

N° d'ordre : 4104

THÈSE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Structure de Recherche : *Intelligent Processing & Security of Systems (IPSS)*

Discipline : *informatique Industrielle*

Spécialité : *Supply Chain et Intelligence Artificielle*

Présentée et Soutenue le : 21 / 06 / 2025

Par :

Younesse OUAHBI

Chaîne logistique intelligente : sécurité routière et optimisation énergétique

Devant le JURY :

Samira KHOULJI	PES, École Nationale des Sciences Appliquées, Université Abdelmalek Essadi - Tétouan	Président
Karim EL MOUTAOUAKIL	PES, Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès	Rapporteur / Examineur
Khalid HADDOUCH	PES, École Nationale des Sciences Appliquées, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès	Rapporteur / Examineur
M'hamed RAHMOUNI	MCH, Ecole Normale Supérieure, Université Mohammed V de Rabat	Rapporteur / Examineur
Mohamed LAZAAR	PES, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes, Université Mohammed V de Rabat	Examineur
Wajih RHALEM	MCH, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université Mohammed V de Rabat	Invité
Najib ALIDRISSI	Professeur Agrégé, Université Mohammed IV des Sciences et de la Santé - Rabat	Invité
Soumia ZITI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2024 – 25



Dédicace

À ma mère

Ma source inépuisable d'amour, de tendresse et de prières. Pour tous ses sacrifices, sa force et son soutien indéfectible. Que Dieu te protège et t'accorde une vie pleine de bonheur et de santé.

À mon père,

Modèle de sagesse, de patience et de droiture. Merci pour tes conseils précieux, ta foi en moi et ton soutien constant tout au long de ce parcours.

À mes frères Soufiane et Yassine

Pour leur affection fraternelle, leur présence rassurante et leurs encouragements sincères. Votre soutien a été une véritable force dans les moments les plus décisifs.

Cette thèse est le reflet de tout ce que vous m'avez transmis,
Et elle vous est entièrement dédiée.

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire Intelligent Processing and Security of System (IPSS) du département informatique de la Faculté des Sciences de Rabat sous la direction du Professeur **Soumia ZITI**.

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de thèse, Professeur **Soumia ZITI** professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour son encadrement, sa patience, sa grande disponibilité, sa passion pour la recherche, ses qualités humaines et scientifiques et toute l'aide qu'elle m'a procuré durant l'élaboration de ce travail. Elle a énormément contribué à ce que ma thèse se déroule dans d'excellentes conditions scientifiques et dans une bonne ambiance générale.

J'exprime ma sincère reconnaissance envers le madame **Samira KHOULJI** professeur de l'enseignement supérieur à l'ENSA de Tétouan pour sa disponibilité et pour m'avoir fait l'honneur d'être président de ma soutenance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers monsieur **Karim EL MOUTAOUAKIL** professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour m'avoir honoré en tant que rapporteurs.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers monsieur **Khalid HADDOUCH** professeur de l'enseignement supérieur à l'École Nationale des Sciences Appliquées, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour m'avoir honoré en tant que rapporteurs.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers monsieur **M'hamed RAHMOUNI** maître de conférence habilité à Ecole Normale Supérieure, Université Mohammed V de Rabat pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour m'avoir honoré en tant que rapporteurs.

Je tiens à remercier chaleureusement monsieur **Mohamed LAZAAR** professeur de l'enseignement supérieur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes, Université Mohammed V de Rabat pour avoir étudié ce rapport avec une grande rigueur et un grand intérêt et monsieur **Wajih RHALEM** maître de conférence habilité et monsieur **Najib ALIDRISSI** Professeur Agrégé d'avoir accepté l'invitation.

Enfin, je ne pourrai pas oublier tous ceux qui ont apporté leur contribution, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Le secteur de la logistique routière, au cœur de la Supply Chain, traverse de profondes transformations dans un contexte mondial dominé par l'urgence climatique, la transition numérique et la quête d'une durabilité renforcée. Le Maroc, en tant que hub logistique émergent en Afrique, fait face à trois défis majeurs : réduire les émissions de CO₂ liées au transport routier, sécuriser les flux logistiques, et digitaliser les opérations afin d'en améliorer l'efficacité.

Cette thèse propose une réponse innovante à ces enjeux à travers la conception de la plateforme NW Logistics Tracker. Basée sur l'intelligence artificielle, cette solution intègre des capteurs embarqués, le traitement d'images, des algorithmes d'optimisation et des tableaux de bord intelligents. Elle permet de suivre les indicateurs logistiques, de détecter les infractions routières, et de minimiser l'impact environnemental du transport.

L'approche adoptée repose sur deux fondements : l'étude des technologies d'IA appliquées à la logistique, et la méthodologie DMAIC issue du Lean Six Sigma pour structurer la conception, l'implémentation et l'évaluation du système. Les résultats attendus mettent en lumière la contribution de l'IA à la décarbonation, à la sécurité routière, à la responsabilisation des chauffeurs et à la digitalisation durable de la logistique au Maroc.

Mots-clefs : Supply Chain, Logistique intelligente, Optimisation des trajets, Réduction des émissions de CO₂, Vision par ordinateur, Apprentissage profond.

Abstract

The road logistics sector, at the core of the Supply Chain, is undergoing profound transformations in a global context shaped by climate urgency, digital transition, and the pursuit of enhanced sustainability. As an emerging logistics hub in Africa, Morocco faces three major challenges : reducing CO₂ emissions from road transport, securing logistics flows, and digitizing operations to improve efficiency.

This thesis proposes an innovative response to these challenges through the development of the NW Logistics Tracker platform. Powered by artificial intelligence, this solution integrates embedded sensors, image processing, optimization algorithms, and intelligent dashboards. It enables the monitoring of logistics indicators, the detection of road violations, and the reduction of the environmental impact of transportation.

The adopted approach is based on two pillars: the study of AI technologies applied to logistics, and the DMAIC methodology from Lean Six Sigma to structure the system's design, implementation, and field evaluation. The expected outcomes highlight the contribution of AI to decarbonization, road safety, driver accountability, and the sustainable digital transformation of logistics in Morocco.

Keywords: Supply Chain, Smart Logistics, Route Optimization, CO₂ Emission Reduction, Computer Vision, Violation Detection, Machine Learning, Deep Learning.

ملخص

يُعدّ قطاع اللوجستيك الطريق، الذي يُشكّل قلب سلسلة التوريد، في خضم تحولات عميقة في ظل سياق عالمي تهيمن عليه حالة الطوارئ المناخية، والتحول الرقمي، والسعي نحو تعزيز الاستدامة. ويواجه المغرب، باعتباره مركزًا لوجستيًا ناشئًا في إفريقيا، ثلاثة تحديات رئيسية: تقليص انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن النقل الطريق، تأمين التدفقات اللوجستية، ورقمنة العمليات بهدف تحسين الكفاءة.

تقترح هذه الأطروحة استجابة مبتكرة لهذه الرهانات من خلال تصميم منصة ذكية، وهي حلّ يعتمد على الذكاء الاصطناعي ويجمع بين أجهزة استشعار مدمجة، ومعالجة الصور، وخوارزميات التحسين، ولوحات تحكم ذكية. وتتيح هذه المنصة تتبّع المؤشرات اللوجستية، والكشف عن المخالفات المرورية وتقليل الأثر البيئي للنقل.

وترتكز المنهجية المعتمدة على ركيزتين أساسيتين: دراسة تقنيات الذكاء الاصطناعي المطبقة في مجال اللوجستيك، واعتماد منهجية تحسين متواصلة من أجل هيكلة مراحل التصميم والتنفيذ والتقييم، للنظام. وتُبرز النتائج المتوقعة مساهمة الذكاء الاصطناعي في إزالة الكربون، وتعزيز السلامة الطرقية وتحفيز السائقين على تحمل المسؤولية، وتحقيق رقمنة مستدامة للوجستيك في المغرب.

الكلمات المفتاحية

سلسلة التوريد؛ اللوجستيك الذكي؛ تحسين المسارات؛ تقليص انبعاثات ثاني أكسيد الكربون؛ الرؤية بالحاسوب؛ كشف المخالفات؛ التعلم الآلي؛ التعلم العميق.

Liste des Figures

Figure 1: Relations clients/fournisseurs d'une chaîne logistique	2
Figure 2: Modèle SCOR	3
Figure 3: Modèle de chaîne logistique de Kearney	3
Figure 4 : Différentes approches de la chaîne logistique	4
Figure 5 : Types de flux logistique	5
Figure 6 : Vue d'ensemble des types d'apprentissage automatique	10
Figure 7 : Architecture classique d'un réseau de neurones artificiels (ANN) avec couche d'entrée, couches cachées et couche de sortie.	11
Figure 8 : Architecture d'un CNN	12
Figure 9 : Traitement d'image par un CNN pour la reconnaissance automatique de panneaux de signalisation.....	13
Figure 10 : Fonctionnement du self-attention dans un transformateur, illustrant la pondération contextuelle.....	13
Figure 11 : Approche Prisma	16
Figure 12 : Vue d'ensemble de la base de données	16
Figure 13 : Dynamique de la production scientifique	17
Figure 14 : Évolution des citations moyennes annuelles par article (1957–2025).	18
Figure 15 : Cartographie thématique des principales orientations de recherche.	18
Figure 16 : Architecture pour la Prédiction du Dernier Kilomètre [7].	21
Figure 17 : Structure du système d'information ITS basé sur l'intelligence artificielle [20].	23
Figure 18 : Cadre conceptuel pour l'IA, le ML et le DL dans la logistique intelligente [38].	27
Figure 19 : Architecture proposée pour améliorer l'affectation des livraisons à l'aide de techniques de régression en apprentissage supervisé et de l'algorithme hongrois [41]	28
Figure 20 : Processus de détection et de classification d'objets dans YOLO [63].	31
Figure 21 : Détection de véhicules basée sur les CNN pour la conduite automobile à partir de caméras vidéo [79]	33
Figure 22 : Etat actuel et enjeux de la logistique au Maroc	48
Figure 23 : Chiffres Clés des Accidents Routiers et Leurs Conséquences Logistiques.....	49
Figure 24 : vision du transport routier et la logistique verte au Maroc	51
Figure 25 : Positionnement	52
Figure 26 : Démarche DMAIC	55
Figure 27 : Classe 1_Signalisation routière	58
Figure 28 : Classe2_Marquages au sol	59
Figure 29 : Classe3_Signalisation lumineuse.....	59
Figure 30 : Diagramme de composants - Architecture du système	71
Figure 31 : Diagramme de déploiement – Système embarqué et cloud	71
Figure 32 : Diagramme de classes – Modèle de données.....	72
Figure 33 : Diagramme d'états – Système global de détection	73
Figure 34 : Diagramme de séquence – Détection d'infractions	74
Figure 35 : Diagramme d'activité – Processus de détection	75
Figure 36 : Diagramme global – Détection via vision par ordinateur et données GPS	76
Figure 37 : Interface globale Figma	77
Figure 38 : Page d'accueil & Connexion.....	78
Figure 39 : Carte interactive de la flotte	79
Figure 40 : Formulaire d'affectation de missions	80

Figure 41 : Fiches de gestion des ressources humaines et matérielles	80
Figure 42 : Tableau des missions logistiques	81
Figure 43 : Dashboard analytique intégré.....	82
Figure 44 : Page de connexion chauffeur.....	83
Figure 45 : Accueil conducteur	83
Figure 46 : Fiche du conducteur	84
Figure 47 : Trajet en cours	84
Figure 48 : Dashboard embarqué	85
Figure 49 : Prétraitement et Augmentation des Données	88
Figure 50 : Exemple Prétraitement des images	88
Figure 51 : Architecture du model Road_Net.....	90
Figure 52 : ROC des classes 0, 1 et 2	93
Figure 53 : Perte et précision dans la phase Test et validation	94
Figure 54 : Perte et précision dans la phase Test et validation après amélioration.....	95

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Vue d'ensemble comparative des systèmes de détection d'objets et de panneaux de signalisation basés sur l'intelligence artificielle	37
Tableau 2 : Analyse comparative des applications de l'intelligence artificielle dans la logistique routière	40
Tableau 3 : Identification du périmètre	61
Tableau 4 : Acceptation des technologies, Identification des besoins et Acceptation de la solution	62
Tableau 5 : Récapitulatif des indicateurs logistiques mesurés	65
Tableau 6 : Paramètres du model	91
Tableau 7 : Comparaison des métriques dans la phase entraînement	96
Tableau 8 : Comparaison des métriques dans la phase validation	96

Liste des acronymes

Abréviation	Signification
AMDL	Agence Marocaine de Développement de la Logistique
AR	Réalité augmentée
AUC	Area Under Curve
BP-ANN	Réseaux de neurones artificiels rétropropagation
BRNN	Réseaux neuronaux récurrents bidirectionnels
CADe	Détection assistée par ordinateur
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
CTA-SI	Computed Tomography Angiography Source Images
CTP	Computed Tomography Perfusion
DCNN	Réseaux neuronaux convolutifs profonds
DPA-HNN	Réseaux neuronaux récurrents hiérarchiques basés sur l'attention des phrases de domaine
DWI	Diffusion-Weighted Imaging
EEG	Électroencéphalogramme
GPU	Graphics Processing Unit
HRV	Variabilité de la fréquence cardiaque
ICH	Hémorragie intracérébrale spontanée
ICU	Unité de soins intensifs
KPI	Indicateurs Clés de Performance
LSTM	Mémoire à long court terme
MV	Ventilation Mécanique
NCCT	Non-Contrast Computed Tomography
NI	Need Identification
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
OSEMN	Obtain, Scrub, Explore, Model, Interpret
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PMID	PubMed Identifier
RBF	Fonction de base radiale
ROC	Receiver Operating Characteristic
SAAI	Solution Acceptance tough AI
SI	Scope Identification
SNDD	Stratégie Nationale de Développement Durable
SOA	Architecture Orientée Services
TA	Technology Acceptance
T2W	T2 Weighted
TOFR	Ratio de Train-of-Four
VR	Réalité Virtuelle

Liste des Publications

Revues internationales

Y. Ouahbi, S. Ziti, and N. S. Lagmiri, “Advancing supply chain management through artificial intelligence: a systematic literature review,” Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 38, no. 1, Apr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v38.i1.pp321-332>.

Y. Ouahbi and S. Ziti, “Revolutionizing Road Safety and Optimization with AI: Insights from Enterprise Implementation,” International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 16, no. 4, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2025.0160498>.

Y. Ouahbi and S. Ziti, “NW Logistics: System Architecture and Design for Sustainable Road Logistics,” International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 16, no. 4, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2025.01604105>

Y. Ouahbi and S. Ziti, “Advancing Traffic Sign Detection with Convolutional Neural Networks : A Deep Learning Approach,” International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), Article Soumis.

Conférences internationales

Y. Ouahbi and S. Ziti, “Transforming Road Safety and Optimization Through AI: An Enterprise Perspective,” Proceedings of the GSRD International Conference, Paris, France, Edn. 567, pp. 7–15, 2024, ISBN: 978-93-90150-28-1.

M. L. Tahiri Alaoui, M. Belhiah, C. Talbi, M. Rahmouni, Y. Ouahbi, and S. Ziti, “Ambulance Response Times Improvement,” Lecture Notes in Networks and Systems, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-86698-2_13

Y. Ouahbi, C. Elasri, M. Ennakri, and S. Zit, “Comparison of Supervised and Unsupervised Learning Approaches for Intelligent Decision-Making,” Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing (ICAISC), New York, USA, pp. 1–7, Apr. 2025. Paper ID: AW-ICAISCKRAKOW-040325-14488.

Y. Ouahbi, C. Elasri, C. Talbi, M. L. Tahiri Alaoui, and S. Ziti, “The Impact of Artificial Intelligence on Telemedicine: Opportunities and Challenges,” Proceedings of the Health-Tech Global Summit of Digital Health (HEALTH-TECH 2025), Marrakech, Morocco, Apr. 2025. Article en cours de publication.

C. Elasri, Y. Ouahbi, F. Saoiabi, H. Harchane, M. Hagouch, N. Kharmoum, and S. Ziti, “Improving Artificial Intelligence Tools to Ensure Quality in Medical Software Testing: A Literature Review,” Proceedings of the Health-Tech Global Summit of Digital Health (HEALTH-TECH 2025), Marrakech, Morocco, Apr. 2025. Article en cours de publication.

Y. Ouahbi and S. Ziti, “Artificial Intelligence and Road Logistics : A Partnership to Reduce CO₂ Emissions,” Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2024), Tangier, Morocco, Dec. 16–20, 2024. Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS), article en cours de publication.

Y. Ouahbi, S. Ziti, M. Hagouch, N. S. Lagmiri, M. Belhiah, M. L. Tahiri Alaoui, and H. Ouhnni, “The Role of Artificial Intelligence in Supply Chain Fraud Detection: A Systematic Review,” Proceedings of the International Conference on Smart Business and Technologies (ICSBT'25), Rabat, Morocco, 2025. Article accepté.

Y. Ouahbi and S. Ziti, “New Wave Logistics Framework : Enabling Sustainable Practices in Road Transportation,” in Proceedings of the 17th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI 2025), Targoviste, Romania, Jun. 26–27, 2025. IEEE, ISBN : 979-8-3315-3352-6. Article accepté.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract.....	iv
ملخص.....	v
Liste des Figures.....	vi
Liste des Tableaux	viii
Liste des acronymes	ix
Liste des Publications.....	x
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Concepts fondamentaux de la chaîne logistique et intelligence artificielle	1
Introduction	1
1. Chaîne Logistique.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Fonctions de la chaîne logistique.....	5
2. Intelligence artificielle.....	9
2.1 Bases de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique.....	9
2.2 Réseaux de neurones artificiels et apprentissage profond	11
2.3 Réseaux de neurones convolutifs pour le traitement d'images	12
2.4 Transformateurs dans l'intelligence artificielle générative.....	13
Conclusion.....	14
Chapitre 2 : Tendances émergentes de l'intelligence artificielle dans la logistique routière	15
Introduction	15
1. Étude bibliométrique.....	15
1.1 Dynamique de la production scientifique	17
1.2 Impact scientifique par année.....	17
1.3 Cartographie thématique des recherches	18
2. Étude de la littérature	19
2.1 Avancées technologiques et méthodologiques dans le domaine de la logistique routière....	19
2.2 Planification et optimisation des trajets.....	22
2.3 Application de gestion de véhicules et de flotte	24
2.4 Optimisation des livraisons et de la logistique.....	26

2.5	Détection d'image dans la logistique routière.....	29
2.6	Reconnaissance et détection du code de la route.....	30
2.7	Détection de véhicules et surveillance du trafic	32
2.8	Surveillance du comportement des conducteurs.....	34
2.9	Application et mise en œuvre dans le monde réel	35
2.10	Avantages et impact commercial de l'IA dans la logistique routière	38
3.	Challenges et futurs travaux.....	40
	Conclusion.....	43
	Chapitre 3 : Défis logistiques et innovation méthodologique	45
	Introduction	45
I.	Complexité de la logistique intelligente	45
1.	La Logistique au Maroc.....	46
2.	Chiffres Clés des Accidents Routiers et Leurs Conséquences Logistiques	48
3.	Stratégie Marocaine pour le transfert à la logistique verte	49
4.	Positionnement	51
5.	Défis de la Logistique Routière Marocaine	53
II.	Lecture terrain et modélisation des besoins logistiques routiers	54
1.	Définition des besoins et des problématiques logistiques Marocaine.....	55
1.1	Contexte général et motivations	55
1.2	Objectifs scientifiques et applicatifs	56
1.3	Cadrage du périmètre de recherche.....	57
2.	Définition des activités de mesure des données logistiques marocaines.....	57
2.1	Sources de données.....	57
2.2	Données embarquées.....	58
2.3	Corpus d'images publics annotés	59
2.4	Données sectorielles institutionnelles	60
2.5	Enquêtes terrain.....	61
2.6	Indicateurs logistiques mesurés.....	63
3.	Phase « Analyser » — Diagnostic et identification des causes racines.....	65
3.1	Méthodes analytiques mobilisées	65
3.2	Résultats d'analyse intermédiaires.....	66
3.3	Identification des leviers d'amélioration	67
	Conclusion.....	68
	Chapitre 4 — Transformation intelligente de la logistique routière	69
	Introduction	69
1.	Conception de la plateforme NW Logistics Tracker (NWLTL).....	70

1.1.	Architecture logicielle du système.....	70
1.2.	Modèle de données et structuration des informations.....	71
1.3.	Modélisation comportementale et dynamique des événements routiers	73
1.4.	Système global de détection IA.....	76
1.5.	Interfaces (Prototype de NWLT).....	77
2.	Développement des algorithmes de détection d'infractions routières.....	85
2.1.	Structuration thématique des jeux d'apprentissage pour la détection d'infractions.....	86
2.2.	Prétraitement et Augmentation des Données	87
2.3.	Techniques d'augmentation de données.....	89
2.4.	Architecture du modèle Road_Net.....	90
2.5.	Évaluation des métriques du modèle Road_Net	91
2.6.	Résultats expérimentaux et analyse des performances du modèle Road_Net.....	92
2.7.	Comparaison des métriques d'évaluation du modèle Road_Net	95
	Conclusion.....	97
	Conclusion générale.....	99
	Références.....	102
	Annexes.....	111

Introduction générale

Transformer les systèmes logistiques n'est plus un choix à l'ère de la numérisation avancée et de l'urgence climatique mondiale ; c'est plutôt un besoin stratégique. L'épine dorsale du transport de marchandises dans de nombreux pays, en particulier au Maroc, la logistique routière devient de plus en plus complexe en réponse à l'augmentation des flux physiques, à la demande de réactivité, aux préoccupations environnementales et aux attentes de la société en matière de sécurité et de responsabilité.

Dans ce contexte, l'intelligence artificielle (IA) se positionne comme un levier technologique majeur capable de soutenir les acteurs du secteur dans leur transition vers une logistique plus efficace, plus sûre et plus durable.

Bien que nécessaire au bon déroulement des interactions économiques, le transport routier engendre d'importantes externalités négatives. Avec près de 38 % de l'énergie consommée au Maroc provenant uniquement du trafic routier, il fait partie des secteurs avec les plus fortes émissions de gaz à effet de serre. La Stratégie Nationale de Développement Durable projette que ces émissions en 2022 atteindront presque 23 millions de tonnes de CO₂. Simultanément, le système logistique marocain présente encore une grande informalité, une fragmentation des acteurs, une flotte vieillissante et une transition technologique lente, ce qui entrave la compétitivité et le potentiel de modernisation du secteur.

