répartition du parc national automobile selon le genre et la Wilaya-2019 (ONS)

2.2 Tableau relatif à l'évaluation de la vitesse moyenne de circulation par Wilaya

Wilaya	Km autoroute	Km Route Nationale	Km Route Wilayale	Km Route Communale	Kilométrage Total	Vitesse Moyenne (km/h)	Capacité de Saturation
Wilaya d'Adrar *	0	1300	1745	991	4036	49.66303271	24663.03271
Wilaya de Chlef	52.7	304	560	2371	3287.7	43.41515345	18575.44788
Wilaya de Laghouat	0	403	394	513	1310	49.22900763	24229.00763
Wilaya d'Oum El Bouaghi	0	489	338	1076	1903	47.70888071	22708.88071
Wilaya de Batna	160	804	650	1718	3332	49.15966387	24639.85594
Wilaya de Béjaïa	37.7	444	659	3200	4340.7	43.41603889	18502.89124
Wilaya de Biskra *	0	798	2020	4094	6912	43.46354167	18463.54167
Wilaya de Bêchar *	0	721	2313.1	3226.6	6260.7	43.45488524	18454.88524
Wilaya de Bîda	59.14	263	295	695	1312.14	47.81593428	23266.64838
Wilaya de Bouira	136.8	457	700	1807	3100.8	46.18614551	21627.32198
Wilaya de Tamanrasset *	0	1540	2464	1447	5451	48.47550908	23475.50908
Wilaya de Tébessa	0	565	418	1625	2608	46.49923313	21499.23313
Wilaya de Tiemcen	97	765	1189	2134	4185	46.41099164	21642.7718
Wilaya de Tizet	0	646	684	876	2206	48.78513146	23785.13146
Wilaya de Tizi Ouzou	12.3	605	652	3548	4817.3	43.86980259	18895.33556
Wilaya d'Alger	160.4	563	254	1547	2524.4	49.23229282	24867.69133
Wilaya de Djelfa	0	1011	446	820	2277	53.3201581	28320.1581
Wilaya de Jijel	0	204	534	1018	1756	43.48519362	18485.19362
Wilaya de Sétif	72.6	634	689	2162	3557.6	46.16258152	21366.65168
Wilaya de Saïda	0	402	616	698	1716	47.02797203	22027.97203
Wilaya de Skikda	68.3	327	603	1657	2655.3	44.72338342	19980.60483
Wilaya de Sidi Bel Abbès	70	562	548	443	1623	52.1133703	27544.67036
Wilaya d'Annaba	69.9	131	318	234	752.9	48.9334573	24861.86745
Wilaya de Guelma	0	299	421	1550	2270	43.95154185	18951.54185
Wilaya de Constantine	100	731	813	2448	4092	46.33675464	21581.13392
Wilaya de Médéa	15	332	654	1200	2201	44.79781917	19865.97001
Wilaya de Mostaganem	0	924	809	2300	4033	46.87329531	21873.29531
Wilaya de M'Sila	0	924	809	2300	4033	46.87329531	21873.29531
Wilaya de Mascara	71	566	670	1548	2855	46.94220665	22190.89317
Wilaya de Ouargla *	0	521	1020	1838	3379	44.62562888	19625.62888
Wilaya d'Oran	84	1484	364	209	2141	62.3633816	37755.72163
Wilaya d'El Bayadh	0	843	62	717	1622	55.5918619	30591.8619
Wilaya d'Illizi *	0	935	1554	3729	6218	44.51109682	19511.09682
Wilaya de Bordj Bou Arreridj	96.3	304	297	1896	2593.3	45.00212085	20373.46238
Wilaya de Boumerdes	28.6	282	384	990	1684.6	45.70105663	20870.82987
Wilaya d'El Tarf	0	298	287	968	1553	45.75660013	20756.60013
Wilaya de Tindouf	0	1107	151	132	1390	63.89208633	38892.08633
Wilaya de Tissemsilt	0	215	500	1038	1753	43.67940673	18679.40673
Wilaya d'El Oued *	0	585	259	656	1500	51.7	26700
Wilaya de Khenchela	0	282	743	875	1900	44.45263158	19452.63158
Wilaya de Souk Ahras	0	452	202	1709	2363	45.73846805	20738.46805
Wilaya de Tipaza	99	246	265	781	1391	48.15240834	23864.12653
Wilaya de Mila	52.5	364	264	1890	2570.5	45.06516242	20269.40284
Wilaya d'Aïn Defla	103	384	721	1899	3107	45.03379466	20365.30413
Wilaya de Naâma	0	498	376	1565	2439	46.12546125	21125.46125
Wilaya d'Aïn Temouchent	0	328	235	570	1133	48.68490733	23684.90733
Wilaya de Ghardaïa *	0	1348	2043	4220	7611	45.31336224	20313.36224
Wilaya de Relizane	87.6	321	488	1800	2696.6	44.87057776	20195.43128

FIG. 24 : Kilométrage de chaque type de route et vitesse moyenne de circulation par Wilaya

2.3 Résultat de l'approche de calcul de la vitesse moyenne de circulation et des niveaux de services par Wilaya

Wilaya	UVP Total en circulation	Vitesse Moyenne (km/h)	Kilométrage Total	UVP en circulation/jour	Capacité de Saturation	V/C	LOS	Vitesse-Trafic (km/h)	Vitesse estimée (km/h)
Wilaya d'Adrar *	17566.66667	49.66303271	4036	5187.793506	24669.09271	0.210346842	A	80	64.83151635
Wilaya de Chlef	58641	43.41515345	3287.7	18584.96588	18575.44788	1.000512397	F	15	29.20757673
Wilaya de Laghouat	21996.66667	49.22900763	1310	19838.91428	24229.00763	0.818808371	C	50	49.61450382
Wilaya d'Oran El Bouaghi	29998	47.70888071	1903	18049.45039	22708.88071	0.794819023	B	60	53.85444036
Wilaya de Bama	82860.33333	49.15966387	3332	29340.11621	24639.85594	1.190759432	F	15	32.07983193
Wilaya de Béjaia	94033.66667	43.41603889	4340.7	22572.77948	18502.89124	1.219959583	F	15	29.20801944
Wilaya de Biskra *	40643.66667	43.46354167	6912	6133.742013	18465.54167	0.332208312	A	80	61.73177083
Wilaya de Béchar *	16073.66667	43.45488524	6260.7	2677.576656	18454.88524	0.145087889	A	80	61.72744262
Wilaya de Blida	166900.6667	47.81593428	1312.14	145619.5516	23266.64838	6.258724902	F	15	31.40796714
Wilaya de Bouira	53240	46.18614551	3100.8	19032.12374	21627.32198	0.880003717	D	40	43.09307276
Wilaya de Tamazasset *	13832	48.47550908	5451	2952.177178	23475.50908	0.125755619	A	80	64.23775454
Wilaya de Tébessa	40765.33333	46.48923313	2608	17443.77366	21499.23313	0.81136725	C	50	48.24961656
Wilaya de Tlemcen	69623	46.41099164	4185	18530.59481	21642.7718	0.856202476	D	40	43.20549582
Wilaya de Tiaret	42081	48.78513146	2206	22334.65585	23785.13146	0.939017549	E	25	36.89256373
Wilaya de Tizi Ouzou	87284	43.86980259	4817.3	19076.90291	18895.33556	1.006609109	F	15	29.43490129
Wilaya d'Alger	664982.6667	49.2329282	2524.4	311252.9365	24867.49133	12.51635837	F	15	32.11614641
Wilaya de Djelfa	53392.66667	53.3201581	2277	30006.90833	28320.1581	1.059560057	F	15	34.16007905
Wilaya de Jijel	41479.66667	43.48519362	1756	24652.63785	18485.19362	1.336642393	F	15	29.24259681
Wilaya de Saïf	83560.33333	46.16258152	3557.6	26022.22194	21366.65168	1.217889557	F	15	30.8129076
Wilaya de Saïda	31664	47.02797203	1716	20826.4854	22027.97203	0.945456321	E	25	36.01398601
Wilaya de Sikkda	59937.66667	44.72338342	2655.3	24228.81254	19980.60483	1.212616573	F	15	29.86169171
Wilaya de Sidi Bel Abbès	48833.33333	52.1133703	1623	37632.08256	27544.67036	1.366220109	F	15	33.55668515
Wilaya d'Annaba	85142.66667	48.9934573	752.9	132808.8738	24861.86745	5.341870398	F	15	31.96672865
Wilaya de Guelma	29456.66667	43.95154185	2270	13688.09781	18951.54185	0.722268294	B	60	51.97577093
Wilaya de Constantine	108608	46.33675464	4092	29516.37682	21581.13392	1.367693511	F	15	30.68837732
Wilaya de Média	56142.33333	44.79781917	2201	27424.4881	19865.97001	1.380475662	F	15	29.89890959
Wilaya de Mostaganem	52670	46.87329531	4033	14691.69232	21873.29531	0.671672563	B	60	53.43664766
Wilaya de M'Sila	62335.66667	46.87329531	4033	17387.81917	21873.29531	0.794933681	B	60	53.43664766
Wilaya de Mascara	46551.33333	46.94220665	2855	18369.64463	22190.89317	0.827801048	C	50	48.47110333
Wilaya de Ouargla *	51764.33333	44.62562888	3379	16407.33421	19625.62888	0.836015717	C	50	47.31281444
Wilaya d'Oran	137095.3333	62.3633816	2141	95840.02154	37755.72163	2.538423778	F	15	38.6816908
Wilaya d'El Bayadh	13824.66667	55.5918619	1622	11371.72321	30591.8619	0.371723802	A	80	67.79593095
Wilaya d'Illizi *	4300.333333	44.51109682	6218	738.8068961	19511.09682	0.037865985	A	80	62.25554841
Wilaya de Bordj Bou Arreridj	54541.66667	45.00212085	2593.3	22715.37277	20373.46238	1.114949062	F	15	30.00106042
Wilaya de Boumerdes	84336	45.70105663	1684.6	54910.28344	20870.82987	2.630958318	F	15	30.5052832
Wilaya d'El Tarf	28037.66667	45.75660013	1553	19826.01369	20756.60013	0.955166721	E	25	35.37830006
Wilaya de Tindouf	2231.666667	63.89208633	1390	2461.913773	38892.08633	0.06330115	A	80	71.94604317
Wilaya de Tissemsilt	19525	43.67940673	1753	11676.081	18679.40673	0.625077722	B	60	51.83970337
Wilaya d'El Oued *	33097.33333	51.7	1500	27378.11413	26700	1.025397533	F	15	33.35
Wilaya de Khemchela	24263	44.45263158	1900	13623.84253	19452.63158	0.70035987	B	60	52.23631579
Wilaya de Souk Ahras	20060.66667	45.73846805	2363	9319.111245	20738.46805	0.449363532	A	80	62.69234402
Wilaya de Tipaza	69183.33333	48.15240834	1391	57478.25939	23864.12653	2.408563302	F	15	31.57620417
Wilaya de Mila	39532	45.06516242	2570.5	16633.48921	20249.40284	0.820620585	C	50	47.53258121
Wilaya d'Aïn Defla	30640	45.03379466	3107	10658.52953	20365.30415	0.523367068	A	80	62.51689733
Wilaya de Naâma	10730	46.12546125	2439	4870.122502	21125.46125	0.23053331	A	80	63.04273063
Wilaya d'Aïn Témouchent	28233.66667	48.69490733	1133	29116.75485	23684.90733	1.229337905	F	15	31.84245366
Wilaya de Ghardaïa *	24432	45.31336224	7611	3491.04002	20313.36224	0.17183929	A	80	62.65668112
Wilaya de Relizane	30739.33333	44.87057776	2696.6	12275.82864	20195.48128	0.80785177	B	60	52.43528888