Le Maroc met en œuvre des plans ambitieux pour organiser sa logistique nationale depuis presque dix ans. Sous la direction de l'Agence Marocaine de Développement de la Logistique (AMDL), la Stratégie Nationale de Développement de la Compétitivité Logistique (SNDCL) vise à réduire les coûts logistiques de 20 % à 15 % du PIB grâce à des plateformes logistiques régionales, à la modernisation des infrastructures et à la digitalisation des processus. Les qualités attractives de la région sont améliorées par des infrastructures de classe mondiale, y compris des zones logistiques multi-flux, le port de Tanger Med et la ligne TGV Casablanca-Tanger. Nonobstant ces initiatives, les résultats ont tardé à se manifester à grande échelle, notamment en raison de retards dans le déploiement opérationnel, d'un manque de coordination interinstitutionnelle et d'une faible acceptation des technologies numériques. De plus, les accidents de la route suscitent une préoccupation particulièrement grande.

L'Agence nationale de la sécurité routière (NARSA) estime que 113 625 accidents corporels ont été signalés en 2022, entraînant 3 499 décès, dont 1 870 hors des zones urbaines. Un grand nombre de ces incidents impliquent des véhicules légers et lourds, perturbant gravement la chaîne d'approvisionnement : pertes matérielles, retards de livraison, augmentation des coûts d'assurance et impacts humains majeurs. Ces chiffres révèlent un manque en termes de détection automatisée des risques, de surveillance du comportement des conducteurs et de prévention.

Une question centrale se pose dans ce contexte compliqué : **Comment pouvons-nous garantir des flux sûrs, réduire les émissions de CO₂ et autonomiser les conducteurs grâce à des outils de gestion et d'analyse intelligents tout en améliorant la performance générale de la logistique routière marocaine ?**

Basée sur des technologies d'intelligence artificielle pour le suivi logistique, le soutien à la décision, la réduction de l'impact environnemental et la détection des comportements à risque, cette thèse propose le développement d'une solution intégrée appelée NW Logistics pour résoudre ce problème.

L'architecture technique de notre plateforme NWLT combine des capteurs montés sur les véhicules (caméras, GPS, modules de détection de vitesse, etc.), des algorithmes d'analyse d'images et de séries temporelles pour détecter les infractions de circulation et les anomalies de conduite, une interface de gestion dynamique pour les entreprises, permettant la surveillance en temps réel des indicateurs logistiques, environnementaux et de sécurité, et une base de données centralisée pour la modélisation prédictive et l'amélioration continue des performances constitue la base de cette solution.

Trois problèmes principaux sont censés être résolus avec cette solution. Réduire l'empreinte carbone de la logistique routière en optimisant les trajets et en suivant les émissions de CO₂; sécuriser les trajets et prévenir les accidents en détectant les comportements à risque, les infractions au code de la route et les zones dangereuses ; et numériser la gestion logistique des entreprises marocaines en leur fournissant des indicateurs utilisables et personnalisés, adaptés aux objectifs de la logistique verte. La méthodologie adoptée dans ce travail repose sur une approche structurée en deux parties principales. La Partie I met en lumière le cadre conceptuel, scientifique et technologique, la partie II présente la conception de la solution NW Logistics – Tracker. Plus exactement, le chapitre 1 présente les concepts fondamentaux liés à l'intelligence artificielle et à la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Le chapitre 2 dresse un état critique de l'art des avancées en intelligence artificielle dans la logistique routière, en mettant en avant les tendances internationales, les solutions existantes et leurs limitations. Le chapitre 3 est consacré à la conception du système NW Logistics-Tracker, à partir de l'analyse des besoins du terrain, des spécifications fonctionnelles et du développement technologique de la plateforme selon une approche Lean Six Sigma à travers le cycle DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler), afin de structurer le développement et la mise en œuvre de NW Logistics. Cette thèse vise à être une contribution utile à l'innovation logistique au Maroc ainsi qu'une étude appliquée. Elle cherche à montrer, via la solution NW Logistics-Tracker comme un exemple, comment l'intelligence artificielle peut être un outil tangible de transformation pour un secteur encore trop vulnérable aux impacts environnementaux, aux risques et aux inefficacités, elle s'inscrit aussi dans une vision de l'avenir où la logistique devient non seulement efficace mais aussi responsable et résiliente grâce à une approche intégrée combinant analyse systématique, innovation technique et engagement environnemental

Chapitre 1 : Concepts fondamentaux de la chaîne logistique et intelligence artificielle

Introduction

La chaîne logistique, également appelée Supply Chain, constitue aujourd'hui un levier stratégique majeur pour la compétitivité des entreprises et la performance des systèmes industriels. Elle englobe l'ensemble des activités nécessaires à la mise à disposition d'un produit ou d'un service, depuis la gestion des matières premières jusqu'à la livraison finale au client. Dans un contexte globalisé, marqué par l'évolution rapide des marchés, la digitalisation croissante des processus et les impératifs de durabilité, la maîtrise des flux logistiques devient un enjeu central pour les organisations.

Ce premier chapitre vise à poser les fondements théoriques indispensables à la compréhension des dynamiques de la chaîne logistique. Il présente les principales fonctions logistiques de l'approvisionnement à la vente et explore les interactions entre ces différentes composantes. Chaque fonction sera décrite selon son rôle, ses objectifs, ses enjeux, ainsi que les défis spécifiques qu'elle soulève dans le cadre d'une gestion intégrée et performante de la Supply Chain.

L'objectif est de fournir une base conceptuelle solide pour appréhender les problématiques plus complexes abordées dans les chapitres suivants, notamment celles liées à l'intégration de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle dans la logistique moderne.

1. Chaîne Logistique

1.1 Introduction

La chaîne logistique, également appelée Supply Chain, est aujourd'hui reconnue comme l'un des piliers fondamentaux de la performance organisationnelle, tant dans le secteur industriel que dans les services. Longtemps cantonnée à des fonctions d'exécution comme le transport ou la manutention, la logistique a connu une profonde transformation au fil des décennies. Historiquement, le mot « logistique » est apparu en France au XVIIIe siècle dans un contexte militaire, où il désignait les opérations de soutien aux armées : ravitaillement en armes, vivres, équipements. Ce n'est que plus tard que ce terme a été adopté dans le monde industriel, pour désigner les fonctions liées à la circulation des marchandises. Jusque dans les années 1970, la logistique occupait une place marginale dans la gestion d'entreprise. Elle était perçue comme une fonction subalterne, centrée sur l'expédition et le stockage, sans réelle valeur stratégique.

L'évolution des marchés, la mondialisation des échanges et l'exigence croissante des clients ont progressivement fait émerger une vision plus globale de la logistique. À partir des années 1990, celle-ci s'impose comme une fonction centrale, intégrée à la stratégie de l'entreprise, et structurée autour de la gestion coordonnée des flux de matières, d'informations et de finances. La logistique devient alors un vecteur de compétitivité, un levier d'optimisation des ressources, et un garant de la qualité de service client. Ce glissement sémantique et fonctionnel conduit à la formalisation du concept de « chaîne logistique », entendu comme un système complexe, multi-acteurs et multidimensionnel, qui relie l'ensemble des maillons nécessaires à la création, la transformation et la livraison d'un produit ou d'un service [1] comme le démontre la Fig1.

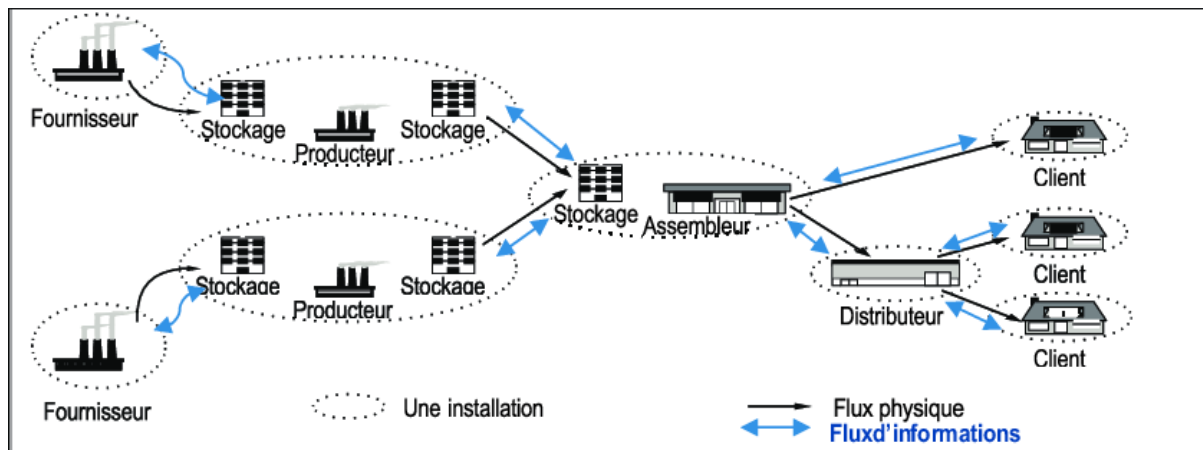


Figure 1: Relations clients/fournisseurs d'une chaîne logistique

La chaîne logistique est aujourd'hui définie comme un réseau d'acteurs et de processus couvrant l'ensemble du cycle de vie d'un produit, depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'aux clients finaux, en passant par les fabricants, les distributeurs, les prestataires logistiques, les détaillants et parfois les services de recyclage. Elle repose sur trois types de flux indissociables : les flux physiques, qui correspondent au déplacement des produits ; les flux d'information, qui assurent la coordination et la traçabilité des opérations ; et les flux financiers, qui traduisent les échanges monétaires entre les parties prenantes. Ces flux doivent être pilotés de manière cohérente et intégrée afin d'assurer la fluidité, la rentabilité et la durabilité de la chaîne.

Plusieurs modèles ont été développés pour structurer la représentation de la chaîne logistique. Le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference Model) qui figure dans la Fig2, proposé par le Supply Chain Council, distingue cinq grands processus fondamentaux : planification, approvisionnement, fabrication, livraison et gestion des retours.

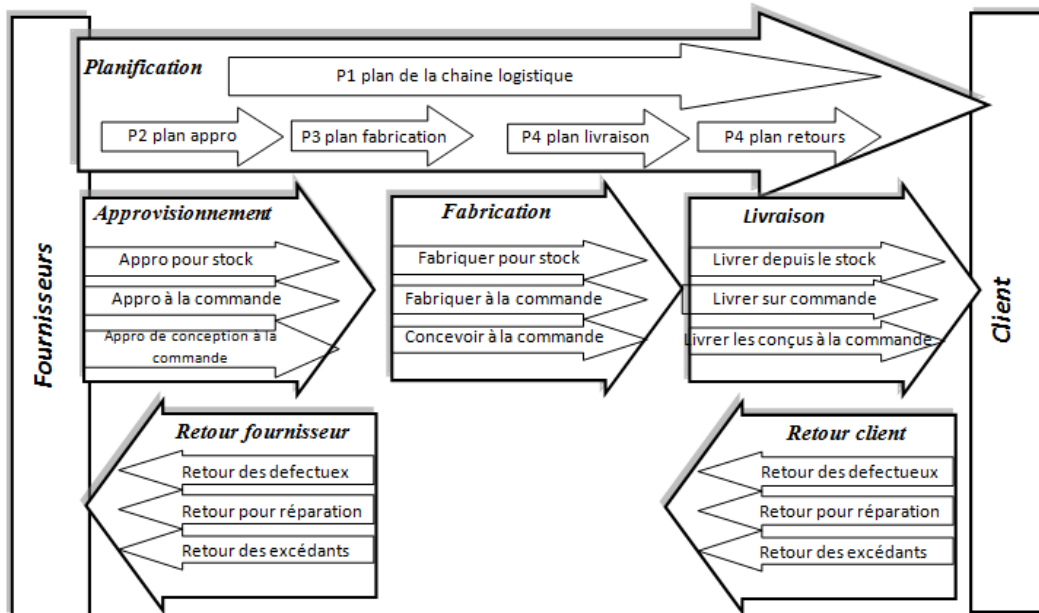


Figure 2: Modèle SCOR

Ce modèle met en évidence l'importance de la standardisation des processus et de la mesure de la performance. Le modèle proposé par Kearney dans la Fig3, quant à lui, insiste sur la complémentarité entre la gestion des flux physiques et la gestion de la demande, en intégrant les fonctions de conception, de vente et de soutien logistique. Ces approches permettent de mieux comprendre la complexité systémique des chaînes logistiques, ainsi que les interactions entre les différents niveaux décisionnels.

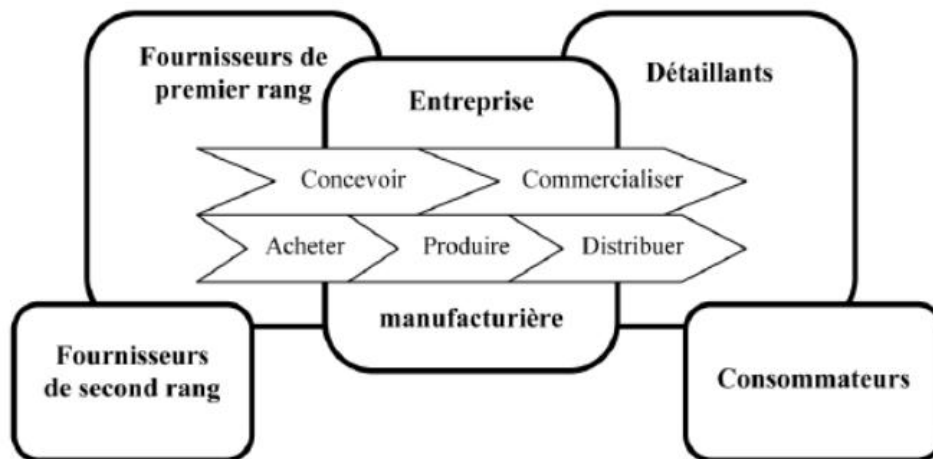


Figure 3: Modèle de chaîne logistique de Kearney

La chaîne logistique peut être appréhendée selon différents niveaux d'intégration comme la montre la Fig4. Une première approche, dite « interne », considère les fonctions successives au sein d'une même entreprise (achat, production, distribution) comme une chaîne logistique autonome. Une deuxième approche, plus large, s'intéresse à la relation entre un fournisseur et son client direct, constituant ainsi une chaîne logistique intégrée. Enfin, la vision collaborative étend la chaîne au-delà des frontières de

l'entreprise, pour inclure les fournisseurs des fournisseurs et les clients des clients. Cette approche systémique permet de prendre en compte l'ensemble des interdépendances qui existent entre les acteurs, ainsi que les effets de propagation qu'une perturbation locale peut engendrer sur la performance globale de la chaîne.

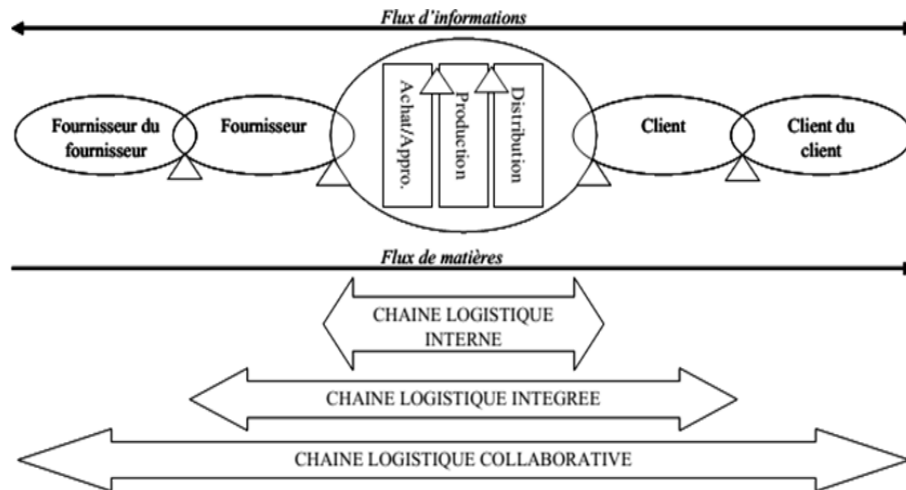


Figure 4 : Différentes approches de la chaîne logistique

L'un des éléments essentiels du bon fonctionnement d'une chaîne logistique réside dans le pilotage efficace de ses trois grands flux comme dans la Fig5. Le flux physique regroupe toutes les opérations liées au transport, au stockage, à la manutention et à la livraison des marchandises. Il constitue le cœur visible de la logistique, mais ne saurait fonctionner sans les deux autres types de flux. Le flux d'information, de plus en plus central avec le développement des technologies numériques, permet de synchroniser les opérations, d'anticiper la demande, de suivre les niveaux de stock, et de renforcer la traçabilité des produits. Il comprend notamment les bons de commande, les prévisions, les notifications d'expédition, et les données de production. Enfin, le flux financier reflète les mouvements monétaires associés aux transactions commerciales : paiements, remises, facturations, crédits interentreprises. L'équilibre entre ces trois flux conditionne la performance économique et opérationnelle de la chaîne.

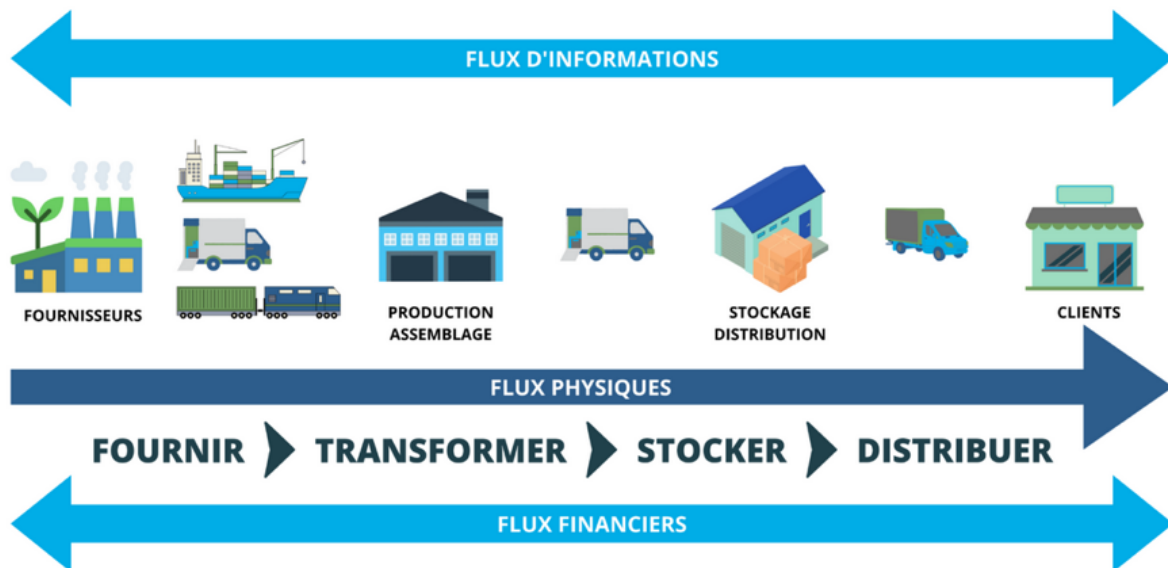


Figure 5 : Types de flux logistique

Dans un contexte marqué par l'instabilité des marchés, les crises sanitaires, les tensions géopolitiques et les exigences croissantes en matière de durabilité, la chaîne logistique apparaît comme un système vulnérable mais aussi résilient. Pour y faire face, les entreprises doivent adopter des solutions innovantes et intégrées, capables de renforcer la visibilité, la réactivité et l'agilité de leurs chaînes. C'est pourquoi l'intégration de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets, la blockchain ou les jumeaux numériques devient aujourd'hui incontournable. Ces outils permettent non seulement d'automatiser certaines tâches, mais aussi d'anticiper les perturbations, de réduire les coûts et les émissions, et de construire des chaînes logistiques plus intelligentes, plus écologiques et plus collaboratives.

Ainsi, la chaîne logistique n'est plus une simple structure linéaire de production et de distribution, mais un écosystème complexe, interdépendant, évolutif et stratégique. Sa maîtrise constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la performance, la compétitivité et la durabilité des entreprises, en particulier dans un monde où la pression sur les ressources, la rapidité des échanges et les attentes sociétales ne cessent de croître.

1.2 Fonctions de la chaîne logistique

La chaîne logistique repose sur un enchaînement structuré de fonctions interdépendantes, dont la coordination conditionne la fluidité des flux, la qualité du service client et la performance globale du système. Ces fonctions couvrent l'ensemble du cycle de vie du produit, depuis son acquisition en matières premières jusqu'à sa mise à disposition finale auprès du consommateur. Les principales fonctions de la chaîne logistique comprennent l'approvisionnement, la production, le stockage, la distribution et la vente. Chacune de ces étapes joue un rôle stratégique et opérationnel dans la création de valeur, la maîtrise des coûts et l'alignement avec les attentes du marché.

- **Approvisionnement**

L'approvisionnement représente l'étape initiale de la chaîne logistique, celle qui conditionne l'ensemble des opérations subséquentes. Il s'agit du processus par lequel une entreprise se procure les matières premières, les composants, ou encore les services nécessaires à la fabrication de ses produits ou à l'exécution de ses prestations. Loin d'être une simple fonction d'achat, l'approvisionnement est aujourd'hui reconnu comme un levier stratégique de performance. Les coûts liés à l'approvisionnement peuvent représenter entre 60 % et 70 % du coût global des produits finis dans la majorité des industries manufacturières. Cela signifie que toute amélioration, même marginale, dans la gestion de cette fonction peut générer un impact significatif sur la rentabilité globale de l'entreprise.

La fonction d'approvisionnement ne se limite pas à la négociation des prix. Elle englobe également le choix des fournisseurs, l'évaluation de leurs performances, la gestion des contrats, la sécurisation des sources d'approvisionnement et la planification des besoins en lien avec les prévisions de production. Elle est aussi étroitement liée à la gestion des risques, notamment en matière de dépendance fournisseur, de délais d'acheminement, de ruptures de stock, ou d'événements géopolitiques affectant les chaînes mondiales. Comme le souligne Harmon (1992), la fiabilité et la rapidité de la livraison des fournisseurs influencent davantage les niveaux de stock et la qualité de service que le temps de fabrication proprement dit. Ainsi, un système d'approvisionnement bien piloté permet non seulement de réduire les coûts, mais aussi de minimiser les incertitudes et de garantir une meilleure réactivité de la chaîne face aux fluctuations de la demande.

- **Production**

La fonction de production occupe une place centrale dans le fonctionnement de la chaîne logistique. Elle regroupe l'ensemble des activités de transformation de matières premières ou semi-finis en produits finis, prêts à être livrés aux clients. Cette fonction incarne le noyau de création de valeur pour de nombreuses entreprises industrielles, car c'est à ce stade que s'opèrent l'assemblage, le façonnage, l'usinage, le conditionnement, ou encore la configuration des produits. La performance de la production influence directement la compétitivité de l'entreprise, à travers des indicateurs comme les coûts de fabrication, les délais de cycle, la qualité des produits et la capacité à répondre aux demandes spécifiques.

La capacité de production, c'est-à-dire le volume que peut produire une entreprise dans un laps de temps donné, joue un rôle crucial dans l'agilité logistique. Une capacité élevée, voire surdimensionnée, permet de faire face rapidement à une hausse soudaine de la demande ou à une commande urgente, ce qui constitue un avantage concurrentiel en matière de réactivité. Cependant, cette stratégie génère également des coûts fixes importants lorsque la capacité n'est pas pleinement utilisée. À l'inverse, une capacité

trop limitée engendre des risques de saturation, des retards de livraison, une perte d'opportunités commerciales, voire une détérioration de la satisfaction client. Le défi réside donc dans le dimensionnement optimal de la capacité, qui permet de concilier efficacité économique, flexibilité opérationnelle et adaptation aux variations du marché.

Par ailleurs, la production doit être pensée en interaction avec les autres fonctions logistiques. Elle doit être synchronisée avec l'approvisionnement pour éviter les ruptures de composants, avec le stockage pour limiter les encours, et avec la distribution pour garantir la livraison dans les délais. L'intégration de concepts comme la production « juste à temps » (JAT), la fabrication modulaire, ou encore les systèmes de pilotage en flux tirés permet aujourd'hui d'améliorer considérablement la performance globale de cette fonction au sein de la chaîne logistique.

- **Stockage**

Le stockage constitue une fonction tampon au sein de la chaîne logistique. Il permet de maintenir une disponibilité continue des produits tout au long du processus, en comblant les écarts temporels entre les différentes étapes (approvisionnement, production, distribution). Il englobe plusieurs niveaux : le stock de matières premières, le stock de composants, le stock d'en-cours de production, et le stock de produits finis. Ces stocks sont disséminés chez les différents acteurs de la chaîne (fournisseurs, producteurs, entrepôts, distributeurs), chacun jouant un rôle spécifique dans la fluidité des flux.

La fonction de stockage est au cœur d'un paradoxe logistique classique : plus les stocks sont importants, plus la chaîne est réactive face à une demande variable ; mais plus ils sont coûteux à maintenir et risqués à gérer. Le stockage mobilise des ressources financières (immobilisation de capital), humaines (gestion, manutention) et matérielles (entrepôts, systèmes de surveillance), tout en étant exposé à des risques d'obsolescence, de dépréciation ou de péremption. Dans les secteurs à forte rotation technologique ou à cycles courts, des volumes mal anticipés peuvent devenir rapidement invendables. Cela entraîne non seulement une perte économique, mais aussi une dégradation de la performance environnementale, par la génération de déchets ou de surplus inutilisables.

Aujourd'hui, la tendance est à la rationalisation des stocks à travers l'adoption de systèmes comme le juste-à-temps, la mutualisation des entrepôts, l'externalisation logistique, ou encore l'automatisation des centres de stockage. L'essor de technologies telles que les entrepôts intelligents, les solutions de gestion des stocks en temps réel (WMS), et l'analyse prédictive permet d'optimiser le niveau de stock de sécurité, de réduire les coûts associés, et d'améliorer la visibilité sur les flux amont et aval. Le stockage devient ainsi une fonction de régulation, à la croisée des impératifs économiques, opérationnels et stratégiques.

- Distribution et transport

La distribution et le transport représentent la fonction logistique de mise à disposition, celle qui assure le transfert physique des produits vers les points de consommation. Ces activités s'exercent à toutes les étapes de la chaîne : transport des matières premières vers les usines, des composants entre unités de production, des produits finis vers les entrepôts ou plateformes logistiques, et enfin vers les clients finaux. Cette fonction, souvent visible pour le client, joue un rôle décisif dans la perception de la qualité de service.

Le transport constitue également un poste de coût important, qui peut représenter entre 5 % et 15 % du coût final du produit selon le secteur d'activité. Le choix du mode de transport influence à la fois les délais, la flexibilité, le coût et l'impact environnemental. Le transport aérien est rapide mais onéreux et polluant, le transport ferroviaire est économique et adapté au transport massif, tandis que le transport routier reste le plus répandu pour sa flexibilité, notamment pour le dernier kilomètre. Dans une logique d'efficacité, de nombreuses entreprises adoptent aujourd'hui des stratégies multimodales, combinant différents moyens de transport selon les contraintes de coûts, de délais, de géographie et de durabilité.

La distribution, quant à elle, comprend l'organisation des flux sortants, la gestion des tournées, la localisation des centres logistiques, ainsi que les choix d'externalisation. Elle est au cœur des stratégies omnicanales, en particulier dans le secteur du e-commerce, où la réactivité, la fiabilité et la traçabilité des livraisons constituent un avantage concurrentiel décisif. La distribution et le transport doivent donc être alignés avec les objectifs commerciaux de l'entreprise, tout en s'adaptant aux mutations réglementaires, technologiques et sociétales.

- Vente

La vente constitue la fonction terminale de la chaîne logistique, celle par laquelle la valeur créée est effectivement captée et monétisée. Elle représente l'interaction directe avec le client, et dépend donc étroitement de la qualité de l'exécution des fonctions amont. Une logistique performante – en termes d'approvisionnement, de production, de stockage et de livraison – permet à la force de vente d'agir avec des avantages compétitifs tangibles : disponibilité produit, délais réduits, prix optimisés, qualité perçue.

Dans le cas contraire, une mauvaise gestion logistique pénalise directement la vente : retards, ruptures de stock, hausses de coûts, insatisfaction client. Cela se traduit par une baisse des marges, des réclamations, une perte de parts de marché, voire une atteinte à la réputation. La fonction vente est donc à la fois le point d'aboutissement des efforts logistiques, et un point de départ pour une boucle d'amélioration continue, grâce à la collecte d'informations marché, la remontée des besoins clients, et l'analyse des tendances de consommation.

Par ailleurs, dans un contexte de forte concurrence et de pression sur les prix, la vente ne peut réussir que si la chaîne logistique est suffisamment agile pour proposer des offres différenciées, des services personnalisés, et des expériences client cohérentes. Elle devient alors une interface stratégique entre l'entreprise et son environnement, permettant d'ajuster en temps réel les prévisions, les politiques tarifaires et les choix de distribution.

2. Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) désigne l'ensemble des techniques permettant à des systèmes informatiques de simuler des capacités humaines telles que l'apprentissage, le raisonnement ou la perception. Elle occupe aujourd'hui une place centrale dans de nombreux domaines, grâce à l'essor du traitement des données massives, à la puissance de calcul disponible, et à l'évolution des algorithmes.

Parmi ses branches les plus utilisées, l'apprentissage automatique (machine Learning) permet aux systèmes d'apprendre à partir de données, tandis que l'apprentissage profond (deep Learning), basé sur des réseaux de neurones, a révolutionné des applications comme la vision par ordinateur. Les réseaux convolutifs (CNN) sont devenus incontournables pour l'analyse d'images, et les transformateurs, initialement conçus pour le traitement du langage naturel, sont aujourd'hui utilisés dans des systèmes intelligents génératifs.

Cette partie présente les principales bases théoriques et techniques de l'IA mobilisées dans cette recherche, en lien avec le traitement d'images et l'optimisation des systèmes logistiques intelligents.

2.1 Bases de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique

L'intelligence artificielle (IA) regroupe un ensemble de théories, de méthodes et de technologies visant à permettre à des machines de simuler des fonctions cognitives humaines telles que la perception, le raisonnement, l'apprentissage ou la prise de décision. L'un des domaines les plus actifs et les plus appliqués de l'IA aujourd'hui est l'apprentissage automatique (machine learning), qui permet aux systèmes informatiques d'apprendre à partir de données, sans être explicitement programmés pour chaque tâche.

L'apprentissage automatique repose sur l'idée qu'un modèle peut découvrir des régularités, des motifs ou des corrélations dans un ensemble de données, et ainsi généraliser ses connaissances pour traiter de nouvelles situations. Plutôt que de suivre un ensemble rigide de règles, l'algorithme apprend des exemples passés, ajuste ses paramètres internes, et améliore progressivement ses prédictions ou classifications. On distingue principalement trois types d'apprentissage représentée dans la Fig6 :

L'apprentissage supervisé consiste à entraîner un modèle à partir d'un ensemble de données étiquetées. Chaque exemple est associé à une sortie cible (classe ou valeur numérique), ce qui permet à l'algorithme

d'apprendre une fonction de prédiction. C'est le cas, par exemple, pour la classification des panneaux de signalisation ou la prédiction de temps de livraison.

L'apprentissage non supervisé s'applique à des données non étiquetées. L'objectif est alors de détecter des structures cachées, des regroupements ou des régularités au sein des données, comme le clustering des trajets similaires ou la segmentation des profils de conduite.

L'apprentissage par renforcement est basé sur un mécanisme de récompense. Un agent autonome interagit avec un environnement et apprend par essais-erreurs en maximisant une fonction de gain. Cette approche est particulièrement utile pour l'optimisation dynamique des itinéraires logistiques ou la gestion adaptative du trafic.

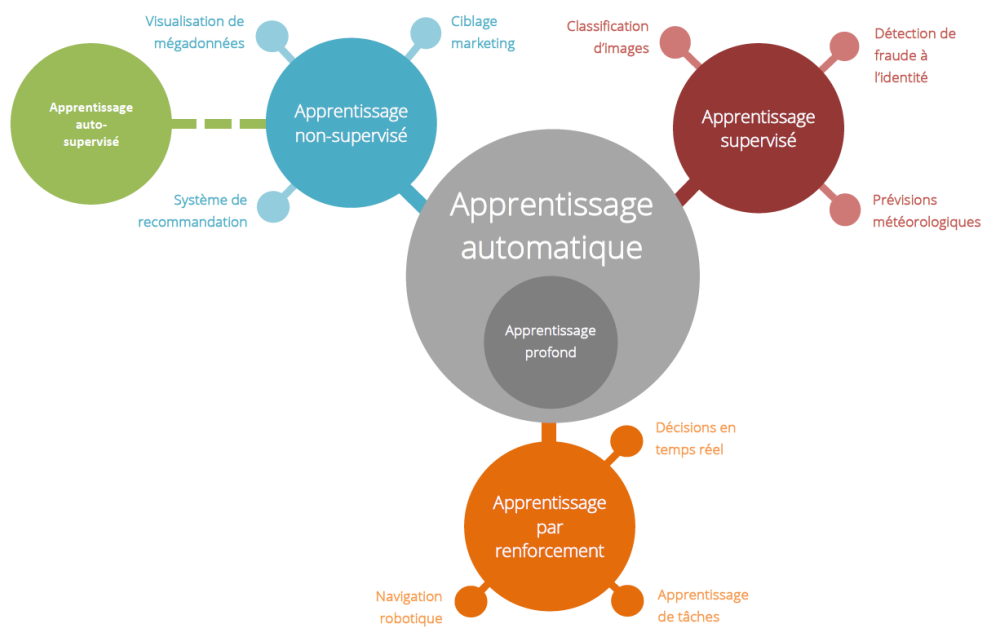


Figure 6 : Vue d'ensemble des types d'apprentissage automatique

L'efficacité de l'apprentissage automatique repose sur la qualité des données, la pertinence des caractéristiques extraites, le choix des algorithmes, et les mécanismes d'évaluation. Il constitue aujourd'hui un socle fondamental pour de nombreux systèmes intelligents, notamment dans le domaine de la logistique, où il permet l'automatisation des processus décisionnels, l'anticipation des besoins, la détection d'anomalies, ou encore l'optimisation en temps réel des flux.

Dans le cadre de cette recherche, les techniques d'apprentissage automatique constituent la base de la solution NW Logistics-Tracker, qui utilise ces méthodes pour capter, modéliser et interpréter des données logistiques hétérogènes (images, temps de parcours, comportements routiers), en vue d'améliorer à la fois la performance, la sécurité et la durabilité de la logistique routière.

2.2 Réseaux de neurones artificiels et apprentissage profond

Les réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks – ANN) sont des structures mathématiques inspirées du fonctionnement biologique du cerveau humain. Un neurone artificiel reçoit une ou plusieurs entrées, leur applique des poids, les additionne, puis soumet le résultat à une fonction d'activation qui détermine la sortie. Ces neurones sont organisés en couches successives : la couche d'entrée qui réceptionne les données brutes, une ou plusieurs couches intermédiaires dites « cachées » où se fait l'extraction de représentations abstraites, et une couche de sortie qui délivre le résultat final du modèle. L'apprentissage s'effectue par ajustement itératif des poids grâce à un algorithme d'optimisation, généralement la rétropropagation de l'erreur combinée à une descente de gradient. La structure typique de ce type de réseau est illustrée dans la Fig7 ci-dessous.

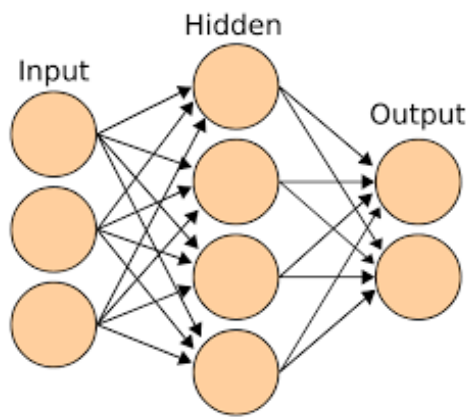


Figure 7 : Architecture classique d'un réseau de neurones artificiels (ANN) avec couche d'entrée, couches cachées et couche de sortie.

L'apprentissage profond (deep Learning) constitue une évolution des réseaux de neurones classiques, caractérisée par une architecture composée d'un grand nombre de couches cachées. Cette profondeur permet au modèle de capter des patterns complexes, non linéaires, et souvent invisibles à l'œil humain. Plus les données traversent les couches, plus les représentations deviennent abstraites, allant de motifs simples à des concepts de haut niveau. Cette propriété rend le deep Learning particulièrement performant pour les données volumineuses, bruyantes et non structurées, telles que les images, les vidéos ou les séries temporelles.

Dans le domaine de la logistique, ces modèles jouent un rôle central dans l'analyse prédictive et la gestion intelligente des flux. Ils permettent par exemple de prévoir la demande en fonction de données historiques et de facteurs contextuels tels que la météo ou la saisonnalité. Ils sont aussi utilisés pour détecter des anomalies dans les processus de livraison ou dans le comportement des conducteurs, anticiper les pannes à travers des capteurs embarqués, ou encore adapter dynamiquement les tournées. Dans le cadre du projet NW Logistics-Tracker, les réseaux de neurones profonds contribuent à la mise en œuvre de modules prédictifs visant à optimiser la prise de décision, améliorer la sécurité des trajets,

et réduire les émissions par une meilleure allocation des ressources et un suivi intelligent du comportement routier.

2.3 Réseaux de neurones convolutifs pour le traitement d'images

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN – Convolutional Neural Networks) représentent une catégorie spécifique de réseaux de neurones conçue pour exploiter la structure spatiale des images. Contrairement aux architectures entièrement connectées, où chaque neurone est relié à tous les neurones de la couche suivante, les CNN privilégient des connexions locales via des filtres appelés « noyaux de convolution ». Ces filtres balayent les images pour détecter automatiquement des motifs visuels tels que des bords, des textures, des formes ou des orientations. Ces premières couches de détection sont ensuite suivies de couches de regroupement spatial (pooling), qui compressent les informations tout en conservant leur signification, puis de couches entièrement connectées qui synthétisent l'ensemble des informations extraites pour effectuer une classification ou une prédiction. La Fig8 suivante montre une vue d'ensemble d'un réseau convolutif typique.

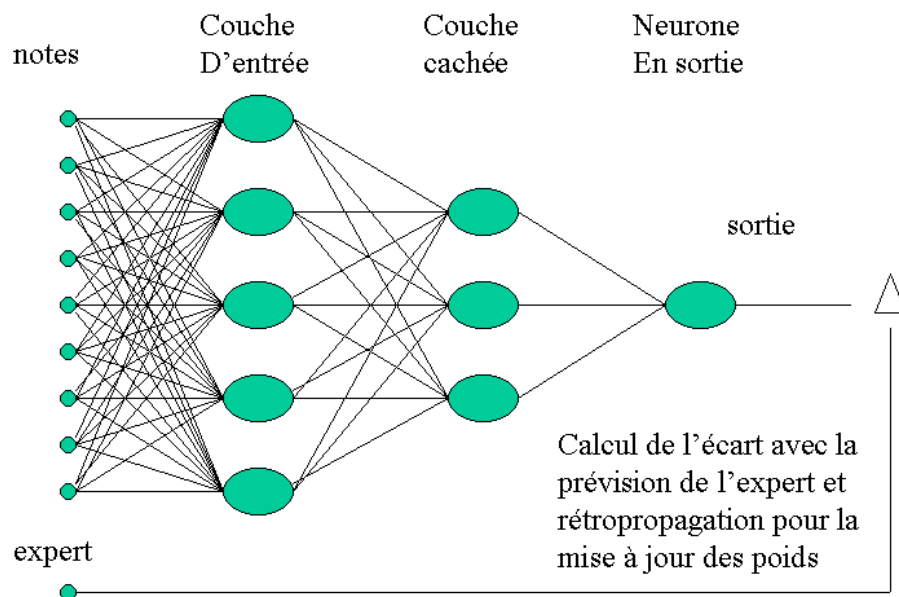


Figure 8 : Architecture d'un CNN

Grâce à cette structure hiérarchique, les CNN sont capables d'extraire progressivement des caractéristiques de bas niveau (pixels) vers des concepts de haut niveau (objets ou comportements). Ce type de réseau est aujourd'hui incontournable dans toutes les applications de vision par ordinateur. Dans le domaine logistique, il permet notamment de reconnaître les panneaux de signalisation, de détecter les dépassements non autorisés, ou encore d'identifier des comportements routiers à risque à partir des images captées par les caméras embarquées. Un exemple concret de l'application des CNN à la reconnaissance de panneaux est illustré dans la Fig9 ci-dessous.

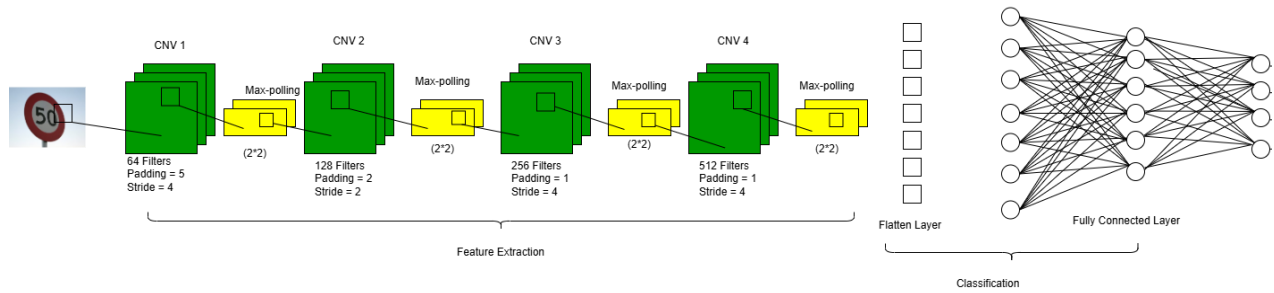


Figure 9 : Traitement d'image par un CNN pour la reconnaissance automatique de panneaux de signalisation.

2.4 Transformateurs dans l'intelligence artificielle générative

Les transformateurs (transformers) ont profondément bouleversé l'architecture des réseaux utilisés pour traiter des données séquentielles. Introduits par Vaswani en 2017, ils reposent sur un mécanisme appelé « attention » plus précisément self-attention qui permet à chaque élément d'une séquence de prendre en compte tous les autres éléments de cette même séquence, en pondérant leur influence relative. Cette approche remplace les architectures traditionnelles comme les réseaux récurrents (RNN) ou les LSTM, en éliminant leurs limitations en termes de parallélisation et de dépendance à court terme. La structure générale d'un modèle transformateur est représentée dans la Fig10 suivante.

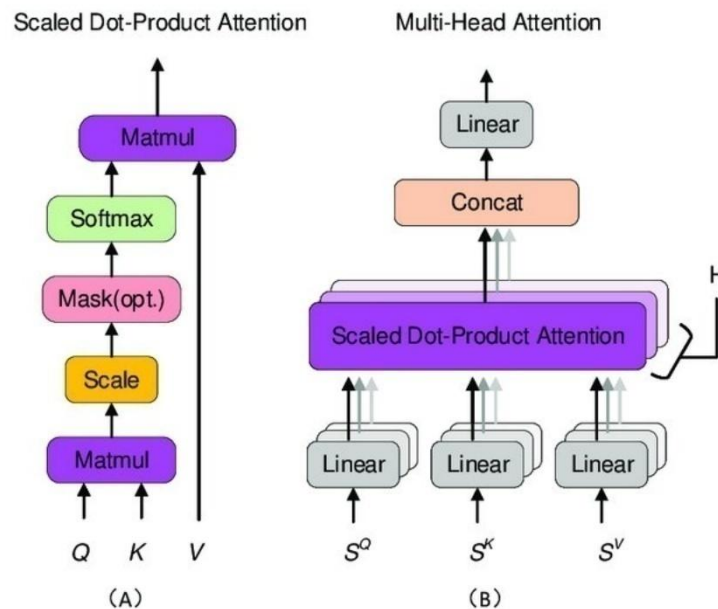


Figure 10 : Fonctionnement du self-attention dans un transformateur, illustrant la pondération contextuelle.

Les transformateurs ont connu un succès retentissant dans le traitement du langage naturel (NLP), avec des modèles comme BERT, GPT, T5, ou encore les transformateurs visuels (ViT) pour l'analyse d'images. Leur architecture modulaire les rend adaptables à une grande variété de tâches : classification, génération, traduction, résumé, question-réponse, ou encore création de contenus visuels ou sonores. En logistique, ces capacités sont exploitées pour automatiser des tâches complexes telles que la rédaction de rapports d'intervention, la synthèse des événements de tournée, ou encore l'analyse simultanée de

données multimodales (texte, image, signal GPS). Le mécanisme d'attention, élément clé de cette architecture.