FIG. 25 : Features du modèle K-means

3 Clustering

3.1 Présentation du langage de programmation Python

Python est un langage de programmation le plus utilisé dans le domaine du big data et du machine learning, il dispose d'une multitude de bibliothèques et de méthodes pré-définies qui permettent d'élaborer des programmes de machine learning et de traitement de données d'une manière très efficace, parmi les utilisations du langage de " Python est un langage de programmation interprété, interactif, orienté objet et de haut niveau. Il est conçu pour être simple et lisible, tout en offrant une grande puissance et une grande flexibilité. Il combine une syntaxe claire et une approche basée sur les objets. "

.3.2 Bibliothèques python au service du machine learning

Une bibliothèque python est un ensemble de Fonctions, classes, objets, constantes etc. prédéfinis ajoutant plus de possibilités aux utilisateurs dans la manipulation des données, parmi ces bibliothèques nous citons celles qui sont les plus utilisés dans la machine learning :

- Numpy : Conçue afin de gérer les matrices et tableaux multidimensionnels ainsi que les différentes fonctions qui s'exécutent sur ces tableaux. Numpy permet aussi de créer et d'enregistrer des tableaux directement sur des fichiers, manipuler des vecteurs, matrices et polynômes.
- Pandas : Bibliothèque python open source, elle permet d'effectuer des calculs sur des tableaux de données numérique et sur des séries temporelles et cela à travers des méthodes mathématiques et statistiques prédéfinies sur la bibliothèque.
- Matplotlib : Matplotlib est une bibliothèque utilisée pour tracer et visualiser des données sous forme de graphiques. Il peut être utilisé en conjonction avec les bibliothèques de calcul scientifique Python comme NumPy.
- Scikit-learn : C'est une bibliothèque contenant une multitude d'algorithmes d'apprentissage pré-définies qui ont été développés par de nombreuses personnes issues du monde académique.
- Seaborn : Elle permet de visualiser des données à travers des graphiques pré-implémentés, seaborn a été développé en se basant sur la bibliothèque matplotlib.

.3.3 Intégration des données

Lors de cette première étape, nous avons tout d'abord établi une connexion entre notre source de données et Jupyter Notebook permettant d'exporter les données à partir d'une table Excel.

Ensuite, nous avons effectué leur chargement dans notre environnement dans une table, qui sera celle utilisée pour la manipulation. Ci-dessous :

```

Entrée [44]: #Importer les librairies
import warnings
import pandas as pd
import numpy as np
import sklearn
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Ellipse
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn import datasets

Entrée [45]: #Importer les données à partir d'un fichier CSV
data_frame = pd.read_csv('KMeans.csv', sep=';', encoding='latin-1')
data_frame.head()

Out[45]:

```

	Wilaya	UVP Total en circulation	Vitesse Moyenne (Km/h)	Kilométrage Total	UVP en circulation/jour	Capacité de Saturation	V/C	LOS	Vitesse-Trafic (Km/h)	Vitesse estimée (Km/h)
0	Wilaya d'Adrar *	17566.66667	49.663033	4036.0	5187.793506	24663.03271	0.210347	A	80	64.831516
1	Wilaya de Chlef	58641.00000	43.415153	3287.7	18584.965880	18575.44788	1.000512	F	15	29.207577
2	Wilaya de Laghouat	21996.66667	49.229008	1310.0	19838.914280	24229.00763	0.818808	C	50	49.614504
3	Wilaya d'Oum El Bouaghi	29998.00000	47.708881	1903.0	18049.450390	22708.88071	0.794819	B	60	53.854440
4	Wilaya de Batna	82860.33333	49.159664	3332.0	29340.116210	24639.85594	1.190758	F	15	32.079832

```

Entrée [46]: data_frame.info()

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 48 entries, 0 to 47
Data columns (total 10 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  -
0   Wilaya                                48 non-null     object
1   UVP Total en circulation                48 non-null     float64
2   Vitesse Moyenne (Km/h)                 48 non-null     float64
3   Kilométrage Total                     48 non-null     float64
4   UVP en circulation/jour                 48 non-null     float64
5   Capacité de Saturation                  48 non-null     float64
6   V/C                                     48 non-null     float64
7   LOS                                     48 non-null     object
8   Vitesse-Trafic (Km/h)                  48 non-null     int64
9   Vitesse estimée (Km/h)                 48 non-null     float64
dtypes: float64(7), int64(1), object(2)
memory usage: 3.9+ KB

```

FIG. 26 : Intégration des données

3.4 Détermination du nombre optimal de cluster

La Méthode du coude cassé est une heuristique utilisée pour déterminer le nombre de clusters dans un ensemble de données. La méthode consiste à tracer la variation expliquée en fonction du nombre de clusters, et à choisir le coude de la courbe comme nombre de clusters à utiliser.