Conclusion

Ce premier chapitre a contribué d'établir les fondements conceptuels nécessaires à la compréhension des dynamiques de la chaîne logistique moderne et de son évolution stratégique. Autrefois considérée comme une fonction de soutien limitée au transport et au stockage, la logistique s'est affirmée au fil du temps comme un levier central et un axe primaire de performance, de compétitivité et de résilience pour les entreprises. Cela, qui a été en grande partie favorisé par la mondialisation, la complexité croissante des échanges et l'essor des technologies numériques, a donné naissance au concept élargi de chaîne logistique intégrée, multidimensionnelle et systémique.

L'analyse des fonctions logistiques fondamentales approvisionnement, production, stockage, distribution et vente met en évidence leur interdépendance et leur rôle stratégique dans la création de valeur. Chaque maillon conditionne la fluidité des flux, la satisfaction client et l'efficacité opérationnelle globale. La maîtrise de ces fonctions nécessite une coordination transversale, soutenue par une gouvernance intelligente des flux physiques, informationnels et financiers.

Enfin, l'intégration de l'intelligence artificielle dans les systèmes logistiques marque un tournant décisif. Grâce à l'apprentissage automatique, aux réseaux de neurones, aux CNN et aux transformateurs, l'IA permet désormais d'optimiser les décisions, d'anticiper les aléas, d'améliorer la sécurité routière et de réduire l'impact environnemental. Elle ouvre la voie à une logistique augmentée, plus prédictive, agile et durable.

Cette compréhension approfondie des concepts de base et des technologies émergentes servira de socle pour aborder, dans les chapitres suivants, la conception, l'implémentation et l'évaluation des systèmes logistiques intelligents, notamment à travers la solution innovante NW Logistics Tracke

Chapitre 2 : Tendances émergentes de l'intelligence artificielle dans la logistique routière

Introduction

L'intelligence artificielle (IA) transforme en profondeur le secteur de la logistique routière, en apportant des solutions innovantes aux défis contemporains liés à l'optimisation des flux, à la sécurité, à la réduction des coûts, et à la durabilité environnementale. À l'heure où les entreprises cherchent à gagner en efficacité tout en réduisant leur empreinte carbone, l'IA s'impose comme un levier technologique incontournable pour repenser les modèles logistiques traditionnels.

Ce chapitre propose une analyse approfondie des tendances scientifiques et technologiques qui façonnent l'évolution de l'IA dans la logistique routière. Il débute par une étude bibliométrique, visant à examiner la dynamique de la production scientifique, les thématiques émergentes, et l'évolution de l'intérêt académique pour ce domaine. Cette analyse permet d'identifier les axes de recherche les plus porteurs et de cartographier les contributions majeures dans le champ de l'IA appliquée à la logistique.

La seconde partie du chapitre est consacrée à une revue systématique de la littérature, structurée selon les grands axes d'application de l'IA dans la logistique routière : planification des trajets, gestion de flotte, traitement d'image, reconnaissance du code de la route, détection des comportements de conduite, ou encore mise en œuvre sur le terrain. Chaque sous-section met en lumière les méthodes et technologies mobilisées, les résultats obtenus, ainsi que les limites identifiées.

1. Étude bibliométrique

Pour avoir une vision concise sur le développement des recherches qui impliquent l'intersection de l'intelligence artificielle avec le transport routier, une analyse bibliométrique a été réalisée. Une telle approche permet de diagnostiquer de manière quantifiée les mouvements scientifiques, les nouvelles directions qui émergent, ainsi que les principaux résultats dans un domaine en développement.

La bibliométrie, dans ce cas, se réfère au relevé systématique de publications indexées dans les trois principales bases de données scientifiques : Scopus, Web of Science et OpenAlex. Le processus d'échantillonnage a été réalisé conformément aux directives PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), fig11 et avec des critères d'inclusion restreints : seuls les articles de revues, conférences et collections publiés en anglais entre 1989 et 2025 ont été utilisés. Après la mise en œuvre d'une étape initiale d'identification avec 30 800 documents, suivie d'une phase de dépouillement qui a éliminé les documents en double et hors du champ d'application, 14 500 articles ont été sélectionnés pour l'analyse.

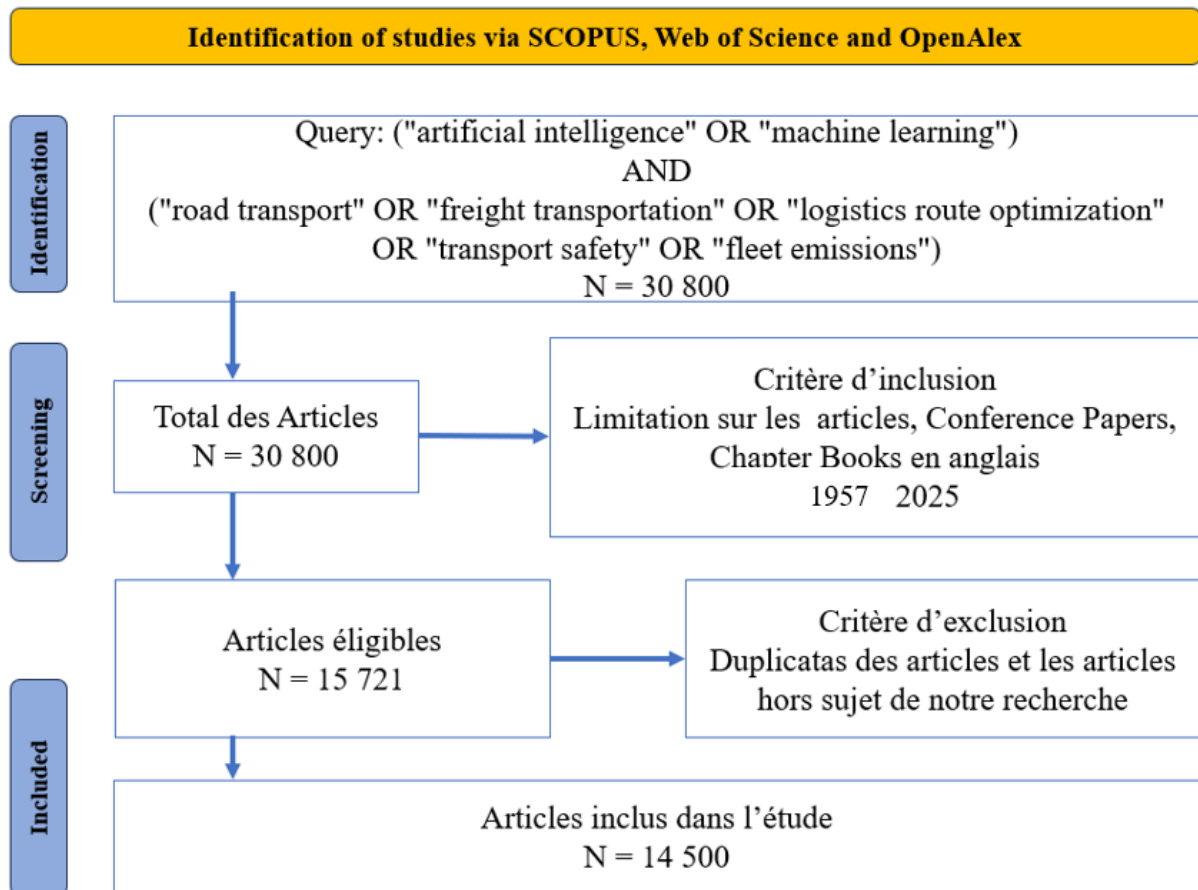


Figure 11 : Approche Prisma

Les métadonnées extraites et figurent dans la fig12 ont permis d'obtenir un ensemble d'indicateurs bibliométriques globaux.

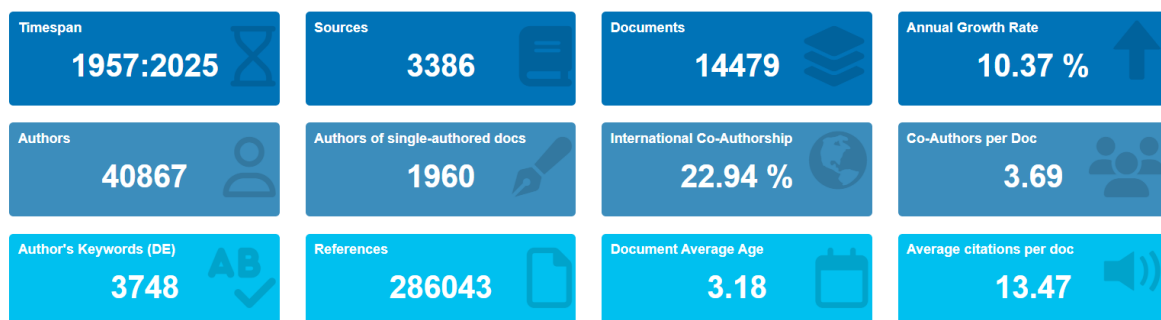


Figure 12 : Vue d'ensemble de la base de données

L'étude couvre une période de 1957 à 2025, avec un taux de croissance annuel moyen de 10,37 % des publications. Un total de 14 479 documents a été indexé, généré par près de 40 867 auteurs issus de 3 386 sources scientifiques distinctes. La collaboration internationale est notable, avec 22,94 % des publications coécrites entre différents pays. L'âge moyen des documents est de 3,18 ans, indiquant une

production scientifique relativement récente et en expansion rapide. Le taux moyen de citations atteint 13,47 citations par document, soulignant un fort impact académique des travaux recensés.

1.1 Dynamique de la production scientifique

La tendance de la production scientifique montrée dans la fig13 met en évidence une évolution spectaculaire de la production scientifique dans le domaine de l'intelligence artificielle appliquée à la logistique routière. Entre 1957 et les années 2000, le nombre d'articles publiés reste marginal, témoignant d'un intérêt scientifique très limité même presque non existant. Ce n'est qu'à partir de 2010 que l'on observe une croissance exponentielle, atteignant un pic significatif autour de 2023.

Cette explosion de publications est corrélée :

- Aux avancées technologiques en deep learning, vision par ordinateur et capteurs intelligents,
- À la montée en puissance des enjeux liés à la durabilité du transport,
- Et à l'intégration massive de l'IA dans la gestion logistique.

Cela confirme que le domaine est devenu une priorité scientifique et industrielle récente mais extrêmement dynamique.

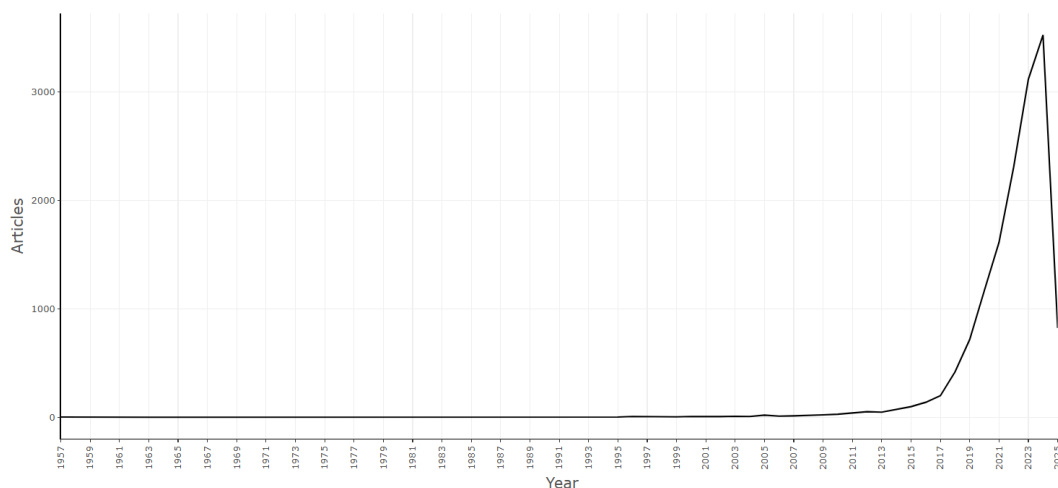


Figure 13 : Dynamique de la production scientifique

1.2 Impact scientifique par année

D'après l'analyse la moyenne des citations par année dans la fig14 on remarque un taux de citation élevé initialement (1957-1970) mais un faible volume de publications. Une stabilisation vers 2000-2015 a suivi, indiquant des travaux initiaux mais sans visibilité immédiate. Un retour progressif depuis 2018 reflète la maturation et l'impact croissant de la recherche en IA sur les transports intelligents, la sécurité et l'optimisation routière. Malgré l'explosion des publications, l'impact moyen reste modéré en raison d'un domaine scientifique encore en cours de structuration et de diversification.

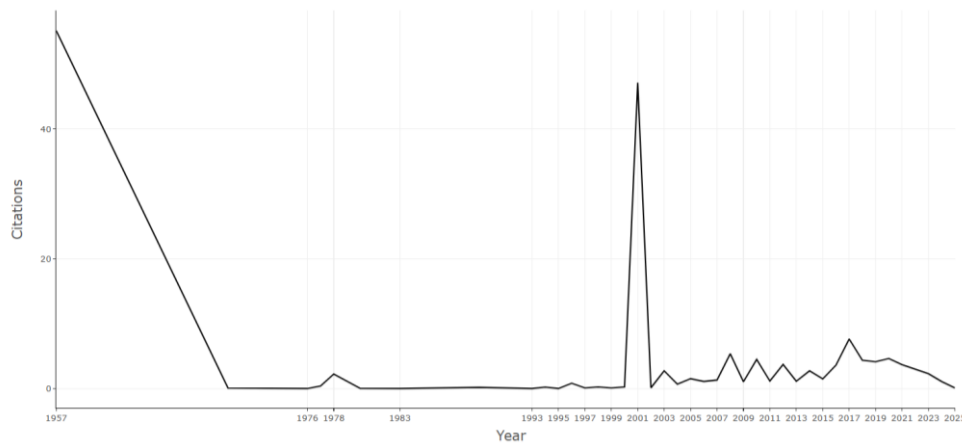


Figure 14 : Évolution des citations moyennes annuelles par article (1957–2025).

1.3 Cartographie thématique des recherches

La Cartographie thématique offre une analyse structurée :

- **Motor Themes** (fortement développés et centraux) : l'intelligence artificielle, le machine learning, les algorithmes de diagnostic.
- **Basic Themes** (importants mais moins développés) : l'intégration du machine learning aux études humaines (comportement des conducteurs, analyse biométrique...).
- **Emerging Themes** (en émergence) : la blockchain et l'optimisation des chaînes logistiques très pertinentes pour la sécurité des données de transport et la traçabilité verte.
- **Niche Themes** : relativement spécialisés, tels que le développement de systèmes d'apprentissage décisionnel.

Cette cartographie dans la fg15 montre clairement que **l'optimisation du transport routier par IA** est en pleine effervescence scientifique, mais aussi qu'il existe des **zones d'innovation peu exploitées** (blockchain-logistique durable) que ta recherche pourrait venir enrichir.

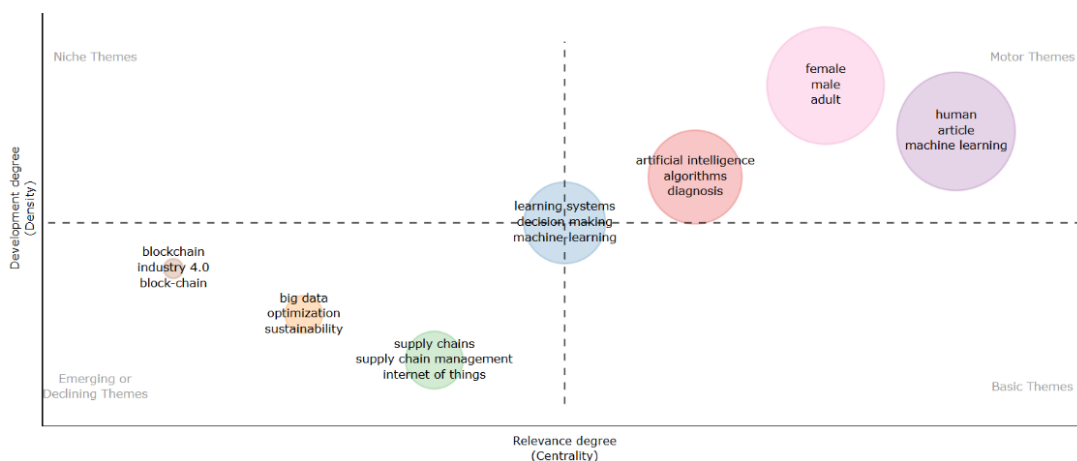


Figure 15 : Cartographie thématique des principales orientations de recherche.

2. Étude de la littérature

L'industrie logistique subit une transformation significative grâce à l'intégration des technologies de l'intelligence artificielle. Alors que le commerce mondial et le commerce électronique continuent de s'étendre, la logistique routière fait face à une pression croissante pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et améliorer la qualité du service [2]. En réponse à ces défis, la logistique intelligente est devenue une direction de développement cruciale pour l'industrie, en tirant parti de l'IA ainsi que d'autres technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), le big data et l'informatique en nuage pour réaliser une transformation intelligente dans diverses opérations logistiques [2][3].

Les capacités de calcul de l'IA ont progressé au point où elles peuvent efficacement augmenter et, dans certains cas, surpasser la prise de décision humaine dans les contextes logistiques. Cette avancée a catalysé ce que beaucoup considèrent comme une tendance irréversible dans l'adoption des technologies logistiques, avec des entreprises leaders dans le monde entier développant des solutions logistiques intelligentes grâce à des efforts de recherche et développement à la fois indépendants et collaboratifs [4]. La mise en œuvre de l'IA dans la logistique a démontré des avantages tangibles, notamment en réduisant les coûts de main-d'œuvre et en améliorant l'efficacité opérationnelle [4].

Les systèmes logistiques modernes sont de plus en plus caractérisés comme des systèmes cyber-physiques où l'IA joue un rôle crucial pour relever les défis fondamentaux liés à l'efficacité temporelle, aux coûts économiques, aux risques de sécurité et à la cybersécurité [5]. Cette intégration technologique soutient des fonctions logistiques critiques, y compris la surveillance en temps réel, la gestion des opérations et les processus de prise de décision [5]. L'industrie logistique connaît actuellement une transition majeure grâce à l'adoption de technologies intelligentes qui intègrent la science des données et les capacités de l'IA telles que l'apprentissage automatique, souvent en collaboration avec des systèmes d'information basés sur l'IoT et la blockchain pour développer une conscience cognitive au sein des systèmes de transport et de logistique [6].

2.1 Avancées technologiques et méthodologiques dans le domaine de la logistique routière

L'intelligence artificielle dans la logistique routière englobe plusieurs approches technologiques adaptées à des défis opérationnels spécifiques. Les méthodes d'apprentissage automatique sont largement utilisées pour des fonctions logistiques critiques, en particulier dans la prévision de la demande où les techniques d'analyse de régression aident les fournisseurs de logistique à faire des prédictions plus précises en intégrant des facteurs externes tels que les tendances démographiques, les développements technologiques et les informations concurrentielles [7][8]. Ces capacités de prévision permettent une meilleure planification de la production et des stratégies de tarification plus efficaces.

L'apprentissage profond est apparu comme une approche puissante pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation logistique. Plusieurs chercheurs ont réussi à appliquer des algorithmes

d'apprentissage profond pour optimiser les itinéraires de distribution logistique en fonction des conditions routières dynamiques. Les stratégies d'optimisation combinatoire neuronale basées sur l'apprentissage par renforcement profond se sont révélées efficaces pour identifier les itinéraires optimaux, tandis que les méthodes d'entraînement robotique en apprentissage profond démontrent une planification de parcours plus rationnelle avec une découverte plus rapide des solutions optimales [9][10]. Des modèles de réseaux auto-codants ont également été développés pour l'optimisation des chemins de distribution logistique, mettant en évidence la polyvalence des applications de l'apprentissage profond dans le secteur [10][11].

Dans le domaine des opérations en temps réel, l'IA apporte des contributions significatives à la prédiction et à la gestion du trafic. Les modèles d'apprentissage profond sont utilisés pour faire des prédictions à court terme des conditions de circulation, permettant aux entreprises de logistique d'adapter dynamiquement leurs stratégies de routage [10][12]. Cette capacité est particulièrement précieuse dans les environnements urbains où les conditions de circulation changent rapidement et de manière imprévisible.

Pour l'optimisation de la livraison du dernier kilomètre, les technologies d'IA s'attaquent aux défis persistants liés à l'efficacité, à l'allocation des ressources et à la qualité du service. L'optimisation des itinéraires de véhicules (VRO) alimentée par l'IA calcule les itinéraires de livraison les plus optimaux, minimisant à la fois les coûts et le temps pour visiter plusieurs emplacements [7][13].

Ces solutions sont particulièrement importantes pour résoudre les inefficacités dans les opérations de dernier kilomètre qui impliquent généralement de nombreux arrêts de courte distance. Des applications d'IA plus sophistiquées combinent différentes approches d'apprentissage pour une gestion logistique améliorée. L'intégration des réseaux neuronaux avec l'apprentissage par renforcement a considérablement amélioré les prévisions de trafic en temps réel et l'automatisation des entrepôts [14]. Des algorithmes spécifiques comme XGBoost et les machines à vecteurs de support (SVM) sont régulièrement déployés pour optimiser les itinéraires de livraison, ce qui se traduit par des temps de transit plus rapides et une réduction de la consommation de carburant, tandis que les algorithmes d'apprentissage par renforcement ajustent dynamiquement les stratégies de routage en fonction des données de circulation en temps réel [14].

En pratique, ces technologies d'IA sont déjà mises en œuvre par les entreprises de logistique. Par exemple, Cargonexx utilise l'IA pour organiser le trafic des camions de fret de manière plus efficace en prédisant les flux de marchandises, tandis que SingPost à Singapour a développé une application qui optimise les itinéraires des véhicules en utilisant l'IA [7][15] (fig16). De telles mises en œuvre améliorent l'intelligence des systèmes de transport dans diverses applications et jettent les bases des technologies de mouvement autonome qui pourraient transformer fondamentalement à la fois la mobilité personnelle et le transport de passagers et de marchandises dans tous les modes [16].