Nous déterminons graphiquement le nombre optimal de classes à retenir, il s'agit de la valeur correspondante à la cassure (au coude) visualisée dans le graphe d'évolution de l'inertie interclasses en fonction du nombre de classes K :

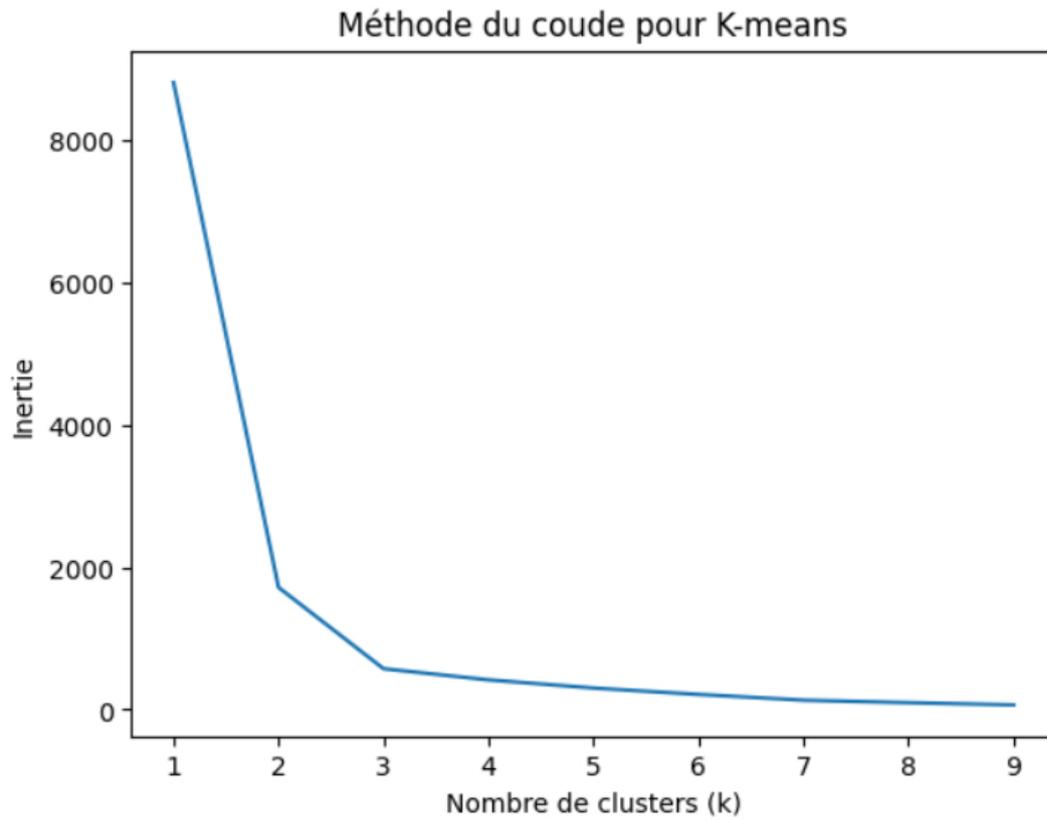


FIG. 27 : Courbe du coude qui casse pour déterminer le nombre optimal de classes

On remarque sur le graphe présente une cassure graduelle qui commence à partir du nombre 1.5 et qui se stabilise à partir du nombre 4.

.3.5 Script de l’algorithme K-means

une visualisation du script correspondant :

Ci-dessous le script de l’algorithme utilisé pour l’implémentation de l’algorithme K-means :

```
Entrée [47]: # Ignorer l'avertissement pour n_init
warnings.filterwarnings("ignore", category=FutureWarning)

#Créez une instance de l'algorithme KMeans avec Le nombre de clusters souhaité
kmeans = KMeans(n_clusters=4, n_init=15)
```

```
Entrée [48]: X = data_frame[['V/C', 'Vitesse estimée (Km/h)']]
# Initialiser une liste pour stocker les valeurs de l'inertie
inertia = []

# Définir la plage de valeurs de k (nombre de clusters)
k_range = range(1, 10)

# Calculer l'inertie pour chaque valeur de k
for k in k_range:
    # Créer un modèle K-means avec Le nombre de clusters k
    kmeans = KMeans(n_clusters=k)
    kmeans.fit(X)
    # Ajouter l'inertie du modèle à la liste
    inertia.append(kmeans.inertia_)

# Tracer la courbe d'inertie en fonction du nombre de clusters
plt.plot(k_range, inertia)
plt.xlabel('Nombre de clusters (k)')
plt.ylabel('Inertie')
plt.title('Méthode du coude pour K-means')
plt.show()
```

```
Entrée [149]: #Sélectionnez les caractéristiques (features) à utiliser pour le clustering
features = data_frame[['V/C', 'Vitesse estimée (Km/h)', 'Vitesse Moyenne (Km/h)', 'Vitesse-Trafic (Km/h)']]
```

```
Entrée [150]: #Créez une instance de l'algorithme KMeans avec Le nombre de clusters souhaité
kmeans = KMeans(n_clusters=4, n_init=10)
```

```
Entrée [151]: #Appliquez l'algorithme KMeans sur les données
kmeans.fit(features)
```

```
Out[151]: KMeans
KMeans(n_clusters=4, n_init=10)
```

```
Entrée [152]: clusters = kmeans.fit_predict(features)
```

```
Entrée [153]: #Obtenir les centroides de chaque cluster
centroids = kmeans.cluster_centers_
```

```
Entrée [154]: #Obtenir les étiquettes de cluster pour chaque échantillon
labels = kmeans.labels_
```

```
Entrée [165]: #Obtenir les écarts types de chaque cluster
# Liste pour stocker les écarts types de chaque cluster
cluster_std = []

# Calcul des écarts types de chaque cluster
for cluster in clusters:
    if isinstance(cluster, (list, np.ndarray)) and len(cluster) > 0:
        cluster_std.append(np.std(cluster))

# Affichage des écarts types de chaque cluster
for i, std in enumerate(cluster_std):
    print(f"Cluster {i+1} - Écart type : {std}")
```

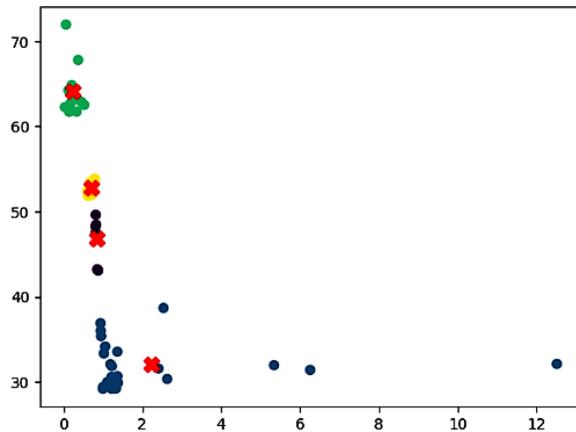
Entrée [166]: #Affichez les centres de cluster et les étiquettes
 print(centroids)
 print(labels)

```
[[ 0.83583131 46.78274113 46.42262512 47.14285714]
 [ 2.22883311 32.06424309 47.82413836 16.30434783]
 [ 0.24194661 64.14832272 48.29664545 80. ]
 [ 0.70242613 52.74354495 45.48708989 60. ]]
[2 1 0 3 1 1 2 2 1 0 2 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 3 3 0 0 1 2 2 1 1 1 2
 3 1 3 2 1 0 2 2 1 2 3]
```

Entrée [192]: #Afficher les écarts types de chaque cluster
 print(cluster_std)

```
[13.163027999759363, 11.77546711213125, 16.666887050884522, 13.158375931050806]
```

Entrée [169]: X = data_frame[['V/C', 'Vitesse estimée (Km/h)', 'Vitesse Moyenne (Km/h)', 'LOS', 'Vitesse-Trafic (Km/h)']
 # Afficher le nuage de points avec des couleurs correspondant aux clusters
 plt.scatter(X['V/C'], X['Vitesse estimée (Km/h)'], c=labels, cmap='viridis')
 # Afficher les centres de cluster avec des marqueurs distincts
 plt.scatter(centroids[:, 0], centroids[:, 1], marker='x', c='red', s=100)
 plt.show()



Entrée [184]: # Les centroids
 centroid = [[0.70242613, 52.74354495, 45.48708989, 60.],
 [2.22883311, 32.06424309, 47.82413836, 16.30434783],
 [0.24194661, 64.14832272, 48.29664545, 80.],
 [0.83583131, 46.78274113, 46.42262512, 47.14285714]]

Les écarts types des clusters
 cluster_std = [13.163027999759363, 11.77546711213125, 16.666887050884522, 13.158375931050806]

Création de la figure et des axes
 fig, ax = plt.subplots()
 X = data_frame[['V/C', 'Vitesse estimée (Km/h)', 'Vitesse Moyenne (Km/h)', 'Vitesse-Trafic (Km/h)']