Le rôle de l'IA dans la logistique va au-delà de l'optimisation des itinéraires pour inclure l'analyse prédictive avec une précision exceptionnelle dans les prévisions de demande, réduisant ainsi le gaspillage d'inventaire et augmentant la réactivité de la chaîne d'approvisionnement [14]. Ces modèles d'apprentissage automatique aident les entreprises à anticiper les fluctuations de la demande, à maintenir des niveaux de stock optimaux et à minimiser à la fois les surstocks et les ruptures de stock. Dans la gestion des entrepôts, les systèmes robotiques pilotés par l'IA transforment la gestion des stocks, réduisent les erreurs manuelles et augmentent l'efficacité du débit, tandis que les Véhicules Autonomes Guidés (AGV) et les systèmes de tri alimentés par l'IA facilitent la coordination dans les grands centres de distribution [14].

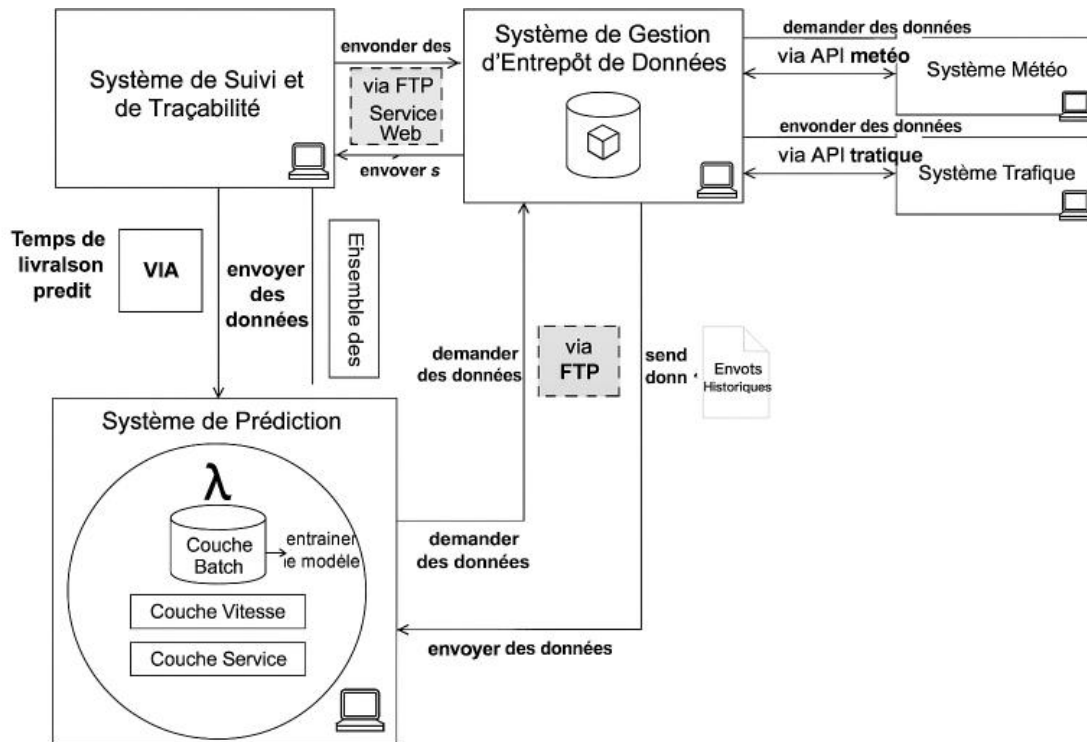


Figure 16 : Architecture pour la Prédiction du Dernier Kilomètre [7].

Alors que le commerce électronique continue de croître, l'IA et l'apprentissage automatique deviennent de plus en plus essentiels pour relever les défis de la logistique du dernier kilomètre, en abordant des problèmes tels que la congestion du trafic, l'occupation de l'espace public et les impacts environnementaux liés à la logistique urbaine [17]. En s'interface avec les modèles traditionnels d'optimisation de l'acheminement des véhicules, les algorithmes d'IA peuvent fournir des prédictions précises basées sur des données historiques pour améliorer l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement, comme la prévision de la demande, l'acheminement et le suivi, tout en détectant les anomalies pendant le processus [17][18].

2.2 Planification et optimisation des trajets

L'optimisation des itinéraires représente l'une des applications les plus impactantes de l'intelligence artificielle dans la logistique routière, où les algorithmes d'IA traitent des variables complexes pour déterminer les itinéraires de livraison optimaux. Les systèmes logistiques modernes exploitent l'IA pour analyser les données de circulation en temps réel, les conditions météorologiques et les fermetures de routes, permettant des ajustements dynamiques des itinéraires qui minimisent les temps de livraison et la consommation de carburant [19]. Ces systèmes de transport intelligents (ITS) basés sur l'IA se concentrent sur la maximisation à la fois du temps et de la valeur de l'information dans les opérations logistiques [20] (fig17).

Les approches d'apprentissage profond se sont révélées particulièrement efficaces pour l'optimisation des itinéraires logistiques dans des conditions routières dynamiques. Les stratégies d'optimisation combinatoire neuronale basées sur l'apprentissage par renforcement profond identifient efficacement les chemins optimaux, tandis que les méthodes d'entraînement robotique démontrent une planification de chemin plus rationnelle avec une découverte plus rapide des solutions optimales [9][10]. Ces approches sont particulièrement précieuses lorsqu'il s'agit de répondre à des demandes clients changeantes et à des conditions de circulation variables, où l'exploration basée sur l'apprentissage permet de fournir des solutions supérieures pour l'optimisation des itinéraires de distribution [10][12].

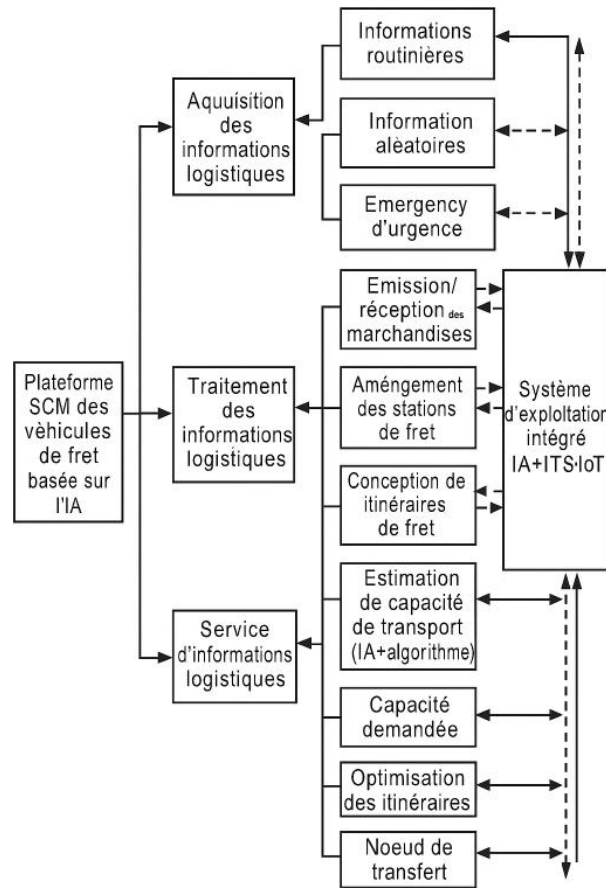


Figure 17 : Structure du système d'information ITS basé sur l'intelligence artificielle [20].

Les applications de l'apprentissage par renforcement au Problème de Routage de Véhicules (VRP) représentent une avancée significative dans la logistique computationnelle. Cette approche permet des solutions de routage plus adaptatives, efficaces et dynamiques qui peuvent améliorer considérablement les opérations logistiques [21]. L'intégration de l'IA avec les technologies de l'Internet des objets (IoT) crée des synergies puissantes pour l'optimisation des itinéraires, répondant aux demandes croissantes d'efficacité et de précision dans les opérations logistiques modernes [22].

Dans les applications pratiques, les algorithmes d'IA optimisent continuellement les itinéraires de transport en intégrant les conditions météorologiques et routières en temps réel. Ces technologies aident les opérateurs logistiques à déterminer le nombre de véhicules nécessaires pour les commandes des clients, à calculer les coûts et les profits de transport, et à créer des conditions de conduite confortables grâce à l'identification des panneaux de signalisation et des situations de circulation [23]. L'application de l'IA dans la logistique du transport de fret a démontré des avantages clairs pour l'optimisation des itinéraires, rendant ces technologies de plus en plus précieuses pour les entreprises de logistique [24].

L'optimisation des itinéraires pilotée par l'IA contribue également de manière significative aux objectifs de durabilité. Dans la logistique de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, par exemple, les technologies de l'IA permettent le partage d'informations à travers la logistique de transport,

décomposent les paramètres d'influence de la consommation d'énergie et planifient des itinéraires de transport optimaux pour réduire l'utilisation d'énergie [25]. De même, les solutions d'IA qui utilisent à la fois l'intelligence prédictive et générative pour l'optimisation des itinéraires et l'allocation des charges utiles réduisent efficacement les coûts et les émissions de CO₂ tout en économisant un temps précieux [26].

La mise en œuvre de la technologie d'intelligence de périphérie, combinée à l'informatique en nuage et à l'IoT, a permis de nouveaux modèles logistiques intelligents qui optimisent les processus de livraison [27][28]. Ces systèmes avancés non seulement améliorent la précision et l'efficacité de la planification des itinéraires logistiques, mais augmentent également de manière significative la satisfaction des clients en répondant de manière flexible aux changements de lieux et de délais de livraison [27].

Les technologies d'apprentissage automatique et d'exploration de données sont de plus en plus utilisées par les entreprises de logistique pour rationaliser les opérations et améliorer l'efficacité. Ces technologies réduisent considérablement les délais de livraison et la consommation de carburant, améliorant ainsi la satisfaction client et la productivité opérationnelle [29][30]. Les algorithmes avancés d'IA traitent les données de circulation en temps réel pour suggérer des itinéraires de livraison optimaux, tandis que la maintenance prédictive alimentée par l'IA et l'IoT aide à identifier de manière proactive les pannes potentielles dans les équipements de transport, minimisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de maintenance [31].

2.3 Application de gestion de véhicules et de flotte

L'IA transforme la gestion de flotte en fournissant des solutions à plusieurs défis persistants dans les opérations de logistique routière. Les gestionnaires de flotte subissent une pression croissante due à la hausse des prix du carburant, aux pénuries de main-d'œuvre et aux exigences écrasantes en matière de gestion des données, mais les systèmes alimentés par l'IA offrent désormais des mécanismes de suivi en temps réel qui fournissent des informations opportunes sur le moment et les méthodes optimales d'expédition. Ces capacités d'analyse multidimensionnelles améliorent l'efficacité énergétique, aident à détecter et à éviter les goulets d'étranglement, et réduisent considérablement les temps d'arrêt imprévus de la flotte, fournissant aux gestionnaires de flotte des outils intelligents pour relever les défis opérationnels quotidiens [32].

La maintenance prédictive représente l'une des applications d'IA les plus précieuses dans la gestion de flotte. En analysant les données des équipements des véhicules, les algorithmes de maintenance prédictive peuvent anticiper les pannes potentielles avant qu'elles ne se produisent, permettant ainsi des interventions préventives qui minimisent les temps d'arrêt coûteux et réduisent les dépenses de maintenance [29][33]. Cette capacité est encore améliorée par des systèmes d'IA conçus pour surveiller en temps réel l'état des composants et leur amortissement, basant les décisions de maintenance sur l'état réel des composants du véhicule plutôt que sur de simples indicateurs de kilométrage [23]

Pour les véhicules autonomes et semi-autonomes, l'IA offre des capacités de gestion sophistiquées. Les véhicules de fret autonomes utilisent des dispositifs alimentés par l'IA qui surveillent en temps réel l'état des composants et traitent les données provenant d'autres véhicules et infrastructures. Ces systèmes prennent en compte les risques de pannes potentiels le long des itinéraires et prévoient les besoins en maintenance [23]. De plus, les algorithmes d'IA contribuent à créer des conditions de conduite plus sûres en identifiant les panneaux de signalisation et les marquages routiers tout en réagissant de manière appropriée aux conditions météorologiques et de circulation [23].

Les capacités de surveillance de l'IA s'étendent au-delà des véhicules eux-mêmes pour englober l'ensemble de l'écosystème de transport. Les algorithmes d'apprentissage automatique extraient des informations précieuses à partir de volumes massifs de données générées par des capteurs, des dispositifs GPS, des systèmes de télématique et même des flux de médias sociaux, offrant une visibilité complète sur le mouvement des marchandises, des véhicules et des ressources à travers les réseaux de transport [34]. Cette surveillance améliorée permet une prise de décision plus efficace dans les opérations logistiques, les systèmes d'IA soutenant les décisions en temps réel sur la navigation, la planification des itinéraires et l'optimisation du trafic [35].

L'IA s'attaque également aux préoccupations critiques en matière de sécurité et de sûreté dans la logistique de transport. De nouveaux cadres de contrôle tolérants aux pannes améliorés par l'IA sont en cours de développement pour traiter à la fois les défaillances physiques et les menaces cybernétiques dans des systèmes logistiques de plus en plus complexes. Ces approches utilisent des algorithmes avancés d'apprentissage automatique et des analyses de données en temps réel pour améliorer la fiabilité, la sécurité et la sûreté grâce à la détection d'anomalies, à la maintenance prédictive et aux capacités de réponse autonome [36].

Au-delà de la gestion des véhicules, l'IA améliore la surveillance des conteneurs et des cargaisons. Les technologies de l'IA peuvent détecter rapidement et précisément les défauts lors de la surveillance de la charge des conteneurs, en identifiant des problèmes tels que les cartons jetés, les palettes en bois éclatées, le mauvais empilement des palettes et les colis non inspectés. En utilisant le traitement d'image et l'apprentissage automatique, ces systèmes alertent automatiquement les opérateurs lorsque des articles semblent endommagés ou mal emballés, réduisant ainsi les dommages aux produits lors des opérations logistiques et améliorant l'expérience client en minimisant les retours [32]. La technologie de vision par ordinateur aide également à diriger les camions vers les places de parking disponibles en surveillant les quais et les parkings, améliorant ainsi l'efficacité des opérations de terminal [32].

Les algorithmes d'IA améliorent également le processus d'emballage lui-même, aidant les entreprises de logistique à concevoir un meilleur emballage pour des produits spécifiques et à sélectionner des matériaux et des tailles de boîtes optimaux. Ces systèmes peuvent également détecter si la cargaison a

été altérée avant l'expédition, réduisant ainsi les problèmes de chaîne d'approvisionnement et les retards [32].

2.4 Optimisation des livraisons et de la logistique

L'intégration de l'intelligence artificielle dans les opérations de chaîne d'approvisionnement et de livraison transforme la manière dont les entreprises de logistique gèrent le flux de marchandises de l'origine à la destination. Les technologies de l'IA, combinées à l'informatique en nuage, aux mégadonnées et à l'Internet des objets (IoT), permettent le développement de systèmes de transport multimodal intelligents qui intègrent les réseaux ferroviaires, autoroutiers et aériens. Cette approche de la "trinité" crée des écosystèmes logistiques complets qui offrent des solutions tout-en-un et à service complet couvrant le transport, l'entreposage, le commerce de marchandises et les services financiers, améliorant ainsi de manière significative la performance de la chaîne d'approvisionnement [37].

Les mises en œuvre réelles de l'IA dans la logistique démontrent déjà des avantages substantiels. Par exemple, Swarm Logistics a développé un système Auto-Dispatcher alimenté par l'IA qui s'améliore continuellement grâce à l'apprentissage automatique. Lorsqu'il a été testé dans une étude de cas pratique, ce système a obtenu des résultats impressionnants, réduisant les coûts de 25 % et livrant les marchandises 35 % plus rapidement par rapport aux méthodes de planification traditionnelles [38]. De même, Siemens Mobility explore des applications avancées du laboratoire numérique ITS qui exploitent les données des véhicules connectés, des systèmes d'infrastructure et des appareils mobiles pour créer un Écosystème de Mobilité Intermodale Équilibré, gérant non seulement les réseaux routiers mais aussi des flottes spécifiques et des voyageurs individuels à travers différents modes de transport [38] (fig18).

Les algorithmes d'IA sont particulièrement précieux pour optimiser les réseaux logistiques complexes qui incluent de nombreux entrepôts et points de vente tout en soutenant les systèmes de livraison directe aux consommateurs. Ces algorithmes aident les entreprises à optimiser leurs ressources financières, matérielles, humaines et temporelles en tenant compte de multiples variables, y compris les conditions météorologiques, les niveaux de congestion routière et les coûts de carburant. Cette capacité permet aux opérateurs logistiques de redistribuer les ressources disponibles pour maximiser les résultats économiques et la satisfaction des clients, ce qui est particulièrement important dans les environnements à ressources limitées [39].

L'impact environnemental des opérations logistiques est également pris en compte grâce aux applications de l'IA. Dans la logistique de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, où le transport génère une consommation d'énergie significative affectant à la fois l'environnement et l'économie de production, les technologies de l'IA permettent le partage d'informations à travers les réseaux logistiques de transport, décomposent les paramètres de consommation d'énergie et planifient des itinéraires optimaux pour réduire l'utilisation d'énergie pendant le transport [25]. Ces avantages en matière de durabilité s'étendent également à d'autres secteurs, les modèles de logistique de transport alimentés par

l'IA aidant à déterminer les profits limites pour les produits tout en résolvant des problèmes de transport complexes grâce à des techniques telles que les algorithmes génétiques flous [40].

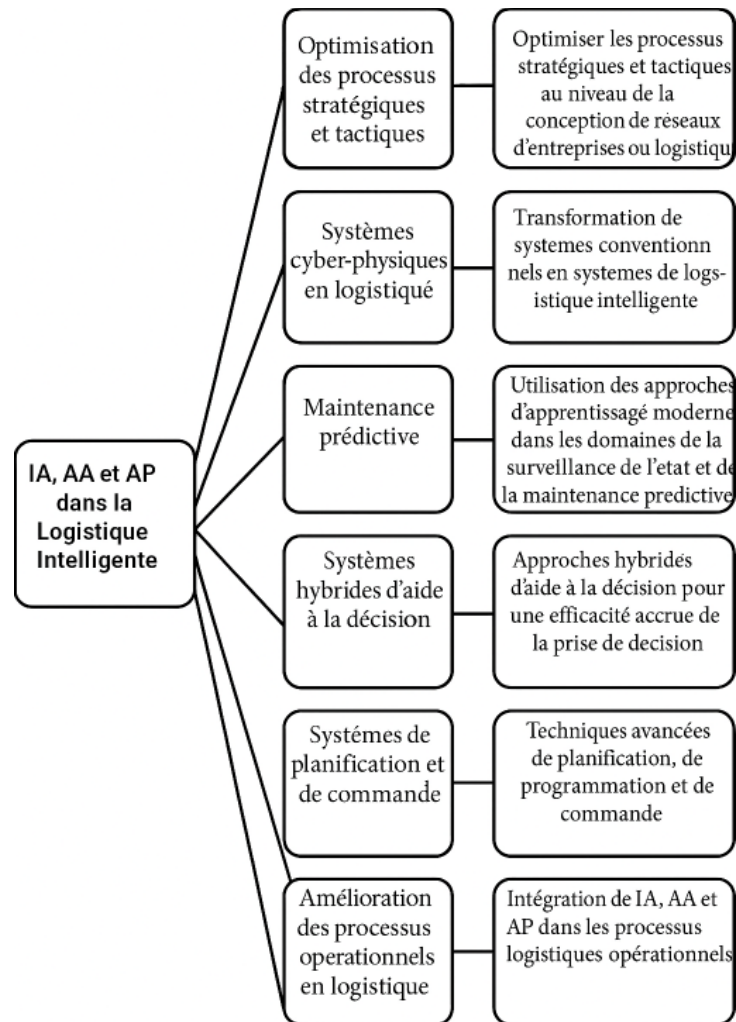


Figure 18 : Cadre conceptuel pour l'IA, le ML et le DL dans la logistique intelligente [38].

La croissance rapide du commerce électronique a encore accéléré le besoin d'IA dans la logistique du dernier kilomètre, car les entreprises font face à une pression croissante pour développer des expériences de livraison personnalisées tout en gérant les impacts sur les environnements urbains, y compris la congestion du trafic, l'occupation des espaces publics et la pollution environnementale [17]. Les approches d'IA et d'apprentissage automatique sont de plus en plus intégrées aux modèles traditionnels d'optimisation de l'acheminement des véhicules, fournissant des prédictions précises basées sur des données historiques pour améliorer les problèmes d'efficacité de la chaîne d'approvisionnement tels que la prévision de la demande, l'acheminement et le suivi, tout en détectant également les anomalies pendant le processus [17][18].

Dans les contextes de transport et de livraison intelligents, les techniques d'IA offrent des opportunités révolutionnaires pour améliorer les approches traditionnelles de la logistique et de la gestion de la chaîne

d'approvisionnement [41]. Les algorithmes d'apprentissage automatique analysent d'énormes quantités de données historiques de livraison pour identifier des motifs, optimiser les itinéraires et prédire la demande avec plus de précision. Les modèles d'apprentissage profond excellent dans le traitement de types de données complexes comme les images et le texte, permettant le tri automatisé des colis, la reconnaissance des véhicules et le traitement du langage naturel pour les demandes des clients. Les algorithmes d'apprentissage par renforcement optimisent la prise de décision dans des environnements dynamiques en apprenant des interactions avec l'écosystème de livraison, créant ainsi des stratégies de livraison plus adaptatives et réactives [41] (fig19).