Afficher le nuage de points avec des couleurs correspondant aux clusters
 plt.scatter(X['V/C'], X['Vitesse estimée (Km/h)'], c=labels, cmap='viridis')

Afficher les centres de cluster avec des marqueurs distincts
 plt.scatter(centroids[:, 0], centroids[:, 1], marker='x', c='red', s=50)

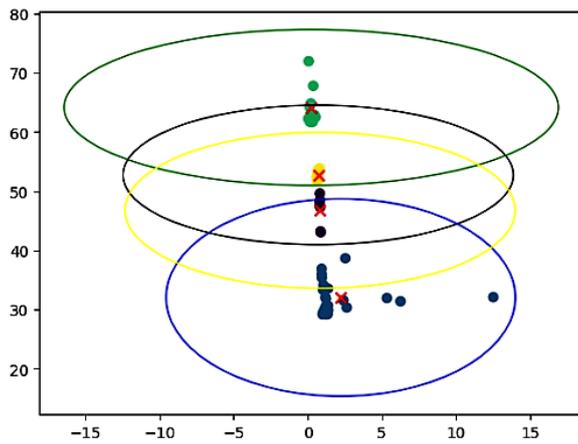
colors = ['black', 'blue', 'green', 'yellow']

Boucle sur les clusters
 for i in range(4):
 # Calcul de la position et de la taille de l'ellipse
 centroid_x = centroid[i][0]
 centroid_y = centroid[i][1]
 ellipse_width = cluster_std[i] * 2
 ellipse_height = cluster_std[i+1] * 2 if i+1 < len(cluster_std) else cluster_std[i] * 2

Création de l'ellipse
 ellipse = Ellipse((centroid_x, centroid_y), width=ellipse_width, height=ellipse_height, edgecolor=colors[i],
 facecolor = 'none', clip_on = False, angle=0)

Ajout de l'ellipse aux axes
 ax.add_patch(ellipse)

Affichage du graphe
 plt.show()



```
Entrée [99]: clusters = [[] for _ in range(4)]

#Assigner chaque point à son cluster correspondant
for i, label in enumerate(labels):
    clusters[label].append(i)

#Obtenir Les éléments appartenant à chaque cluster
for cluster_idx, data_indices in enumerate(clusters):
    cluster_elements = data_frame.iloc[data_indices]
    print("Cluster {}: {}".format(cluster_idx, cluster_elements))
```

Cluster 0:

Wilaya	UVP Total en circulation
0 Wilaya d'Adrar *	17566.666670 \
6 Wilaya de Biskra *	40643.666670
7 Wilaya de Béchar *	16073.666670
10 Wilaya de Tamanrasset *	13832.000000
31 Wilaya d'El Bayadh	13824.666670
32 Wilaya d'Illizi *	4300.333333
36 Wilaya de Tindouf	2231.666667
40 Wilaya de Souk Ahras	20060.666670
43 Wilaya d'Aïn Defla	30640.000000
44 Wilaya de Naâma	10730.000000
46 Wilaya de Ghardaïa *	24432.000000

	Vitesse Moyenne (Km/h)	Kilométrage Total	UVP en circulation/jour
0	49.663033	4036.0	5187.793506 \
6	43.463542	6912.0	6133.742013
7	43.454885	6260.7	2677.576656
10	48.475509	5451.0	2952.177178
31	55.591862	1622.0	11371.723210
32	44.511097	6218.0	738.806896
36	63.892086	1390.0	2461.913773
40	45.738468	2363.0	9319.111245
43	45.033795	3107.0	10658.529530
44	46.125461	2439.0	4870.122502
46	45.313362	7611.0	3491.040020

	Capacité de Saturation	V/C	LOS	Vitesse-Trafic (Km/h)
0	24663.03271	0.210347	A	80 \
6	18463.54167	0.332208	A	80
7	18454.88524	0.145088	A	80
10	23475.50908	0.125756	A	80
31	30591.86190	0.371724	A	80
32	19511.09682	0.037866	A	80
36	38892.08633	0.063301	A	80
40	20738.46805	0.449364	A	80
43	20365.30415	0.523367	A	80

43	20365.30415	0.523367	A	80
44	21125.46125	0.230533	A	80
46	20313.36224	0.171859	A	80

Vitesse estimée (Km/h)	
0	64.831516
6	61.731771
7	61.727443
10	64.237755
31	67.795931
32	62.255548
36	71.946043
40	62.869234
43	62.516897
44	63.062731
46	62.656681

Cluster 1:		Wilaya	UVP	Total en circulation
1	Wilaya de Chlef		58641.00000	\
4	Wilaya de Batna		82860.33333	
5	Wilaya de Béjaïa		94033.66667	
8	Wilaya de Blida		166500.66670	
13	Wilaya de Tiaret		42081.00000	
14	Wilaya de Tizi Ouzou		87284.00000	
15	Wilaya d'Alger		664982.66670	
16	Wilaya de Djelfa		53392.66667	
17	Wilaya de Jijel		41479.66667	
18	Wilaya de Sétif		83560.33333	
19	Wilaya de Saïda		31664.00000	
20	Wilaya de Skikda		59937.66667	
21	Wilaya de Sidi Bel Abbès		48833.33333	
22	Wilaya d'Annaba		85142.66667	
24	Wilaya de Constantine		108608.00000	
25	Wilaya de Médéa		56142.33333	
30	Wilaya d'Oran		137095.33330	
33	Wilaya de Bordj Bou Arreridj		54541.66667	
34	Wilaya de Boumerdès		84336.00000	
35	Wilaya d'El Tarf		28037.66667	
38	Wilaya d'El Oued *		33097.33333	
41	Wilaya de Tipaza		69183.33333	
45	Wilaya d'Aïn Témouchent		28233.66667	

	Vitesse Moyenne (Km/h)	Kilométrage Total	UVP en circulation/jour
1	43.415153	3287.70	18584.96588 \
4	49.159664	3332.00	29340.11621
5	43.416039	4340.70	22572.77948
8	47.815934	1312.14	145619.55160

13	48.785131	2206.00	22334.65585
14	43.869803	4817.30	19076.90291
15	49.232293	2524.40	311252.93650
16	53.320158	2277.00	30006.90833
17	43.485194	1756.00	24652.63785
18	46.162582	3557.60	26022.22194
19	47.027972	1716.00	20826.48540
20	44.723383	2655.30	24228.81254
21	52.113370	1623.00	37632.08256
22	48.933457	752.90	132808.87380
24	46.336755	4092.00	29516.37682
25	44.797819	2201.00	27424.48810
30	62.363382	2141.00	95840.02154
33	45.002121	2593.30	22715.37277
34	45.701057	1684.60	54910.28344
35	45.756600	1553.00	19826.01369
38	51.700000	1500.00	27378.11413
41	48.152408	1391.00	57478.25939
45	48.684907	1133.00	29116.75435