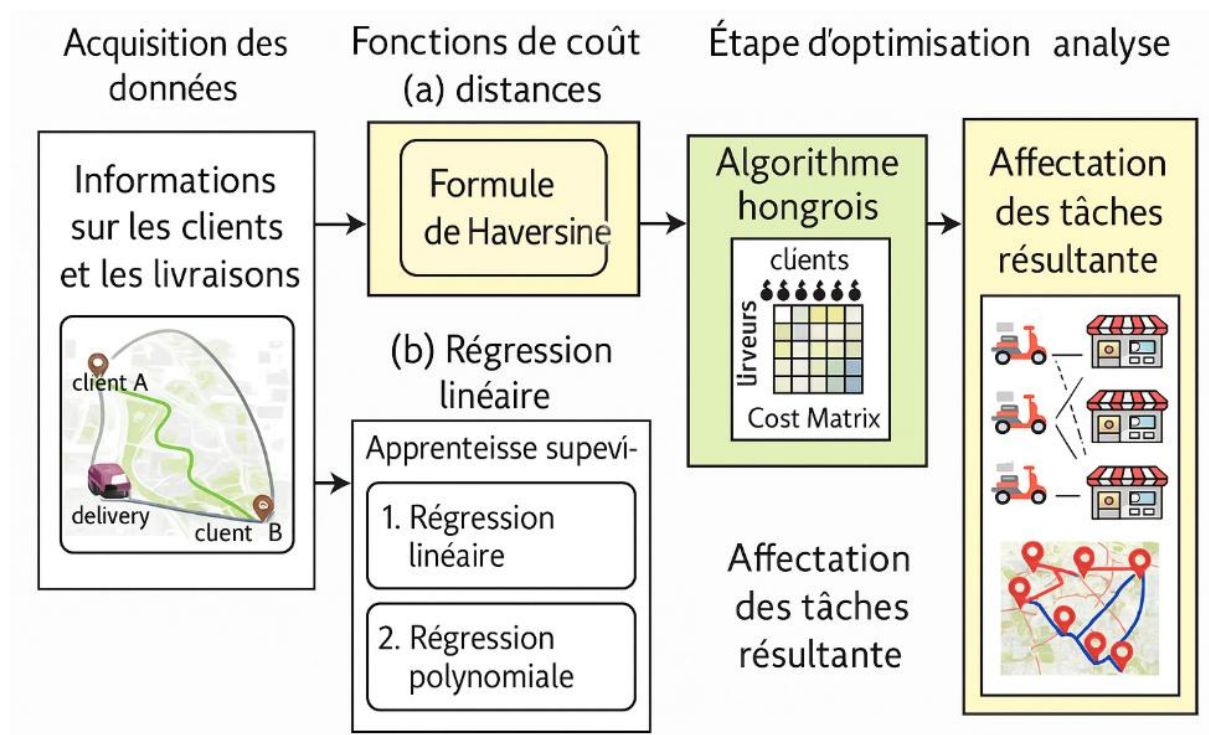


Figure 19 : Architecture proposée pour améliorer l'affectation des livraisons à l'aide de techniques de régression en apprentissage supervisé et de l'algorithme hongrois [41]

L'intégration des systèmes de Commandement, Contrôle, Communication et Intelligence (C3I) basés sur l'IA/ML avec des camions connectés à l'IoT représente une autre frontière dans l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. Ces systèmes intégrés fournissent des informations stratégiques et opérationnelles à travers les environnements logistiques. Les avantages incluent une réduction des temps d'arrêt, une optimisation des itinéraires, une amélioration de la prise de décision et une résilience accrue face aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement [42]. Cette approche holistique de la mise en œuvre de l'IA dans la logistique crée des opérations de chaîne d'approvisionnement plus robustes, efficaces et adaptables, capables de répondre efficacement aux défis dynamiques du commerce moderne.

2.5 Détection d'image dans la logistique routière

La vision par ordinateur dans les systèmes logistiques routiers implique l'utilisation d'images et de vidéos numériques pour permettre aux machines d'identifier et d'interpréter divers éléments dans les environnements de circulation. Cette technologie combine les avancées en traitement d'images, en reconnaissance de motifs, en intelligence artificielle et en apprentissage automatique pour "voir" et comprendre l'environnement routier, tout comme le ferait un conducteur humain [43]. La détection d'objets, une tâche fondamentale de la vision par ordinateur, consiste à détecter des instances de classes spécifiques telles que les humains, les véhicules et les panneaux de signalisation dans des images numériques [44].

Les applications de la vision par ordinateur dans la logistique routière sont vastes et diverses. Les systèmes de transport intelligents utilisent la technologie de détection de cibles pour optimiser la gestion et la planification du trafic, réduisant ainsi la congestion et améliorant l'efficacité de l'utilisation des routes grâce à une analyse en temps réel [45][46]. Dans les contextes de surveillance des véhicules, la vision par ordinateur permet aux systèmes de détecter et de classer les véhicules sur les autoroutes, aidant ainsi à gérer le flux de circulation, à prévenir les accidents et à surveiller les infractions au code de la route [47]. Ces capacités sont devenues de plus en plus importantes car elles contribuent à la transformation significative des systèmes de transport intelligents (STI), aidant à réduire les accidents de la route et la congestion du trafic [48][49].

Pour les systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS) et les véhicules autonomes, la vision par ordinateur fournit des fonctionnalités critiques telles que la détection des voies de circulation, des piétons, des feux de signalisation et des autres véhicules [50]. Ces systèmes aident les véhicules à "voir" et à réagir à leur environnement, permettant une navigation et une prise de décision plus sûres [43][22]. La détection précise des feux de circulation, des panneaux de signalisation et des piétons est essentielle pour éviter les collisions et assurer une conduite autonome sécurisée [44].

L'évolution de la vision par ordinateur dans les transports a été accélérée par les avancées des algorithmes d'apprentissage automatique, en particulier les réseaux neuronaux profonds, ainsi que par l'augmentation de la puissance de calcul et la disponibilité de grands ensembles de données [48][51]. Les systèmes modernes peuvent atteindre des taux de précision remarquables par exemple, les systèmes intégrés combinant la détection de la marque et du modèle du véhicule avec la reconnaissance automatisée des plaques d'immatriculation ont démontré une précision de 97,5 % même dans des conditions environnementales difficiles telles que le brouillard, la pluie et la faible luminosité [52].

Malgré ces avancées, la mise en œuvre de la vision par ordinateur dans la logistique routière fait face à plusieurs défis, notamment les conditions météorologiques variables, les changements d'éclairage et les occlusions [53]. De plus, les systèmes embarqués en temps réel nécessitent souvent des capacités de mémoire et de traitement significatives pour fonctionner efficacement [48]. La recherche en cours

continue de traiter ces problèmes grâce à des techniques de fusion de capteurs, telles que la combinaison des informations radar et caméra pour améliorer la perception de l'environnement dans des conditions météorologiques sévères [22], et par le développement d'algorithmes et d'architectures matérielles plus efficaces [54][55].

2.6 Reconnaissance et détection du code de la route

Les systèmes de détection et de reconnaissance des panneaux de signalisation (TSRS) représentent une application critique de la vision par ordinateur dans la logistique routière, servant de pierre angulaire pour les systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS), les véhicules autonomes et les systèmes de transport intelligents (ITS). Ces systèmes sont conçus pour détecter, localiser et classer automatiquement les panneaux de signalisation à partir des images capturées par des caméras montées sur les véhicules ou sur le bord de la route [56][57].

Le développement des TSRS a évolué de manière significative au fil du temps. Les premières approches reposaient sur des techniques conventionnelles de vision par ordinateur, convertissant les images d'entrée en différents espaces colorimétriques et utilisant des caractéristiques telles que la couleur, la forme, le contour et l'intensité des niveaux de gris pour la détection [58]. Par exemple, Salhi a proposé une méthode qui combinait la segmentation des couleurs et la détection des contours pour la phase de détection, suivie de perceptrons multicouches pour la reconnaissance [59]. De même, [60] ont développé des algorithmes pour détecter les panneaux de signalisation en se basant sur leurs formes géométriques (triangles, carrés et rectangles) [60].

Les implémentations modernes des TSRS ont largement évolué vers des approches d'apprentissage profond, en particulier les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) et les frameworks de détection d'objets comme YOLO (You Only Look Once), qui offrent une précision et une vitesse supérieures par rapport aux méthodes traditionnelles [61]. Par exemple, Iparraguirre a proposé un système combinant un détecteur ACF (Aggregate Channel Features) pour la détection des panneaux de signalisation et des CNN pour la classification, atteignant une précision globale de 92 % [62]. De même, Guney a développé un système ADAS portable utilisant YOLO v5 pour la détection en temps réel des panneaux de signalisation, des véhicules et des piétons [63] (fig20).

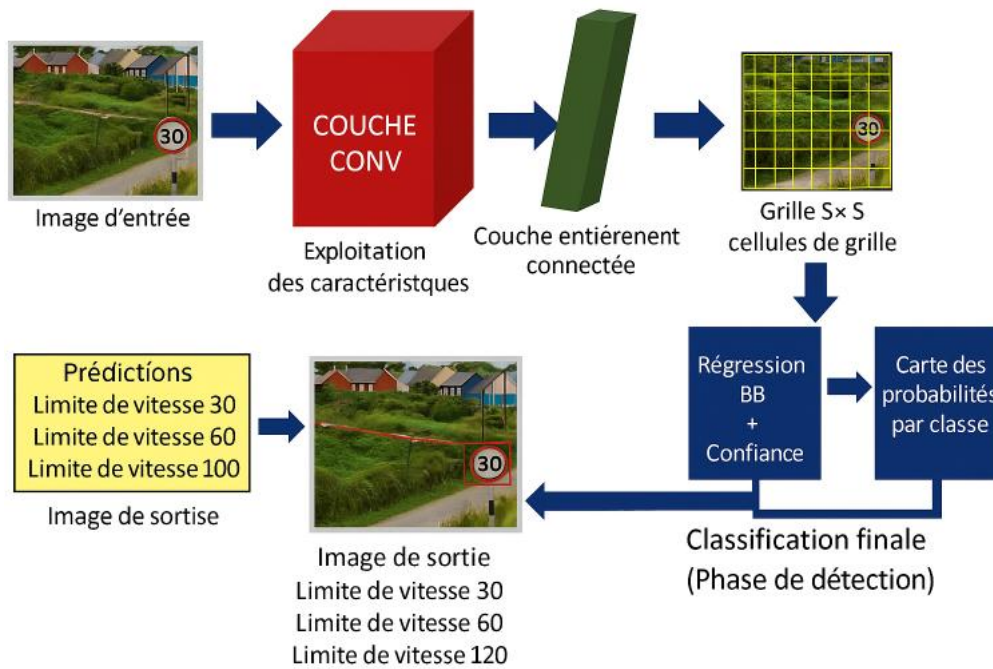


Figure 20 : Processus de détection et de classification d'objets dans YOLO [63].

L'architecture typique du TSRS suit un processus en deux étapes. Tout d'abord, l'étape de détection localise les régions potentielles des panneaux de signalisation dans une image, et ensuite, l'étape de reconnaissance classe les panneaux détectés en catégories spécifiques [64]. Cette approche est illustrée dans diverses études, y compris le travail de Patil et al., qui ont proposé un système utilisant des modèles d'apprentissage profond comme les CNN pour l'identification précise de divers panneaux de signalisation à partir de flux vidéo en temps réel [65].

Les avancées récentes dans les systèmes de reconnaissance des panneaux de signalisation (TSRS) ont exploré diverses techniques pour améliorer les performances. Li a développé un modèle basé sur YOLO spécifiquement pour la reconnaissance des panneaux de signalisation qui non seulement maintient une haute précision de classification mais améliore également de manière significative la vitesse d'exécution [66][67]. Naranjo a présenté un système innovant utilisant Faster R-CNN pour détecter et géo-référencer les panneaux de signalisation à partir d'images capturées par drone, élargissant ainsi le domaine d'application au-delà des caméras montées sur les véhicules [68]. De plus, [69] ont combiné des classificateurs en cascade à renforcement de gradient avec des transformateurs de vision pour localiser et classer avec précision les panneaux de signalisation, même sur des surfaces routières difficiles [69].

Ces systèmes offrent de nombreux avantages pour la sécurité routière et la gestion du trafic. Ils peuvent alerter les conducteurs sur les réglementations de circulation, aidant ainsi à prévenir les accidents [70], soutenir la navigation à travers des réseaux routiers complexes [71], et détecter les panneaux de signalisation défectueux ou manquants à des fins de maintenance [72]. Pour les systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS) et les véhicules autonomes, les TSRS fournissent des informations

cruciales sur les réglementations de circulation et peuvent servir de points de référence pour générer des cartes routières haute définition [73].

Malgré des progrès significatifs, les TSRS sont encore confrontés à des défis liés aux conditions environnementales variables, telles que les changements d'illumination, les effets météorologiques et les occlusions partielles [74]. Divers efforts de recherche visent à relever ces défis en développant des algorithmes plus robustes capables de fonctionner efficacement dans des scénarios du monde réel [75].

2.7 Détection de véhicules et surveillance du trafic

La détection des véhicules et la surveillance du trafic représentent des applications essentielles de la vision par ordinateur dans la logistique routière, fournissant la base technologique pour les systèmes de transport intelligents (ITS) et les systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS). Ces systèmes utilisent généralement des caméras stationnaires montées sur des structures élevées comme des bâtiments, des poteaux ou des ponts pour observer et analyser le flux de circulation [76-78].

Les approches technologiques pour la détection des véhicules ont évolué de manière significative au fil du temps. Les premiers systèmes reposaient sur des techniques traditionnelles de vision par ordinateur telles que les approches de suivi basées sur les caractéristiques. Par exemple, McLauchlan a développé un système de suivi des véhicules en période de congestion en se concentrant sur les sous-caractéristiques des véhicules pour relever les défis d'occlusion partielle [76][77]. De même, Huang a créé un système de vision par ordinateur basé sur la couleur pour la surveillance du trafic qui employait des techniques telles que la construction de l'arrière-plan, la segmentation du premier plan, la séparation des ombres, la localisation des véhicules et des algorithmes de suivi [76][78].

Des approches plus traditionnelles de la détection de véhicules combinaient souvent des techniques telles que les caractéristiques Histogram of Oriented Gradient (HOG) avec des classificateurs Support Vector Machine (SVM) ou des filtres de Gabor pour l'extraction de caractéristiques [79][80]. Par exemple, Sun a développé un système utilisant des filtres de Gabor pour l'extraction des caractéristiques des véhicules et des SVM pour la classification, atteignant une précision moyenne de 94,81 % en collectant des statistiques à partir d'images subdivisées pour offrir une robustesse face aux conditions variées [79][80](fig21).



Figure 21 : Détection de véhicules basée sur les CNN pour la conduite automobile à partir de caméras vidéo [79]

Ces dernières années, les approches d'apprentissage profond, en particulier les variantes de YOLO (You Only Look Once), sont devenues dominantes dans les systèmes de détection de véhicules en raison de leur précision supérieure et de leurs capacités de traitement en temps réel [81-83]. Par exemple, Usmankhjaev a développé un système en temps réel pour détecter les conducteurs circulant à contresens en utilisant YOLOv3 pour la détection des véhicules combiné avec le filtrage de Kalman pour le suivi, atteignant une précision de 91,98 % [84]. De même, des recherches récentes ont utilisé les modèles YOLOv8 et YOLOv11 pour atteindre une grande précision dans la détection de véhicules et la reconnaissance d'anomalies [83].

Le pipeline de traitement typique pour les systèmes de détection de véhicules basés sur la vision implique plusieurs étapes clés : le prétraitement pour améliorer la qualité de l'image, l'extraction et la sélection des caractéristiques, et la classification [85]. Les techniques de prétraitement courantes incluent la segmentation d'image, la suppression des ombres et la gestion des occlusions pour améliorer la précision de détection dans des conditions variées [85]. Pour une robustesse améliorée, certains systèmes utilisent des transformations de lissage multidimensionnelles avec des modèles de mélange gaussien mis à jour de manière récursive pour gérer des conditions d'imagerie défavorables telles que les vibrations de la caméra [86].

Les systèmes de détection et de surveillance des véhicules soutiennent de nombreuses applications de gestion du trafic. Le comptage du flux de circulation permet aux autorités d'analyser et d'optimiser les schémas de circulation [87][88]. Lin a développé un système utilisant le cadre YOLO pour le comptage

des véhicules qui atteint une grande précision grâce à des calculs de distance simples et à la mise en œuvre de points de contrôle pour réduire les détections fausses [87][88]. D'autres applications incluent la détection des infractions au code de la route, la détection des accidents, l'analyse de la vitesse, la planification des itinéraires et la surveillance du trafic [87][89].

L'infrastructure matérielle de ces systèmes se compose généralement de caméras vidéo numériques pouvant être installées à la fois sur les routes et aux intersections, les données étant transmises via des réseaux câblés ou sans fil [90][91]. Bien que des capteurs alternatifs tels que le radar, le lidar et la RFID soient également utilisés pour la collecte de données de circulation, les caméras offrent l'avantage d'extraire plusieurs types d'informations sur la circulation et l'environnement grâce à des algorithmes de traitement d'image [90][92].

Malgré des avancées significatives, les systèmes de détection de véhicules rencontrent plusieurs défis. Cela inclut les conditions d'éclairage changeantes pendant la conduite, les conditions météorologiques imprévisibles et la diversité des formes et des couleurs des véhicules qui peuvent provoquer des reflets [79]. Les systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS) qui intègrent ces technologies basées sur la vision aident à relever ces défis en fournissant aux conducteurs des informations essentielles sur les lois de circulation, la congestion, les itinéraires optimaux et les avertissements de sécurité [93].

2.8 Surveillance du comportement des conducteurs

Les systèmes de vision par ordinateur sont devenus de plus en plus essentiels pour surveiller le comportement des conducteurs et garantir le respect des réglementations de la circulation. Ces technologies permettent la détection automatique de diverses infractions au code de la route en combinant la classification des véhicules et les capacités de sensibilisation à l'environnement. À partir d'un seul flux vidéo, ces systèmes peuvent identifier et classer les éléments de circulation tels que les feux, les passages piétons, les différentes voies et les panneaux de signalisation, tout en détectant simultanément des infractions spécifiques telles que le non-respect des feux, les excès de vitesse et la conduite inappropriée [94].

Les systèmes modernes de surveillance du comportement des conducteurs utilisent des cadres de détection sophistiqués capables d'identifier plusieurs types d'infractions de circulation. Par exemple, les chercheurs ont développé des modèles capables de détecter six infractions courantes au code de la route : les infractions aux feux rouges, l'utilisation illégale des voies d'arrêt d'urgence, les violations de la distance de sécurité, les infractions aux règles des passages piétons marqués, le stationnement illégal et le stationnement sur les passages piétons marqués. Ces systèmes mettent généralement en œuvre des algorithmes de détection d'objets tels que YOLOv5 pour identifier les agents de circulation pertinents (véhicules, piétons, panneaux de signalisation) et des algorithmes de suivi comme strongSORT pour maintenir une surveillance continue à travers les images vidéo. En analysant le comportement et la

trajectoire de ces agents, le système peut automatiquement identifier quand des violations se produisent [95].

La mise en œuvre dans le monde réel des systèmes de surveillance des conducteurs et de conformité au trafic basés sur la vision par ordinateur a démontré des avantages significatifs à l'échelle mondiale. En Corée du Sud, des algorithmes de vision par ordinateur ont été déployés avec succès pour la gestion du trafic, la surveillance du flux de circulation, la détection des congestions et l'optimisation des systèmes de contrôle des feux de circulation. Ces applications ont contribué à réduire la congestion routière, à améliorer la sécurité routière et à renforcer l'efficacité globale des transports. De même, au Kazakhstan, le système intelligent matériel-logiciel "Sergek" utilise des capacités de surveillance vidéo, d'analyse et de prédiction pour surveiller et enregistrer les infractions au code de la route dans les rues et sur les routes. Ce système a contribué à une diminution significative des taux de mortalité routière [96].

L'intégration des algorithmes d'intelligence artificielle avec la technologie de vision par ordinateur a permis le développement de systèmes de contrôle des règles de circulation de plus en plus précis. En exploitant l'apprentissage automatique en parallèle avec la vision par ordinateur, les développeurs peuvent créer des algorithmes robustes pour détecter en temps réel divers types d'infractions au code de la route. Ces systèmes utilisent généralement une combinaison de séquences de circulation en ligne et de séquences provenant de caméras montées, avec des algorithmes spécialisés analysant le comportement et la trajectoire des participants à la circulation pour identifier des infractions spécifiques [95].

2.9 Application et mise en œuvre dans le monde réel

Systèmes intégrés de reconnaissance de véhicules : Des systèmes avancés combinant la détection de la marque et du modèle du véhicule avec la reconnaissance automatique des plaques d'immatriculation (ANPR) ont atteint des taux de précision impressionnants de 97,5 %, même dans des conditions environnementales difficiles comme le brouillard, la pluie et la faible luminosité. Ces systèmes ont été mis en œuvre avec succès dans des environnements réels tels que les entrées des universités, démontrant leur applicabilité pratique dans les contextes d'identification et de sécurité des véhicules [52].

Systèmes avancés d'assistance à la conduite portables : Les chercheurs ont développé des systèmes ADAS portables basés sur l'image pour les véhicules dépourvus de technologie d'assistance à la conduite intégrée. Ces systèmes utilisent des algorithmes YOLO v5 pour la détection en temps réel des panneaux de signalisation, des véhicules et des piétons, offrant une grande vitesse et précision de détection pour équiper les véhicules plus anciens de capacités de sécurité modernes [63].

Systèmes de soutien intelligent au conducteur : Les mises en œuvre modernes des ADAS servent de systèmes d'apprentissage actif au sein des véhicules, fournissant aux conducteurs des informations

cruciales sur les lois de la circulation, la congestion, les itinéraires optimaux et les avertissements de sécurité. Ces systèmes peuvent également surveiller les conditions du conducteur, y compris la fatigue, les distractions et l'altération, créant ainsi des solutions complètes de surveillance de la sécurité [93].

Reconnaissance des panneaux de signalisation en temps réel : Des systèmes avancés de reconnaissance des panneaux de signalisation ont été déployés en tant que composants intégrés dans les ADAS, alertant les conducteurs des limites de vitesse actuelles, fournissant des alertes secondaires pour les panneaux de stop ou de cédez-le-passage, et empêchant les actions inappropriées telles que l'entrée dans des rues à sens unique. Ces systèmes peuvent être intégrés avec le régulateur de vitesse adaptatif pour des expériences de conduite moins stressantes [54].

Systèmes de gestion du trafic en Corée du Sud : La Corée du Sud a mis en œuvre des algorithmes de vision par ordinateur pour une gestion complète du trafic, surveillant le flux de circulation, détectant les congestions et optimisant les systèmes de contrôle des feux de circulation. Ces applications ont démontré des avantages mesurables en réduisant la congestion routière, en améliorant la sécurité routière et en augmentant l'efficacité globale des transports [96].

Système "Sergek" du Kazakhstan : Le système intelligent matériel-logiciel "Sergek", développé par des spécialistes informatiques kazakhs, utilise la vidéosurveillance, l'analyse et les capacités de prédiction pour surveiller et enregistrer les infractions au code de la route dans les rues et sur les routes. Cette mise en œuvre a contribué à une diminution significative du taux de mortalité des accidents de la route à Astana [96].

Frameworks de Détection de Panneaux de Signalisation en Temps Réel : Les implémentations pratiques des systèmes de détection de panneaux de signalisation intègrent des interfaces de caméra capturant des images vidéo en temps réel, des modules de traitement d'image pour les conversions d'espace colorimétrique et la détection de contours, et des modules de classification utilisant des frameworks d'apprentissage profond comme TensorFlow et OpenCV. Ces systèmes permettent la détection et la reconnaissance spontanées des panneaux de signalisation, fournissant des avertissements en temps opportun aux conducteurs et contribuant à prévenir les accidents [65].

Le tableau 1 ci-dessous présente une analyse comparative de publications scientifiques sélectionnées :

Chapitre 2 : Tendances émergentes de l'intelligence artificielle dans la logistique routière

Tableau 1 : Vue d'ensemble comparative des systèmes de détection d'objets et de panneaux de signalisation basés sur l'intelligence artificielle

Papars	[52]	[63]	[93]	[96]	[65]
Objectif	Intégration de la détection de la marque et du modèle du véhicule avec la reconnaissance automatique des plaques (ANPR) pour une meilleure identification des véhicules.	Système ADAS portable pour la détection en temps réel des panneaux de signalisation, véhicules et piétons.	Environnements de conduite plus sûrs grâce à la reconnaissance des panneaux de signalisation dans les systèmes ADAS.	Amélioration de la sécurité dans les établissements éducatifs en utilisant la vision par ordinateur et les jumeaux numériques.	Détection et reconnaissance en temps réel des panneaux de signalisation pour la sécurité routière et la gestion du trafic.
Technique utilisée	MobileNet-V2, YOLOx, YOLOv4-tiny, Paddle OCR, SVTR-tiny, GradCam	Algorithme YOLO v5	Machines à vecteurs de support (SVM) avec noyau radial	Algorithme YOLOv8 pour la détection d'objets	Réseaux de neurones convolutifs, bibliothèques TensorFlow et OpenCV, modules de traitement d'image
Problèmes abordés	Performance robuste par mauvais temps, intégration complète de l'identification du véhicule, précision en temps réel	Absence de système ADAS intégré, vitesse de détection, précision, performance temps réel sur plateformes mobiles	Manque de grands jeux de données, distribution déséquilibrée des panneaux de signalisation	Problèmes identifiés : vie privée, biais dans les algorithmes, limitations techniques, coûts. L'étude propose des solutions éthiques, des formations précises et des solutions économiques.	Détection et reconnaissance en temps réel, amélioration de la sécurité routière, gestion du trafic
Composants clés	MobileNet-V2, YOLOx, YOLOv4-tiny, Paddle OCR, SVTR-tiny, OpenCV, Python, GradCam.	Système ADAS portable, algorithme YOLO v5, plateformes GPU mobiles	Vision par ordinateur, apprentissage automatique, SVM, noyau radial.	Jumeau numérique, algorithme de détection de personnes, caméras de surveillance, réseaux neuronaux	Interface caméra, modules de traitement d'image, module de classification, frameworks d'apprentissage profond, TensorFlow, OpenCV
Jeux de données utilisés	Images de l'entrée de l'université de Firat, diverses conditions, milliers d'images	GTSRB et jeu de données spécifique à l'étude (environ 2500 images)	Jeu de données personnalisé et déséquilibré pour l'entraînement et les tests	Plans d'étage de l'école n°89 à Astana pour créer un jumeau numérique	N/A
Métriques de performance	Taux de précision de 97,5 %	Score F1, Précision, Rappel, courbes PR, images par seconde	Précision (87 %) et temps de traitement (0,64s)	Moyenne de précision moyenne (mAP) utilisée pour évaluer la performance de la détection d'objets	N/A

2.10 Avantages et impact commercial de l'IA dans la logistique routière

Avantages économiques

Réduction des coûts : La mise en œuvre de l'IA dans les opérations logistiques a démontré des économies de coûts significatives, avec des études de cas montrant une réduction des coûts de 25 % par rapport aux méthodes de planification traditionnelles [38].

Optimisation des coûts de main-d'œuvre : L'application des technologies de l'intelligence artificielle a considérablement réduit les coûts de main-d'œuvre pour les entreprises de logistique tout en améliorant simultanément l'efficacité logistique [4].

Économies de carburant : L'optimisation dynamique des itinéraires alimentée par l'IA réduit la consommation de carburant en analysant les données en temps réel, y compris les schémas de circulation, les conditions météorologiques et les fermetures de routes, pour ajuster en continu les itinéraires de livraison [19].

Réduction des frais de maintenance : Les algorithmes de maintenance prédictive analysent les données des équipements pour anticiper les pannes potentielles avant qu'elles ne se produisent, réduisant ainsi les temps d'arrêt coûteux et les frais de maintenance [33].

Bénéfices opérationnels

Livraisons plus rapides : La mise en œuvre de systèmes alimentés par l'IA comme l'Auto-Dispatcher de Swarm Logistics a entraîné des temps de livraison 35 % plus rapides pour les entreprises de transport [38].

Adaptabilité améliorée : Les applications de l'apprentissage par renforcement au Problème de Routage de Véhicules permettent des solutions de routage plus adaptatives, efficaces et dynamiques qui peuvent améliorer de manière significative les opérations logistiques [21].

Amélioration de la prise de décision : Les outils d'IA offrent des capacités de prise de décision adaptatives en tant que problème d'apprentissage continu, améliorant la performance du fret routier en analysant comment les schémas de routage peuvent être ajustés en réponse aux changements dans les modèles de trafic et de demande [97].

Ajustements en temps réel : Les algorithmes d'apprentissage automatique analysent les données en temps réel pour ajuster continuellement les itinéraires de livraison, optimisant ainsi les temps de livraison et atténuant les perturbations opérationnelles [19].

Bénéfices environnementaux et sociétaux

Réduction des émissions de carbone : L'optimisation des itinéraires et l'allocation de la charge utile alimentées par l'IA réduisent efficacement les émissions de CO₂ tout en contribuant à la durabilité environnementale [26].

Réduction de la congestion routière : Le routage optimisé non seulement offre des avantages économiques mais réduit également la congestion routière, contribuant ainsi à des améliorations sociétales plus larges [21].

Durabilité environnementale : Des itinéraires plus efficaces signifient une réduction de la consommation de carburant et des émissions de carbone, soutenant des pratiques commerciales respectueuses de l'environnement [21].

Améliorations de la logistique urbaine : Les applications de l'IA dans la logistique urbaine aident à surmonter les contraintes posées par l'augmentation de la demande de transport, les émissions de CO₂, les problèmes de sécurité et les impacts environnementaux [98].

Avantages Concurrentiels

Expérience Client Améliorée : Les améliorations logistiques pilotées par l'IA conduisent à des livraisons plus rapides et à une accessibilité accrue des biens et services, en particulier dans les zones éloignées ou mal desservies [21].

Leadership technologique : Les principales entreprises de logistique dans le monde créent des solutions logistiques intelligentes grâce à des R&D indépendantes et coopératives, reconnaissant l'IA comme une tendance irréversible dans l'industrie [4].

Systèmes hybrides homme-machine : Le développement de l'IA explicable s'attaque à la nature "boîte noire" de nombreuses solutions d'IA, avec des preuves suggérant que les systèmes hybrides homme-machine seront les plus réussis dans les applications pratiques en raison de la nécessité d'une explication rationnelle [97][99].

Systèmes hybrides homme-machine : Le développement de l'IA explicable s'attaque à la nature "boîte noire" de nombreuses solutions d'IA, avec des preuves suggérant que les systèmes hybrides homme-machine seront les plus réussis dans les applications pratiques en raison du besoin d'explication rationnelle [97][99].

Le tableau 2 ci-dessous présente une analyse comparative de plusieurs articles scientifiques portant sur les différentes applications de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine de la logistique routière.

Tableau 2 : Analyse comparative des applications de l'intelligence artificielle dans la logistique routière

Articles	Applications de l'IA en logistique	Impact sur les affaires	Innovations technologiques	Améliorations opérationnelles	Utilisation des données
[38]	Automatisation, analytique prédictive, véhicules autonomes dans la logistique routière.	Réduction des coûts, amélioration de l'efficacité, meilleure performance globale des entreprises.	Usage systématique de l'IA, du ML et du DL dans la gestion de la logistique intelligente.	Meilleure planification des itinéraires, gestion optimisée de la flotte.	Utilisation des données et analyses dans les applications logistiques.
[19]	Optimisation dynamique des trajets, livraison autonome, camions autonomes, drones.	Réduction des coûts, efficacité accrue, amélioration de l'expérience de livraison, réduction des perturbations.	Algorithmes de ML pour l'optimisation des itinéraires, livraison autonome via drones/camions.	Réduction de la consommation de carburant, temps de livraison optimisés.	Analyse de données en temps réel (trafic, météo, fermetures de routes).
[33]	Analytique prédictive pour la prévision de la demande, décisions en temps réel en logistique.	Optimisation de l'efficacité, réduction des coûts, amélioration de la résilience de la chaîne logistique.	Analytique prédictive pour la demande et décisions logistiques.	Prise de décision en temps réel pour la logistique et la gestion des stocks.	Utilisation des données pour prévoir la demande et piloter les décisions logistiques.
[21]	Application de l'apprentissage par renforcement pour l'optimisation des tournées avec contraintes.	Réduction des coûts, amélioration de l'efficacité et de la performance globale.	Méthode RL pour le problème de tournées avec fenêtres temporelles et demandes stochastiques, réduction des coûts de 1,73 %.	Meilleure planification des itinéraires, gestion de flotte optimisée.	Utilisation du RL pour intégrer fenêtres temporelles, demandes variables et coûts de déplacement.
[26]	Optimisation des trajets, analytique prédictive, allocation de la charge utile.	Réduction des coûts, efficacité opérationnelle, maximisation des profits, durabilité.	IA prédictive et générative pour optimiser les trajets et l'allocation de la charge.	Réduction des coûts, amélioration de l'allocation et de l'efficacité.	Analyse avancée pour optimiser itinéraires et charges utiles.
[98]	Logistique urbaine, entreposage, sécurité routière, mobilité.	Réduction des émissions de CO ₂ , amélioration de la sécurité et de l'efficacité, gestion des contraintes de transport.	N/A	Optimisation du fret urbain, entreposage, sécurité, mobilité.	Bonne compréhension des liens entre IA et exploitation des données.

3. Challenges et futurs travaux

La mise en œuvre de l'intelligence artificielle dans la logistique routière, bien que prometteuse, fait face à plusieurs défis importants qui doivent être relevés pour une adoption plus large. L'un des problèmes les plus pressants est la complexité inhérente de nombreuses solutions d'IA et leur nature de "boîte noire", ce qui rend difficile l'explication des résultats aux parties prenantes. Malgré l'intérêt croissant pour l'application de l'IA à l'analyse des données complexes liées au fret, les applications réelles restent limitées dans le secteur de la logistique. L'industrie du fret a observé une augmentation des applications

de l'IA dans des domaines spécifiques comme la prévision de la demande et le routage des véhicules, mais la mise en œuvre généralisée est entravée par le manque de transparence sur la manière dont ces systèmes prennent des décisions [97].

Le développement de l'IA explicable représente l'un des principaux défis de recherche futurs pour l'industrie logistique. La confiance aveugle dans les concepts classiques d'IA "boîte noire" est insuffisante pour expliquer les résultats des algorithmes complexes sans le raisonnement d'experts humains. La compréhensibilité est devenue une caractéristique centrale des solutions appliquées pour réduire la méfiance et l'aversion envers les approches traditionnelles dans les applications critiques [97][99]. Les experts prédisent que dans un avenir proche, seuls les systèmes hybrides homme-machine réussiront dans les applications pratiques, car les humains ont tendance à être sceptiques envers les systèmes qui manquent d'explications rationnelles [97].

Un autre défi majeur réside dans la nature dynamique et incertaine des environnements logistiques. À mesure que les demandes des clients deviennent de plus en plus diverses et que les environnements de circulation urbaine se complexifient, la planification des itinéraires logistiques doit répondre de manière flexible aux changements de lieux et de temps de livraison causés par des facteurs tels que les modifications de plan ou les demandes temporaires. Les éléments imprévisibles comme les embouteillages et les perturbations de parcours ajoutent une incertitude supplémentaire à l'optimisation des itinéraires de livraison, impactant directement l'efficacité logistique et la satisfaction client [27].

La technologie de l'intelligence en périphérie, combinée à l'informatique en nuage et à l'Internet des objets (IoT), représente une autre direction importante pour les modèles logistiques intelligents à l'avenir. Ces technologies sont appliquées pour optimiser les processus de livraison logistique, améliorant à la fois la précision et l'efficacité de la planification des itinéraires tout en réduisant les coûts et en améliorant la satisfaction des clients [27][28]. De tels systèmes seront cruciaux pour répondre aux contraintes croissantes posées par la demande de transport en augmentation, en particulier dans les environnements urbains où les opérations logistiques doivent naviguer à travers des défis liés aux émissions de CO₂, aux problèmes de sécurité et aux impacts environnementaux [98].

À mesure que l'industrie de la logistique continue d'évoluer, les applications de l'IA devront relever ces défis tout en fournissant des solutions transparentes et explicables qui peuvent s'adapter à des environnements dynamiques. Le succès futur de l'IA dans la logistique routière dépendra probablement de la recherche du bon équilibre entre l'avancement technologique et la supervision humaine, en créant des systèmes capables d'exploiter la puissance de calcul de l'IA tout en maintenant la confiance et la compréhension des opérateurs humains et des parties prenantes [97].

Le succès futur de l'IA dans la logistique routière dépendra probablement de l'équilibre entre l'avancement technologique et la supervision humaine, créant des systèmes capables d'exploiter la puissance de calcul de l'IA tout en maintenant la confiance et la compréhension des opérateurs et des

parties prenantes humaines [97]. Malgré des progrès substantiels dans les applications de vision par ordinateur pour la logistique routière, plusieurs défis demeurent qui limitent l'efficacité de ces systèmes dans des environnements réels.

Malgré des progrès substantiels dans les applications de vision par ordinateur pour la logistique routière, plusieurs défis subsistent qui limitent l'efficacité de ces systèmes dans des environnements réels. L'un des principaux défis est la variabilité des conditions environnementales auxquelles les véhicules sont confrontés pendant leur fonctionnement. Les conditions d'éclairage peuvent changer fréquemment en conduisant, la météo peut être imprévisible, et les véhicules de formes et de couleurs diverses peuvent provoquer des reflets qui affectent la précision de la détection [79]. Ces facteurs environnementaux peuvent avoir un impact significatif sur la performance des systèmes de détection de véhicules basés sur la vision qui s'appuient sur des caméras vidéo.

Les mises en œuvre réelles des systèmes de détection et de reconnaissance des objets de circulation rencontrent des difficultés constantes liées aux conditions météorologiques variables, aux changements d'éclairage et aux occlusions [53]. Par exemple, la pluie ou le brouillard peuvent réduire considérablement la visibilité, tandis que l'éblouissement causé par la lumière du soleil ou les phares peut temporairement aveugler les systèmes de caméra. De plus, les occlusions partielles causées par d'autres véhicules, des bâtiments ou de la végétation peuvent empêcher les systèmes d'obtenir des informations visuelles complètes, entraînant ainsi des échecs potentiels de détection.

Les contraintes matérielles posent également des défis importants pour la mise en œuvre des systèmes de vision par ordinateur dans la logistique routière. Les systèmes embarqués dans les véhicules ont souvent une puissance de traitement et une mémoire limitée, nécessitant des optimisations algorithmiques qui équilibrent précision et efficacité computationnelle. Cela est particulièrement important pour les applications en temps réel comme les systèmes d'assistance à la conduite, où les retards de détection pourraient avoir des implications sur la sécurité.

L'approche technique pour relever ces défis a évolué au fil du temps. Les méthodes antérieures reposaient sur des techniques traditionnelles de vision par ordinateur telles que l'histogramme des gradients orientés (HOG) avec des classificateurs à vecteurs de support (SVM), ou des filtres de Gabor pour l'extraction de caractéristiques [79][80]. Bien que ces approches aient obtenu des résultats raisonnables—comme le système de Sun atteignant une précision de 94,81 % en collectant des statistiques à partir d'images subdivisées pour améliorer la robustesse—elles ont néanmoins rencontré des limitations dans des conditions environnementales difficiles [80].

Les orientations futures de la recherche se concentrent de plus en plus sur le développement d'algorithmes plus robustes capables de maintenir des performances dans des conditions diverses. Une approche prometteuse est la fusion de capteurs, qui combine les données de plusieurs types de capteurs (caméras, radar, lidar) pour surmonter les limitations de chaque capteur individuel. Par exemple, bien

que les caméras puissent avoir des difficultés dans des conditions de faible luminosité, le radar peut maintenir sa fonctionnalité, fournissant des données complémentaires pour améliorer la fiabilité globale du système.

L'émergence de l'apprentissage profond, en particulier des réseaux de neurones convolutifs (CNN), a révolutionné les capacités de détection et de reconnaissance des panneaux de signalisation, offrant des solutions qui surpassent de manière significative les méthodes traditionnelles en termes de vitesse et de fiabilité [61]. Les développements futurs se concentreront probablement sur des améliorations de ces architectures d'apprentissage profond pour traiter les cas limites et améliorer la généralisation à travers différents environnements et régions géographiques.

De plus, la recherche s'oriente vers des approches plus holistiques qui intègrent la vision par ordinateur avec d'autres technologies. La combinaison de ces technologies présente un grand potentiel pour améliorer la gestion du trafic, renforcer la sécurité routière et faciliter le développement des véhicules autonomes [53]. Par exemple, l'intégration des systèmes de vision par ordinateur avec des capteurs basés sur l'infrastructure et la communication véhicule-à-tout (V2X) pourrait créer des mécanismes de détection redondants qui améliorent considérablement la fiabilité globale du système.

À mesure que les véhicules deviennent de plus en plus autonomes, les recherches futures devront relever le défi de développer des systèmes de vision capables non seulement de détecter et de reconnaître des objets, mais aussi de prédire les comportements et de prendre des décisions sophistiquées basées sur les informations visuelles. Cela nécessitera des avancées tant dans les algorithmes de vision par ordinateur que dans leur intégration avec des cadres de prise de décision qui prennent en compte des considérations éthiques, juridiques et de sécurité.

Cela nécessitera des avancées à la fois dans les algorithmes de vision par ordinateur et dans leur intégration avec des cadres de prise de décision qui prennent en compte des considérations éthiques, juridiques et de sécurité.

Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un panorama scientifique rigoureux et actualisé des recherches portant sur l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la logistique routière. Grâce à l'analyse bibliométrique couvrant près de sept décennies (1957–2025), plusieurs constats majeurs ont émergé :

Tout d'abord, la production scientifique dans ce domaine connaît une croissance exponentielle depuis 2010, stimulée par les avancées en deep learning, la pression croissante pour une logistique durable, et l'essor des technologies de transport intelligentes. Les publications analysées révèlent un fort degré d'interdisciplinarité entre l'IA, l'ingénierie des transports, et les enjeux environnementaux, confirmant l'émergence d'un champ scientifique structuré et stratégique.

Par ailleurs, l'état de l'art a mis en évidence la diversité des applications de l'IA dans la logistique routière : optimisation des itinéraires, maintenance prédictive, gestion de flotte, reconnaissance de panneaux de signalisation, prévision de la demande et surveillance du trafic. Ces innovations technologiques, bien qu'encore hétérogènes, montrent des bénéfices clairs sur les plans économique (réduction des coûts), opérationnel (amélioration de l'efficacité), environnemental (baisse des émissions de CO₂), et sociétal (sécurité et service client).

Cependant, plusieurs défis subsistent : manque de transparence des algorithmes (problème de boîte noire), faible adoption opérationnelle à grande échelle, variabilité des performances selon les conditions environnementales, et limites techniques des systèmes embarqués. Ces obstacles justifient le développement de nouvelles approches, notamment fondées sur l'IA explicable, l'intégration de capteurs hybrides, et les systèmes de décision collaboratifs homme-machine.

Enfin, cette analyse pose les fondations scientifiques nécessaires à la conception du système proposé dans cette thèse, qui vise à développer une plateforme intelligente de gestion logistique routière intégrant des modules de reconnaissance, d'optimisation, de prédiction et de contrôle, avec une ambition claire : réconcilier performance logistique, sécurité routière et durabilité environnementale.

Chapitre 3 : Défis logistiques et innovation méthodologique

Introduction

Le chapitre constitue une étape charnière dans la structuration de cette recherche, en articulant clairement la problématique, le positionnement scientifique, les objectifs visés, ainsi que la méthodologie adoptée pour la conception et l'évaluation du système NW Logistics Tracker. Dans un contexte où la logistique routière marocaine fait face à des enjeux complexes de sécurité, d'efficacité économique et de transition écologique, il est essentiel de poser un cadre rigoureux permettant de cibler les problématiques réelles et de concevoir des réponses adaptées.

La première partie de ce chapitre dresse un état des lieux détaillé de la situation logistique au Maroc, à différents niveaux : général, sécuritaire et environnemental. Ce diagnostic met en évidence les limites actuelles du système logistique routier, notamment en matière d'accidents, de consommation énergétique et d'intégration de pratiques écologiques. Il permet ensuite de positionner la recherche dans le champ de l'intelligence artificielle appliquée à la logistique durable, et de formuler une problématique générale articulée autour des défis de sécurité, de durabilité et de performance.

La seconde partie expose la méthodologie de recherche adoptée, inspirée de l'approche DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler), issue du Lean Six Sigma. Elle détaille les différentes phases du processus de recherche, depuis la définition des besoins jusqu'à l'identification des leviers d'amélioration. Un accent particulier est mis sur les données mobilisées embarquées, institutionnelles, image annotée, ou issues d'enquêtes terrain ainsi que sur les indicateurs logistiques clés permettant d'évaluer l'efficacité de la solution proposée. Enfin, les méthodes analytiques utilisées pour diagnostiquer les causes racines des dysfonctionnements logistiques sont également présentées.

Ce chapitre établit ainsi les fondements empiriques et méthodologiques de la thèse, en assurant la cohérence entre les enjeux identifiés sur le terrain et les choix technologiques opérés dans la conception de la solution NW Logistics Tracker.

I. Complexité de la logistique intelligente

Dans une tendance mondiale marquée par la transformation numérique, les exigences croissantes en matière de durabilité et la recherche permanente de performance, la logistique routière au Maroc est confrontée à une triple pression : garantir la sécurité des flux, répondre aux objectifs climatiques, et maîtriser les coûts liés à l'exploitation et aux dysfonctionnements du système de transport.

Cette partie a pour but de poser les fondations principales de la démarche d'amélioration continue selon le cycle DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler), en commençant par une analyse approfondie de la situation actuelle, l'identification claire des problèmes majeurs, et la définition des objectifs stratégiques à atteindre pour le projet NW Logistics.