	Capacité de Saturation	V/C	LOS	Vitesse-Trafic (Km/h)
1	18575.44788	1.000512	F	15 \
4	24639.85594	1.190758	F	15
5	18502.89124	1.219960	F	15
8	23266.64838	6.258725	F	15
13	23785.13146	0.939018	E	25
14	18895.33556	1.009609	F	15
15	24867.69133	12.516358	F	15
16	28320.15810	1.059560	F	15
17	18485.19362	1.333642	F	15
18	21366.65168	1.217890	F	15
19	22027.97203	0.945456	E	25
20	19980.60483	1.212617	F	15
21	27544.67036	1.366220	F	15
22	24861.86745	5.341870	F	15
24	21581.13392	1.367694	F	15
25	19865.97001	1.380476	F	15
30	37755.72163	2.538424	F	15
33	20373.46238	1.114949	F	15
34	20870.82987	2.630958	F	15
35	20756.60013	0.955167	E	25
38	26700.00000	1.025398	F	15
41	23864.12653	2.408563	F	15
45	23684.90733	1.229338	F	15

```

Vitesse estimée (Km/h)
1      29.207577
4      32.079832
5      29.208019
8      31.407967
13     36.892566
14     29.434901
15     32.116146
16     34.160079
17     29.242597
18     30.581291
19     36.013986
20     29.861692
21     33.556685
22     31.966729
24     30.668377
25     29.898910
30     38.681691
33     30.001060
34     30.350528
35     35.378300
38     33.350000
41     31.576204
45     31.842454

Cluster 2:
2      Wilaya de Laghouat      21996.66667      49.229008 \
9      Wilaya de Bouïra      53240.00000      46.186146
11     Wilaya de Tébessa      40765.33333      46.499233
12     Wilaya de Tlemcen      69623.00000      46.410992
28     Wilaya de Mascara      46551.33333      46.942207
29     Wilaya de Ouargla *    51764.33333      44.625629
42     Wilaya de Mila         39532.00000      45.065162

Kilométrage Total      UVP en circulation/jour      Capacité de Saturation
2      1310.0      19838.91428      24229.00763 \
9      3100.8      19032.12374      21627.32198
11     2608.0      17443.77366      21499.23313
12     4185.0      18530.59481      21642.77180
28     2855.0      18369.64463      22190.89317
29     3379.0      16407.33421      19625.62888
42     2570.5      16633.48921      20269.40284

V/C LOS      Vitesse-Trafic (Km/h)      Vitesse estimée (Km/h)
2      0.818808      C      50      49.614504
9      0.880004      D      40      43.093073
11     0.811367      C      50      48.249617
12     0.856202      D      40      43.205496

28     0.827801      C      50      48.471103
29     0.836016      C      50      47.312814
42     0.820621      C      50      47.532581

Cluster 3:
3      Wilaya d'Oum El Bouaghi      29998.00000 \
23     Wilaya de Guelma      29456.66667
26     Wilaya de Mostaganem      52670.00000
27     Wilaya de M'Sila      62335.66667
37     Wilaya de Tissemsilt      19525.00000
39     Wilaya de Khenchela      24263.00000
47     Wilaya de Relizane      30739.33333

Vitesse Moyenne (Km/h)      Kilométrage Total      UVP en circulation/jour
3      47.708881      1903.0      18049.45039 \
23     43.951542      2270.0      13688.09781
26     46.873295      4033.0      14691.69232
27     46.873295      4033.0      17387.81917
37     43.679407      1753.0      11676.08100
39     44.452632      1900.0      13623.84253
47     44.870578      2696.6      12275.82864

Capacité de Saturation      V/C LOS      Vitesse-Trafic (Km/h)
3      22708.88071      0.794819      B      60 \
23     18951.54185      0.722268      B      60
26     21873.29531      0.671673      B      60
27     21873.29531      0.794934      B      60
37     18679.40673      0.625078      B      60
39     19452.63158      0.700360      B      60
47     20195.43128      0.607852      B      60

Vitesse estimée (Km/h)
3      53.854440
23     51.975771
26     53.436648
27     53.436648
37     51.839703
39     52.226316
47     52.435289

```

FIG. 28 : Script algorithme K-means

.3.6 Mesure de la qualité de classification

Mesure de qualité de la classification

```
Entrée [44]: import numpy as np

# Obtenir les étiquettes de clusters pour chaque point
predicted_labels = kmeans.labels_
y = predicted_labels

# Obtenir l'inertie intra class
def calculate_intra_class_variance(X, labels):
    unique_labels = np.unique(labels)
    n_labels = len(unique_labels)
    variance = 0.0

    for label in unique_labels:
        points_in_label = X[labels == label]
        centroid = np.mean(points_in_label, axis=0)
        distance_squared = np.sum(np.linalg.norm(points_in_label - centroid, axis=1) ** 2)
        variance += distance_squared / len(points_in_label)

    return variance / n_labels

# Obtenir l'inertie inter class
def calculate_inter_class_variance(X, labels):
    centroid = np.mean(X, axis=0)
    distance_squared = np.sum(np.linalg.norm(X - centroid, axis=1) ** 2)
    return distance_squared / len(X)

# Supposons que vous avez vos données dans X et Les étiquettes réelles dans y
intra_class_variance = calculate_intra_class_variance(X, y)
inter_class_variance = calculate_inter_class_variance(X, y)

print("Intra-class variance:", intra_class_variance)
print("Inter-class variance:", inter_class_variance)

Intra-class variance: 29.295889737158603
Inter-class variance: 908.0398309379598
```

FIG. 29 : Mesure de l'inertie inter-class et intra-class

.4 Modélisation et Prédiction

.4.1 Intégration des données

Il y a lien dans un premier temps d'importer les données de l'échantillonnage de notre source de données sur Jupyter Notebook.

Importer les données

```
Entrée [1065]: # Importer Les bibliothèques
import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_squared_error
import numpy as np
from sklearn.metrics import r2_score
from colorama import Fore, Style
# Importer Les données à partir d'un fichier excel
df = pd.read_excel('Consommation carburant.xlsx')
df.head()
```

```
Out[1065]:
```

	Type Trajet (cluster)	Trajet	Site	Destination	Poids de chargement (tn)	Type de camion	Age camion	Vitesse (km/h)	Distance (km)	Consommation (L / 100km)
0	A	BISKRA-BISKRA	BISKRA	BISKRA	34.44	Cocotte	2018	61.73	40	52.33
1	A	BISKRA-ELMENIAA	BISKRA	EL MENIAA	39.60	Maraicher	2017	62.65	693	54.40
2	A	BISKRA-ELMENIAA	BISKRA	EL MENIAA	38.20	Plateau	2016	62.65	693	51.30
3	A	BISKRA-GHARDAIA	BISKRA	GHARDAIA	39.00	Cocotte	2018	62.65	462	60.00
4	A	BISKRA-GHARDAIA	BISKRA	GHARDAIA	39.60	Maraicher	2018	62.65	462	53.54

```
Entrée [1067]: print(df.columns)
Index(['Type Trajet (cluster)', 'Trajet', 'Site', 'Destination',
      'Poids de chargement (tn)', 'Type de camion', 'Age camion',
      'Vitesse (km/h)', 'Distance (km)', 'Consommation (L / 100km)'],
      dtype='object')
```

```
Entrée [1068]: # Encodage des données catégorielles
from sklearn.preprocessing import LabelEncoder

# Créer une instance de LabelEncoder
label_encoder = LabelEncoder()

# Sélectionner de Les variables catégorielles à encoder
cat_vars = ['Type Trajet (cluster)', 'Trajet', 'Site', 'Destination', 'Type de camion']

# Effectuer l'encodage par étiquette pour chaque variable catégorielle
for var in cat_vars:
    df[var] = label_encoder.fit_transform(df[var])

# Afficher Le dataframe encodé
print(df)
```

FIG. 30 : Intégration des données d'échantillonnage

Ce code est suivi d'un encodage des données catégorielles comme Trajet type ou type camion, afin qu'elle puisse être traitées, rappelons que tout les modèles de régression ne traite pas de variables catégorielles, il faut donc passer par leur numérisation.

.4.2 Modélisation

Régression Linéaire Simple

```
Entrée [1071]: variables = np.array(['Type Trajet (cluster)', 'Trajet', 'Site', 'Destination', 'Poids de chargement (tn)', 'Type de camion',
                                     'Age camion', 'Vitesse (km/h)', 'Distance (km)'])
x = df[variables].values
y = df[['Consommation (L / 100km)']].values

Entrée [1072]: #Spliter Le data_set en données d'entrainement et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42, shuffle=True)

Entrée [1073]: # Créer une instance de La régression linéaire
model = LinearRegression()

Entrée [1074]: # Ajuster Le modèle aux données
model.fit(X_train, y_train)

Out[1074]:
LinearRegression
LinearRegression()

Entrée [1075]: # Récupérer Les coefficients de régression
coefficients = model.coef_
print(coefficients)

[[-1.17357825e+00 -1.34583296e+00  4.90970787e+01  9.74317384e-01
  1.16558563e+00 -4.13047950e+00 -2.43098034e+00 -1.77306401e-02
 -1.46651142e-02]]

Entrée [1076]: # Créer un dictionnaire pour associer chaque variable à son coefficient
variable_coefficients = dict(zip(variables, coefficients[0]))

# Trier Les variables par ordre décroissant des coefficients
sorted_variables = sorted(variable_coefficients, key=lambda x: abs(variable_coefficients[x]), reverse=True)

# Afficher Les variables triées par ordre d'importance
for variable in sorted_variables:
    print("Variable", variable, "- Coefficient :", variable_coefficients[variable])

Variable Site - Coefficient : 49.09707865756867
Variable Type de camion - Coefficient : -4.130479497911219
Variable Age camion - Coefficient : -2.430980338666109
Variable Trajet - Coefficient : -1.3458329619739808
Variable Type Trajet (cluster) - Coefficient : -1.173578245203782
Variable Poids de chargement (tn) - Coefficient : 1.1655856276524614
Variable Destination - Coefficient : 0.9743173835402869
Variable Vitesse (km/h) - Coefficient : -0.01773964007370101
Variable Distance (km) - Coefficient : -0.014665114248261668
```

```
Entrée [1077]: # Effectuez Les prédictions sur L'ensemble de test
y_pred = model.predict(X_test)
```

```
Entrée [1078]: import matplotlib.pyplot as plt

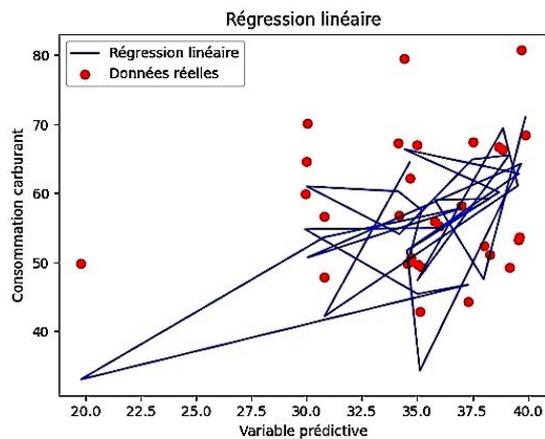
# Effectuez Les prédictions sur L'ensemble de test
y_pred = model.predict(X_test)

# Tracer La droite de régression
plt.plot(X_test[:, 4], y_pred, color='blue', linewidth=1, label='Régression linéaire')

# Tracer Les points de données réels
plt.scatter(X_test[:, 4], y_test, color='red', label='Données réelles')

# Ajouter Les légendes et Les titres
plt.legend()
plt.xlabel('Variable prédictive')
plt.ylabel('Consommation carburant')
plt.title('Régression linéaire')

# Afficher Le graphique
plt.show()
```



```
Entrée [1079]: # Calculez L'erreur de prédiction (L'erreur quadratique moyenne)
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)

print("Erreur de prédiction (MSE) :", mse)
```

Erreur de prédiction (MSE) : 83.04690553025867

```
Entrée [1080]: # Calculez Le coefficient de détermination R² sur Les données Test
r2 = r2_score(y_test, y_pred)

print("Coefficient de détermination R² :", r2)
```

Coefficient de détermination R² : 0.0867911914858498

```
Entrée [1081]: # Effectuez Les prédictions sur L'ensemble de L'entraînement
y_pred = model.predict(X_train)
```

```
Entrée [1082]: # Calculez Le coefficient de détermination R² sur Les données d'entraînement
r2 = r2_score(y_train, y_pred)

print("Coefficient de détermination R² :", r2)
```

Coefficient de détermination R² : 0.3891616423245283

```
Entrée [1083]: # Calculez L'erreur de prédiction (L'erreur quadratique moyenne)
mse = mean_squared_error(y_train, y_pred)

print("Erreur de prédiction (MSE) :", mse)
```

Erreur de prédiction (MSE) : 97.45522159170345

FIG. 31 : Résultats du modèle de Régression Linéaire Simple

Arbre de Décision

Entrée [1090]:

```
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.metrics import r2_score
```

Entrée [1137]:

```
# Créez et entraînez votre modèle d'arbre de décision
tree = DecisionTreeRegressor(random_state=42)
tree.fit(X_train, y_train)
```

Out[1137]:

```
DecisionTreeRegressor
DecisionTreeRegressor(random_state=42)
```

Entrée [1138]:

```
# Prédiction sur les données de test
y_pred = tree.predict(X_test)
```

Entrée [1139]:

```
# Calculez l'erreur de prédiction (l'erreur quadratique moyenne)
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)

print("Erreur de prédiction (MSE) :", mse)

# Calculez le coefficient de détermination R2
r2 = r2_score(y_test, y_pred)

# Affichez le coefficient de détermination R2
print("Coefficient de détermination R2 :", r2)
```

Erreur de prédiction (MSE) : 165.93665806451608
Coefficient de détermination R² : -0.82468951530896

Entrée [1140]:

```
# Prédiction sur les données de l'entraînement
y_pred = tree.predict(X_train)
```

Entrée [1141]:

```
# Calculez l'erreur de prédiction (l'erreur quadratique moyenne)
mse = mean_squared_error(y_train, y_pred)

print("Erreur de prédiction (MSE) :", mse)

# Calculez le coefficient de détermination R2
r2 = r2_score(y_train, y_pred)

# Affichez le coefficient de détermination R2
print("Coefficient de détermination R2 :", r2)
```

Erreur de prédiction (MSE) : 0.0
Coefficient de détermination R² : 1.0

FIG. 32 : Résultats du modèle d'Arbre de décision

Régression Polynomial

```
Entrée [1131]: from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures

# Transformer Les variables d'entrée en degrés polynomiaux
poly = PolynomialFeatures(degree=2)
X_train_poly = poly.fit_transform(X_train)
X_test_poly = poly.transform(X_test)

Entrée [1132]: # Créer et entraîner Le modèle de régression linéaire
model = LinearRegression()
model.fit(X_train_poly, y_train)

Out[1132]: ▾ LinearRegression
LinearRegression()

Entrée [1133]: # Effectuer des prédictions sur Les données d'entraînement et de test
y_train_pred = model.predict(X_train_poly)
y_test_pred = model.predict(X_test_poly)

Entrée [1134]: # Calculer Les erreurs de prédiction (par exemple, MSE)
mse_train = mean_squared_error(y_train, y_train_pred)
mse_test = mean_squared_error(y_test, y_test_pred)

print("Erreur de prédiction (MSE) sur les données d'entraînement :", mse_train)
print("Erreur de prédiction (MSE) sur les données de test :", mse_test)

Erreur de prédiction (MSE) sur les données d'entraînement : 48.01391781185441
Erreur de prédiction (MSE) sur les données de test : 307.29776583823235

Entrée [1135]: # Calculez Le coefficient de détermination R2 pour Les données d'entraînement
r2 = r2_score(y_train, y_train_pred)

print("Coefficient de détermination R2 :", r2)

Coefficient de détermination R2 : 0.6990541684402158

Entrée [1136]: # Calculez Le coefficient de détermination R2 pour Les données du test
r2 = r2_score(y_test, y_test_pred)

print("Coefficient de détermination R2 :", r2)

Coefficient de détermination R2 : -2.379138871079842
```

FIG. 33 : Résultats du modèle de Régression Polynomial

Régression Polynomial

```
Entrée [1131]: from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures

# Transformer Les variables d'entrée en degrés polynomiaux
poly = PolynomialFeatures(degree=2)
X_train_poly = poly.fit_transform(X_train)
X_test_poly = poly.transform(X_test)

Entrée [1132]: # Créer et entraîner Le modèle de régression linéaire
model = LinearRegression()
model.fit(X_train_poly, y_train)

Out[1132]: ▾ LinearRegression
LinearRegression()

Entrée [1133]: # Effectuer des prédictions sur Les données d'entraînement et de test
y_train_pred = model.predict(X_train_poly)
y_test_pred = model.predict(X_test_poly)

Entrée [1134]: # Calculer Les erreurs de prédiction (par exemple, MSE)
mse_train = mean_squared_error(y_train, y_train_pred)
mse_test = mean_squared_error(y_test, y_test_pred)

print("Erreur de prédiction (MSE) sur les données d'entraînement :", mse_train)
print("Erreur de prédiction (MSE) sur les données de test :", mse_test)

Erreur de prédiction (MSE) sur les données d'entraînement : 48.01391781185441
Erreur de prédiction (MSE) sur les données de test : 307.29776583823235

Entrée [1135]: # Calculez Le coefficient de détermination R2 pour Les données d'entraînement
r2 = r2_score(y_train, y_train_pred)

print("Coefficient de détermination R2 :", r2)

Coefficient de détermination R2 : 0.6990541684402158

Entrée [1136]: # Calculez Le coefficient de détermination R2 pour Les données du test
r2 = r2_score(y_test, y_test_pred)

print("Coefficient de détermination R2 :", r2)

Coefficient de détermination R2 : -2.379138871079842
```

FIG. 34 : Résultats du modèle de Régression Polynomial

CastBoost Regression

```
Entrée [1102]: from catboost import CatBoostRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_squared_error
import numpy as np

# Diviser Les données en ensembles d'entraînement et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Créer et entraîner Le modèle CatBoostRegressor
model = CatBoostRegressor()
model.fit(X_train, y_train)

# Faire des prédictions sur Les données de test
y_pred = model.predict(X_test)

# Évaluer Les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_test, y_test)

# Afficher Les résultats
print("MSE :", mse)
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)
```

```
984: learn: 0.7027059 total: 1.33s remaining: 20.2ms
985: learn: 0.7016876 total: 1.33s remaining: 18.9ms
986: learn: 0.7004854 total: 1.33s remaining: 17.5ms
987: learn: 0.6990076 total: 1.33s remaining: 16.1ms
988: learn: 0.6980727 total: 1.33s remaining: 14.8ms
989: learn: 0.6971834 total: 1.33s remaining: 13.4ms
990: learn: 0.6951482 total: 1.33s remaining: 12.1ms
991: learn: 0.6932844 total: 1.33s remaining: 10.7ms
992: learn: 0.6927534 total: 1.33s remaining: 9.4ms
993: learn: 0.6904200 total: 1.33s remaining: 8.05ms
994: learn: 0.6879482 total: 1.33s remaining: 6.71ms
995: learn: 0.6872060 total: 1.33s remaining: 5.36ms
996: learn: 0.6856172 total: 1.34s remaining: 4.02ms
997: learn: 0.6838952 total: 1.34s remaining: 2.68ms
998: learn: 0.6830396 total: 1.34s remaining: 1.34ms
999: learn: 0.6812464 total: 1.34s remaining: 0us
MSE : 29.1158544155348
RMSE : 5.3959108976645265
R² : -46.6924162682666
```

FIG. 35 : Résultats du modèle CastBoost

Adaboost Regression

```
Entrée [1099]: from sklearn.ensemble import AdaBoostRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split

# Diviser Les données en ensembles d'entraînement et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Créer et entraîner Le modèle AdaBoostRegressor
model = AdaBoostRegressor()
model.fit(X_train, y_train)

C:\Users\hayat\AppData\Local\Programs\Python\Python311\Lib\site-packages\sklearn\utils\validation.py:1143: DataConversionWarning: A column-vector y was passed when a 1d array was expected. Please change the shape of y to (n_samples, ), for example using ravel().
y = column_or_1d(y, warn=True)
```

```
Out[1099]: ▾ AdaBoostRegressor
AdaBoostRegressor()
```

```
Entrée [1100]: # Faire des prédictions sur Les données de test
y_pred = model.predict(X_test)

# Évaluer Les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_test, y_test)

# Afficher Les résultats
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)

RMSE : 6.579022059702895
R² : 0.5240412419977951
```

```
Entrée [1101]: # Faire des prédictions sur Les données d'entraînement
y_pred = model.predict(X_train)

# Évaluer Les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_train, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_train, y_train)

# Afficher Les résultats
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)

RMSE : 6.336130483964977
R² : 0.7483659472689618
```

FIG. 36 : Résultats du modèle AdaBoost

xgboost Regression

```
Entrée [1142]: import xgboost as xgb
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_squared_error
import numpy as np

# Diviser Les données en ensembles d'entraînement et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Créer et entraîner Le modèle XGBoost Regressor
model = xgb.XGBRegressor()
model.fit(X_train, y_train)
```

Out[1142]: XGBRegressor

```
Entrée [1143]: # Faire des prédictions sur Les données de test
y_pred = model.predict(X_test)

# Évaluer Les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_test, y_test)

# Afficher Les résultats
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)
```

RMSE : 6.710517385577211
R² : 0.5048250697215197

```
Entrée [1144]: # Faire des prédictions sur Les données d'entraînement
y_pred = model.predict(X_train)

# Évaluer Les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_train, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_train, y_train)

# Afficher Les résultats
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)
```

RMSE : 0.001606231106953229
R² : 0.999999983828986

FIG. 37 : Résultats du modèle xgBoost

RandomForest Regression

```
Entrée [1196]: from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_squared_error
import numpy as np

# Diviser les données en ensembles d'entraînement et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Créer et entraîner le modèle RandomForestRegressor
model = RandomForestRegressor(oob_score=True)
model.fit(X_train, y_train)

# Faire des prédictions sur les données de test
y_pred = model.predict(X_test)

# Évaluer les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_test, y_test)

# Afficher les résultats
print("MSE :", mse)
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)

C:\Users\hayat\AppData\Local\Temp\ipykernel_33036\210825052.py:11: DataConversionWarning: A column-vector y was passed when a 1
d array was expected. Please change the shape of y to (n_samples,), for example using ravel().
model.fit(X_train, y_train)

MSE : 29.481474695806487
RMSE : 5.429684585296505
R² : 0.675812816765484
```

```
Entrée [1164]: # Faire des prédictions sur les données d'entraînement
y_pred = model.predict(X_train)

# Évaluer les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_train, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_train, y_train)

# Afficher les résultats
print("MSE :", mse)
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)

MSE : 16.34357308297526
RMSE : 4.042718526310638
R² : 0.8975603238338586
```

```
Entrée [1107]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Créer une figure en 3D
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

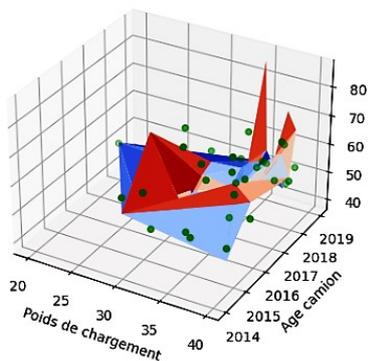
# Tracer les points de données réels
ax.scatter(X_test[:, 4], X_test[:, 6], y_test, color='green', label='Données réelles')

# Tracer la surface de prédiction
ax.plot_trisurf(X_test[:, 4], X_test[:, 6], y_pred, cmap='coolwarm', linewidth=0.2)

# Ajouter les légendes et les titres
ax.set_xlabel('Poids de chargement')
ax.set_ylabel('Age camion')
ax.set_zlabel('Variable cible')
ax.set_title('Random Forest Regression')

# Afficher le graphique
plt.show()
```

Random Forest Regression



```
Entrée [1165]: # Obtenir l'importance des variables
importances = model.feature_importances_

# Afficher l'importance de chaque variable
for i, importance in enumerate(importances):
    print("Variable", i+1, ":", importance)
```

```
Variable 1 : 0.03408090652114939
Variable 2 : 0.1655133229929912
Variable 3 : 0.008728887494169078
Variable 4 : 0.08904435893108176
Variable 5 : 0.22972158483041621
Variable 6 : 0.03676559364911662
Variable 7 : 0.09841637979639949
Variable 8 : 0.10411571872029962
Variable 9 : 0.23361324706437644
```

```
Entrée [1174]: from sklearn.inspection import permutation_importance

# Calcul de l'importance de Gini
gini_importance = model.feature_importances_

# Calcul de l'importance de permutation
perm_importance = permutation_importance(model, X_test, y_test)
features = ["Type Trajet (cluster)", "Trajet", "Site", "Destination", "Poids de chargement (tn)", "Type de camion",
            "Age camion", "Vitesse (km/h)", "Distance (km)"]

# Affichage des importances
for i, feature in enumerate(features):
    print(f"Feature: {feature}")
    print(f"Gini Importance: {gini_importance[i]}")
    print(f"Permutation Importance: {perm_importance.importances_mean[i]}")
    print("-----")
```

```
Feature: Type Trajet (cluster)
Gini Importance: 0.03408090652114939
Permutation Importance: 0.0038450119916098036
-----
Feature: Trajet
Gini Importance: 0.1655133229929912
Permutation Importance: 0.12655445041504865
-----
Feature: Site
Gini Importance: 0.008728887494169078
Permutation Importance: 0.000663177616118439
-----
Feature: Destination
Gini Importance: 0.08904435893108176
Permutation Importance: 0.01063006656710055
-----
Feature: Poids de chargement (tn)
Gini Importance: 0.22972158483041621
Permutation Importance: 0.09861029251123068
-----
Feature: Type de camion
Gini Importance: 0.03676559364911662
Permutation Importance: 0.0403851138038364
-----
Feature: Age camion
Gini Importance: 0.09841637979639949
Permutation Importance: 0.1479982480073244
-----
Feature: Vitesse (km/h)
Gini Importance: 0.10411571872029962
Permutation Importance: 0.02244291920814978
-----
Feature: Distance (km)
Gini Importance: 0.23361324706437644
Permutation Importance: 0.45058464249498636
```

```

Entrée [1181]: from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_squared_error
import numpy as np

# Sélectionner Les indices des colonnes correspondant aux features choisis
selected_features = [0, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8] # Remplacez par Les indices des features choisis

# Sélectionner Les colonnes correspondantes dans X
X_selected = X[:, selected_features]

# Diviser Les données en ensembles d'entraînement et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_selected, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Créer et entraîner Le modèle RandomForestRegressor
model = RandomForestRegressor(oob_score=True)
model.fit(X_train, y_train)

# Faire des prédictions sur Les données de test
y_pred = model.predict(X_test)

# Évaluer Les performances du modèle
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
r2 = model.score(X_test, y_test)

# Afficher Les résultats
print("MSE :", mse)
print("RMSE :", rmse)
print("R² :", r2)

C:\Users\hayat\AppData\Local\Temp\ipykernel_33036\1259577677.py:17: DataConversionWarning: A column-vector y was passed when a
1d array was expected. Please change the shape of y to (n_samples,), for example using ravel().
model.fit(X_train, y_train)

MSE : 31.71318301903223
RMSE : 5.631445908381988
R² : 0.6512722792729517

```

FIG. 38 : Résultats du modèle RandomForest

4.3 Prédiction

Prédiction de la consommation à l'aide du modèle entraîné

```

Entrée [1333]: import pandas as pd
import joblib

# Charger Les données à prédire depuis Le fichier Excel
df_rotations = pd.read_excel('Réalisations 2022.xlsx')

Entrée [1334]: df_rotations.head()

Out[1334]:

```

	Type Trajet (cluster)	Trajet	Site	Destination	Poids de chargement (tn)	Type de camion	Age camion	Vitesse (km/h)	Distance (km)
0	C	M'SILA-JJEL	M'SILA	JJEL	24.56	Cocotte	2010	29.24	260
1	C	M'SILA-JJEL	M'SILA	JJEL	24.56	Cocotte	2010	29.24	260
2	C	M'SILA-JJEL	M'SILA	JJEL	26.00	Cocotte	2010	29.24	260
3	C	M'SILA-JJEL	M'SILA	JJEL	26.00	Cocotte	2010	29.24	260
4	C	M'SILA-JJEL	M'SILA	JJEL	27.24	Cocotte	2010	29.24	260

```

Entrée [1335]: print(df_rotations.columns)

Index(['Type Trajet (cluster)', 'Trajet', 'Site', 'Destination',
      'Poids de chargement (tn)', 'Type de camion', 'Age camion',
      'Vitesse (km/h)', 'Distance (km)'],
      dtype='object')

Entrée [1336]: # Encodage des données catégorielles

from sklearn.preprocessing import LabelEncoder

# Créer une instance de LabelEncoder
label_encoder = LabelEncoder()

# Sélectionner de Les variables catégorielles à encoder
cat_vars = ['Type Trajet (cluster)', 'Trajet', 'Site', 'Destination', 'Type de camion']

# Effectuer L'encodage par étiquette pour chaque variable catégorielle
for var in cat_vars:
    df_rotations[var] = label_encoder.fit_transform(df_rotations[var])

# Afficher Le dataframe encodé
print(df_rotations)

```

```

Entrée [1339]: df_rotations.info()
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 169989 entries, 0 to 169988
Data columns (total 9 columns):
# Column                Non-Null Count  Dtype
---  ---                ---
0 Type Trajet (cluster)  169989 non-null int64
1 Trajet                 169989 non-null int64
2 Site                   169989 non-null int64
3 Destination            169989 non-null int64
4 Poids de chargement (tn) 169989 non-null float64
5 Type de camion         169989 non-null int64
6 Age camion             169989 non-null int64
7 Vitesse (km/h)         169989 non-null float64
8 Distance (km)          169989 non-null int64
dtypes: float64(2), int64(7)
memory usage: 11.7 MB

Entrée [1314]: import joblib
# Effectuer Les prédictions
predictions = model_RF.predict(df_rotations)
# Ajouter Les prédictions au DataFrame
df_rotations['Consommation (L / 100km)'] = predictions
# Enregistrer Le DataFrame avec Les prédictions dans un fichier Excel
df_rotations.to_excel('Réalisation_Predictions.xlsx', index=False)

```

FIG. 39 : Modèle de prédiction pour les données de consommation de carburant pour le reste des rotations 2022

Type Trajet (cluster)	Trajet	Site	Destination	Poids de chargement (tn)	Type de camion	Age camion	Vitesse (km/h)	Distance (km)	Consommation carburant (L/100 Km)	Consommation trajet (L)
2	52	1	24	24.56	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	24.56	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	27.24	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	27.24	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	38.88	0	2010	29.24	260	64.2043	166.9318
2	52	1	24	38.88	0	2010	29.24	260	64.2043	166.9318
2	52	1	24	35.22	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.22	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.18	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.18	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.08	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.08	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.34	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.34	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	38.56	0	2010	29.24	260	64.4114	167.46964
2	52	1	24	38.56	0	2010	29.24	260	64.4114	167.46964
2	52	1	24	38.5	0	2010	29.24	260	64.4114	167.46964
2	52	1	24	38.5	0	2010	29.24	260	64.4114	167.46964
2	52	1	24	25.96	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.96	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.16	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.16	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.1	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.1	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.22	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.22	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.22	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.22	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.9	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.9	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	27.56	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	27.56	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.24	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.24	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.9	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.9	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.64	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.64	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.52	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	25.52	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213
2	52	1	24	26.7	0	2010	29.24	260	60.2005	156.5213

FIG. 40 : Aperçu du résultats de prédiction pour les 44 premières rotations

.5 Réseau Routier Algérien

.5.1 Répartition du réseau routier

Même si quelques régions Algériennes demeurent encore isolées en raison de l'absence d'infrastructure routière, le réseau routier algérien demeure l'un des plus denses du conti-

ment africain, sa longueur est estimée à 108 302 km de routes (dont 76 028 km goudronnées) et plus de 3 756 ouvrages d'art. avec une Autoroute Est-Ouest de 1 216 km permettant de relier la ville d'Annaba de l'extrême Est jusqu'à la ville de Tlemcen à l'extrême Ouest.) ainsi que l'autoroute des hauts plateaux de (1 330 km), et la réalisation de 19 000 km de route, Sans oublier la finition de la route transsaharienne (nord-sud). Cette dernière est promue par le gouvernement pour accroître le commerce entre les six pays traversés par la route transsaharienne (Algérie, Mali, Niger, Nigeria, Tchad et Tunisie).

L'Algérie a lancé un programme très ambitieux national 2005-2025, élaboré par le ministère des travaux publics qui vise à doter le pays d'un réseau autoroutier important. On peut dire que cette modernisation est une priorité majeure qui permettra non seulement le désenclavement des régions, mais aussi l'assurance du développement social et économique du pays. Ce programme consiste à disposer à moyen et long terme d'un réseau autoroutier adapté dans les principaux axes structurants sont :

L'autoroute Est-Ouest : Elle s'étend de la frontière marocaine à la frontière tunisienne, et reliant les principales agglomérations du pays situées sur la frange Nord (Annaba, Skikda, Constantine, Sétif, Alger, Chleff, Oran et Tlemcen), du territoire qui regroupe plus de 80 de 1 216 km. Cette autoroute doit régler les problèmes de congestion sur le réseau routier existant, et de réduire le taux d'accidents.

Autoroute de hauts plateaux : Liaison l'autoroute Est-Ouest située à quelques centaines de Kilomètre au sud de la précédente (Est-Ouest) et desservant des agglomérations située entre la frange Nord et le désert (Tiaret, Boughezoul, Batna, et Khenchela) sur une distance de 1 020 Km. Le projet va permettre de satisfaire les besoins en transport routier dans la zone des hauts plateaux, afin de contribuer à la fixation des populations qui y résident.

Pénétrantes nord-sud : Les liaisons nord-sud appelées pénétrantes reliant notamment l'autoroute Est-Ouest à la rocade des hauts plateaux et maillant le territoire pour une desserte plus complète. Ainsi que de canaliser vers celles-ci les flux routiers le plus rapidement possible.

2ème, 3èmes et 4èmes rocades autoroutières d'Alger : C'est une infrastructure routière qui va permettre de relier les régions comme suit :

- La deuxième rocade d'Alger relie la ville de Zéralda à l'ouest d'Alger à la ville de Boudouaou à l'est, sur un linéaire de tracé direct de 60 Km.
- La troisième rocade autoroutière d'Alger, d'une longueur estimative de 140 KM a été définie en fonction de la position des trois centres urbains à desservir, à savoir, les Wilaya de Blida, Boumerdes et de Tipaza.
- La quatrième Rocade d'Alger, d'une longueur de 300 Km, prend la naissance à khemis Miliana dans la wilaya Ain Defla et travers 5 Wilayas du centre du pays (Ain Defla, Médéa, Bouira, Msila et Bordj Bou Arreridj).

La carte suivante illustre la configuration du réseau autoroutier de l'Algérie dans l'horizon de 2025 :