Grace à la lecture croisée et approfondie des données officielles comme les rapports de la NARSA, de l'AMD L et des rapports environnementaux internationaux, il devient impératif de mettre en lumière les principaux verrous opérationnels et environnementaux qui entravent l'efficacité du système logistique marocain, en particulier dans le secteur routier. Les accidents de la route, la lente transition vers une logistique verte, et les coûts économiques liés aux infractions constituent des problématiques centrales et primordiales à traiter de manière intégrée.

Cette introduction prépare ainsi le terrain pour une meilleure analyse détaillée des besoins logistiques identifiés sur le terrain via un formulaire d'enquête, l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel et technique, et la formulation des indicateurs clés de performance (KPIs) à suivre pour piloter efficacement le déploiement de la solution NW Logistics.

1. La Logistique au Maroc

La logistique au Maroc constitue aujourd'hui un levier stratégique pour la compétitivité nationale et l'intégration du pays dans les chaînes de valeur mondiales (fig22). Le secteur contribue à environ 10 % du PIB national et génère des centaines de milliers d'emplois directs et indirects. Il est au cœur de la politique d'industrialisation, de développement portuaire, et de souveraineté économique du Royaume. Malgré son importance croissante, la logistique marocaine souffre encore d'un coût élevé, représentant près de 20 % du PIB, ce qui limite la compétitivité des entreprises exportatrices et accentue les inégalités territoriales.

Depuis 2010, le Maroc a mis en œuvre une Stratégie Nationale de Développement de la Compétitivité Logistique (SNDCL) qui vise à réduire ce coût à 15 % du PIB, à développer un réseau intégré de plateformes logistiques et à structurer le secteur du transport, notamment le routier. Une des mesures structurantes fut la création de l'Agence Marocaine de Développement de la Logistique (AMD L), en charge du pilotage de cette stratégie. Cependant, les résultats attendus ont tardé à se matérialiser, notamment en raison de la prédominance du secteur informel, du morcellement des acteurs, et d'un tissu de TPE peu digitalisé.

Le Royaume dispose d'infrastructures logistiques en nette amélioration. Le réseau routier atteint aujourd'hui plus de 60 000 kilomètres, dont environ 1 800 km d'autoroutes à péage. Le transport ferroviaire, bien qu'encore limité à 2 200 km, connaît une montée en puissance grâce à la modernisation de l'ONCF et le lancement de projets structurants, comme la ligne à grande vitesse vers Marrakech ou les extensions prévues vers le Sud et l'Est du pays. Les infrastructures portuaires, quant à elles,

représentent une véritable success-story marocaine : le complexe Tanger Med, classé dans le top 6 mondial en efficacité, a traité plus de 8,1 millions de conteneurs EVP en 2021, devenant un hub logistique de classe internationale.

Le développement des zones logistiques multi-flux (ZLMF) constitue un pilier important de la stratégie nationale. L'objectif initial était de mobiliser plus de 3 300 hectares dédiés aux plateformes logistiques régionales, permettant une mutualisation des flux, une réduction des coûts de stockage, et un désengorgement des pôles urbains. Ces plateformes tardent néanmoins à être opérationnelles à grande échelle, principalement en raison des lenteurs administratives, du coût du foncier et de la coordination entre collectivités territoriales et autorités centrales.

Malgré les progrès réalisés dans la digitalisation des procédures douanières et le déploiement de services électroniques pour la gestion documentaire, le secteur du transport reste peu structuré et marqué par une forte informalité, estimée à près de 40 %. La flotte de camions est majoritairement vétuste, avec un âge moyen supérieur à 13 ans, ce qui nuit à la fiabilité des prestations et aggrave l'empreinte environnementale. L'un des défis majeurs reste donc la modernisation du parc roulant, combinée à l'introduction de technologies propres et connectées.

Sur le plan régional, le Maroc conserve une place de leader logistique en Afrique, grâce à ses infrastructures portuaires, sa stabilité politique, et sa volonté affirmée de jouer un rôle de plateforme intercontinentale. Il se positionne en 20e place sur 50 dans l'Agility Emerging Markets Logistics Index 2022, et en première position dans le monde arabe. Cette dynamique est renforcée par les ambitions du Royaume d'attirer les relocalisations industrielles et logistiques depuis l'Asie vers l'Afrique du Nord, dans une logique de "nearshoring".

En définitive, la situation logistique générale du Maroc est contrastée : les bases sont solides, les ambitions sont claires, mais les défis à relever sont nombreux. Il s'agit désormais de poursuivre la régionalisation logistique, renforcer la coordination public-privé, intégrer les technologies numériques dans les opérations de transport, et surtout accélérer la transition vers une logistique plus durable et verte. Ces transformations conditionnent à la fois la compétitivité du tissu économique marocain et la résilience des chaînes d'approvisionnement face aux crises futures.



Figure 22 : Etat actuel et enjeux de la logistique au Maroc

2. Chiffres Clés des Accidents Routiers et Leurs Conséquences Logistiques

Selon les statistiques officielles publiées par NARSA Maroc (Agence Nationale de la Sécurité Routière) pour l'année 2022 (fig23), le pays a enregistré 113 625 accidents corporels de la circulation. Ce chiffre met en lumière une pression importante exercée sur le système de transport routier, affectant directement la logistique nationale à travers des retards, des ruptures de flux, et une insécurité croissante pour les conducteurs et les marchandises. Ce niveau d'accidentologie représente un enjeu majeur pour la fluidité et la fiabilité des chaînes d'approvisionnement.

En milieu urbain, les accidents en agglomération représentent près de 78 % du total, principalement dus à la densité du trafic, au non-respect des règles de circulation, et à la cohabitation complexe entre véhicules, piétons et deux-roues. Cependant, les accidents hors agglomération, bien que moins fréquents (22 % des cas), sont responsables de plus de 53 % des décès enregistrés, soit 1 870 morts sur un total de 3 499. Ces accidents sont souvent liés à des vitesses élevées, à un déficit en infrastructures de sécurité (éclairage, glissières de sécurité, signalisation) et à un temps d'intervention plus long des secours.

D'un point de vue logistique, ces sinistres perturbent fortement le transport interurbain, occasionnant des coûts additionnels pour les entreprises : perte de véhicules, hausse des primes d'assurance, allongement des délais de livraison et insatisfaction client. Les camions, fourgonnettes et véhicules utilitaires sont impliqués dans une part significative des accidents mortels (489 tués), ce qui souligne la vulnérabilité de la logistique routière face aux risques de la circulation.

Par ailleurs, les usagers vulnérables tels que les motocyclistes (77 128 blessés, 1 321 morts) et les piétons (27 984 blessés, 888 morts) sont fortement touchés, selon les données de NARSA. Cela met en évidence un manque de protection et d'infrastructures adaptées pour ces catégories, et souligne la nécessité de repenser les zones de chargement/déchargement et les itinéraires logistiques dans les centres urbains.

Face à cette situation, il devient indispensable d'adopter une approche proactive intégrant des technologies de prévention : détection des infractions, surveillance en temps réel, intelligence artificielle embarquée dans les véhicules, ainsi qu'une meilleure gestion des risques logistiques. L'analyse des indicateurs fournis par NARSA permet de mieux cibler les zones à haut risque, d'optimiser les itinéraires, et de réduire les conséquences humaines et économiques des accidents dans la chaîne logistique.

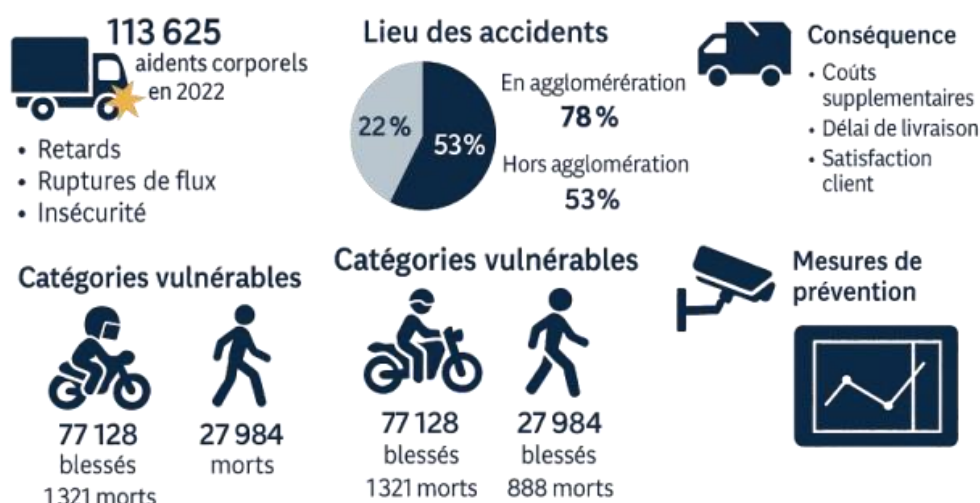


Figure 23 : Chiffres Clés des Accidents Routiers et Leurs Conséquences Logistiques

3. Stratégie Marocaine pour le transfert à la logistique verte

Le Maroc s'identifie aujourd'hui comme un acteur déterminé dans la lutte contre le changement climatique, avec une attention croissante portée à la transformation de son système logistique vers un modèle plus durable (fig24). Cette démarche se manifeste notamment dans la logistique routière, un secteur fortement émetteur de gaz à effet de serre (GES). En effet, selon la Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) et les données de la NARSA, le transport est à l'origine de plus de 38 % des émissions énergétiques du pays, et le transport routier représente à lui seul plus de 95 % de ces émissions. À titre d'exemple, en 2022, les émissions du secteur transport sont estimées à près de 23 millions de tonnes de CO₂ (MtCO₂), contre 18,3 MtCO₂ en 2014, ce qui montre une augmentation constante et préoccupante.

Face à cette réalité, le Maroc s'est fixé des objectifs ambitieux dans le cadre de ses Contributions Déterminées au niveau National (CDN), notamment celui de réduire jusqu'à 45,5 % de ses émissions globales de GES à l'horizon 2030, avec un objectif sectoriel spécifique de réduction de 33 % des émissions du secteur transport, conditionné par un appui international. Sans condition, le pays vise une réduction de 13 % dans ce même secteur. Pour la logistique routière en particulier, les efforts portent sur l'efficacité énergétique, la réduction des trajets à vide, l'optimisation des flux, et la transition vers des véhicules moins polluants.

Dans ce sens, plusieurs initiatives concrètes ont été lancées. La Charte Marocaine de la Logistique Verte, adoptée en 2019, vise à inciter les opérateurs à intégrer des pratiques écologiques dans leurs activités : éco-conduite, renouvellement des flottes, gestion optimisée des itinéraires, etc. Par ailleurs, la création de plates-formes logistiques multimodales vise à renforcer l'intermodalité et limiter le recours exclusif à la route. L'Agence Marocaine de Développement de la Logistique (AMDL) appuie également le développement de hubs logistiques verts, notamment à Zenata, et favorise la mise en place de stations GNV et électriques sur les axes stratégiques du pays.

Les ambitions du Maroc ne se limitent pas à la réduction des émissions. Le pays vise également à faire de la logistique un levier économique durable. Selon la Banque mondiale, la transition vers une économie bas carbone nécessitera 78 milliards de dollars d'investissement d'ici 2050, mais ces investissements sont progressifs et peuvent être partiellement portés par le secteur privé. Le rapport sur le climat et le développement au Maroc souligne que les actions ambitieuses dans la logistique peuvent revitaliser les territoires, créer de nouveaux emplois verts et améliorer la compétitivité nationale, en particulier grâce aux énergies renouvelables et à la digitalisation.

En 2025, le Maroc figure à la 8^e place mondiale du Climat Change Performance Index (CCPI), consolidant sa position de leader climatique dans le monde arabe et en Afrique. Il est également reconnu pour son objectif d'atteindre 52 % d'énergies renouvelables dans son mix énergétique d'ici 2030, objectif étroitement lié à l'électrification de la logistique et à l'utilisation d'énergies propres pour les infrastructures de transport.

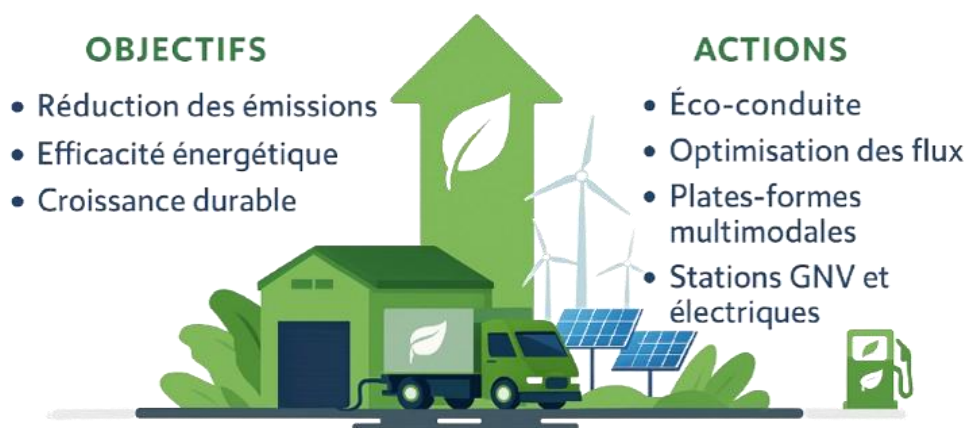


Figure 24 : vision du transport routier et la logistique verte au Maroc

4. Positionnement

À l'issue de l'analyse transversale de l'impact de l'intelligence artificielle sur l'ensemble des maillons de la chaîne logistique (fig25), il apparaît essentiel, dans une perspective de recherche doctorale approfondie, de définir un champ d'application spécifique, à la fois pertinent scientifiquement, significatif en termes d'impact industriel, et porteur d'enjeux sociétaux. C'est dans cette optique que nous avons choisi de recentrer notre étude sur le domaine de la logistique routière, en tant que composante stratégique et critique de la supply chain moderne.

Ce positionnement repose sur plusieurs constats objectifs et structurants. D'abord, la logistique routière demeure aujourd'hui le mode de transport prédominant à l'échelle mondiale, représentant plus de 70 % du volume des marchandises transportées dans de nombreux pays, notamment dans les chaînes d'approvisionnement régionales et urbaines. Elle constitue l'interface directe entre les centres de production, les plateformes logistiques, les points de distribution, et les clients finaux. De par sa granularité, sa flexibilité et sa capillarité, le transport routier reste indispensable, notamment dans les contextes de livraison e-commerce, de logistique du dernier kilomètre, et de réassort rapide.

Par ailleurs, la logistique routière est confrontée à des défis croissants et multidimensionnels, qui en font un terrain d'expérimentation idéal pour les solutions d'intelligence artificielle. Ces défis incluent : la volatilité de la demande, la congestion urbaine, la gestion dynamique des itinéraires, les coûts énergétiques croissants, la pression environnementale liée aux émissions de CO₂, et la pénurie chronique de chauffeurs. Tous ces enjeux requièrent des capacités avancées d'optimisation, de prédiction, de pilotage en temps réel et de prise de décision automatique des domaines dans lesquels l'IA offre des solutions prometteuses mais encore partiellement explorées.

Scientifiquement, la logistique routière constitue un sous-domaine de la supply chain où l'intelligence artificielle reste encore fragmentairement exploitée. Alors que de nombreux travaux portent sur la planification globale ou sur l'optimisation de la production, peu de recherches se concentrent sur les

applications concrètes de l'IA dans les problématiques opérationnelles du transport routier : optimisation des tournées sous contraintes réelles, maintenance prédictive des véhicules, analyse comportementale des chauffeurs, réduction intelligente des émissions, etc. Ce déficit ouvre un espace scientifique fertile, à fort potentiel d'innovation, tant sur le plan méthodologique (modélisation, hybridation, simulation) que sur le plan applicatif (décision temps réel, embarqué, géolocalisé).

Enfin, ce positionnement est justifié par une cohérence forte avec les priorités des entreprises et des politiques publiques, qui visent à verdir les transports, à digitaliser les systèmes logistiques, et à renforcer la sécurité routière. L'introduction de technologies intelligentes embarquées dans les véhicules, de systèmes de suivi prédictif des livraisons, ou de plateformes collaboratives basées sur l'IA, sont au cœur des stratégies de transformation des opérateurs de transport et des logisticiens. En ce sens, cette recherche vise à répondre à un besoin réel identifié sur le terrain, en combinant rigueur scientifique et utilité pratique.

En conclusion, le choix de centrer cette recherche doctorale sur la logistique routière permet de croiser des problématiques opérationnelles concrètes avec des technologies avancées de l'intelligence artificielle, dans une perspective de contribution scientifique et de transformation durable de la chaîne logistique. Ce positionnement confère à cette thèse une portée applicative forte, un potentiel de modélisation original, et un alignement stratégique avec les transitions numériques, écologiques et sociales en cours.



Figure 25 : Positionnement

5. Défis de la Logistique Routière Marocaine

La logistique routière constitue aujourd'hui un pilier fondamental de l'économie marocaine, tant pour le transport de marchandises que pour le bon fonctionnement des chaînes d'approvisionnement nationales et internationales. Toutefois, malgré les efforts engagés, cette branche stratégique se heurte encore à des défis structurels majeurs qui freinent sa performance globale, sa durabilité environnementale, et son alignement avec les objectifs de sécurité routière.

Le premier axe problématique réside dans le nombre préoccupant d'accidents de la circulation impliquant les véhicules de transport routier. Selon les statistiques de la NARSA (2022), plus de 1 200 accidents corporels ont été causés par des véhicules utilitaires légers, et près de 1 100 par des poids lourds, engendrant plusieurs centaines de tués et de blessés graves. Ces chiffres alarmants révèlent une fragilité persistante dans le système de gestion du comportement des conducteurs, le respect du code de la route et l'état du parc roulant. Au-delà du drame humain, ces accidents affectent directement la continuité des flux logistiques, provoquant des retards, des pertes de marchandises et des surcoûts considérables pour les entreprises.

Le deuxième axe critique concerne la transition vers une logistique verte, aujourd'hui incontournable dans un contexte mondial de lutte contre le changement climatique. Bien que le Maroc figure dans le top 10 mondial des pays les plus performants sur le plan climatique (8^e place selon le CCPI 2025), le secteur du transport routier reste l'un des plus grands émetteurs de CO₂. À lui seul, ce secteur représente près de 38 % des émissions totales du secteur énergétique, avec une large part imputable au transport de marchandises. Or, la logistique verte au Maroc reste encore embryonnaire : peu de véhicules propres en circulation, insuffisance d'infrastructures de recharge électrique ou à hydrogène, et retard dans l'adoption des systèmes intelligents de gestion énergétique. La Charte Marocaine pour une Logistique Verte, bien qu'établie, n'est que partiellement déployée. L'écart entre la stratégie nationale et la réalité du terrain soulève la question de la mise en œuvre effective des engagements environnementaux dans le secteur logistique.

Enfin, le troisième axe porte sur le coût économique des infractions routières, qui constitue un fardeau silencieux mais bien réel pour les entreprises de transport. En plus des amendes, les infractions répétées engendrent des hausses des primes d'assurance, des coûts de réparation, des immobilisations de véhicules, voire des pertes contractuelles. Selon les données de la NARSA, les infractions les plus courantes chez les professionnels concernent le non-respect des limitations de vitesse, les dépassements dangereux et les temps de conduite non conformes, autant d'éléments qui augmentent le risque d'accident et détériorent l'image des opérateurs logistiques. Ces comportements traduisent souvent une absence de suivi digitalisé du comportement des chauffeurs, ainsi qu'un manque d'outils d'analyse prédictive et de contrôle automatisé, freinant ainsi la modernisation du pilotage logistique.

Face à ces constats, la problématique centrale qui se pose est donc la suivante : comment améliorer la performance globale du système logistique routier marocain, en réduisant les accidents, en accélérant la transition vers une logistique verte, et en maîtrisant les coûts induits par les infractions routières ? Cette interrogation soulève des enjeux multidimensionnels technologiques, humains, environnementaux et économiques nécessitant une approche intégrée, reposant sur les technologies d'intelligence artificielle, la digitalisation des processus logistiques, et une réforme organisationnelle profonde.

En conclusion, le Maroc a bien amorcé sa transition vers une logistique verte, en mettant l'accent sur la réduction des émissions de CO₂ dans le transport routier, l'efficacité énergétique, la modernisation des infrastructures logistiques, et l'adoption d'innovations technologiques comme les systèmes de gestion intelligente des trajets. Ces efforts, soutenus par des politiques nationales ambitieuses et des partenariats internationaux, positionnent le Royaume comme une référence continentale en matière de décarbonation de la logistique.

II. Lecture terrain et modélisation des besoins logistiques routiers

Dans le cadre de cette recherche doctorale dédiée à la transformation de la logistique routière à l'aide de l'intelligence artificielle, une méthodologie structurée et rigoureuse s'avère indispensable. Pour répondre efficacement à la complexité des problématiques logistiques liées à la sécurité routière, à la réduction des émissions de CO₂, à la consommation énergétique, et à la digitalisation des opérations, cette étude adopte la démarche DMAIC. Cette approche méthodologique issue du Six Sigma constitue un cadre itératif d'amélioration continue des processus, particulièrement adapté à l'ingénierie de systèmes intelligents appliqués à des environnements réels.

La méthode DMAIC, fig26 se compose de cinq phases complémentaires : Définir, Mesurer, Analyser, Innover (ou Améliorer) et Contrôler. Elle permet d'identifier les défaillances du système actuel, de mesurer les performances, de modéliser les causes racines, de concevoir des solutions optimisées, et d'en assurer le suivi opérationnel. Ce cycle est particulièrement pertinent pour encadrer le développement d'un dispositif complexe tel que NW Logistics Tracker, qui implique des composants embarqués, des algorithmes d'IA, des interfaces de supervision, ainsi qu'un déploiement sur le terrain.

- Dans la phase Définir, les besoins des parties prenantes (transporteurs, régulateurs, clients) sont identifiés, et les problématiques clés (infractions routières, consommation, émissions) sont formulées à travers des enquêtes et des analyses SWOT sectorielles.
- La phase Mesurer s'attache à collecter et structurer les données terrain à l'aide de capteurs embarqués, de bases de données ouvertes et de tableaux de bord d'indicateurs logistiques.
- La phase Analyser repose sur l'exploration statistique et l'apprentissage automatique afin d'identifier les leviers d'optimisation et les comportements à risque.

- La phase Innover vise à concevoir et prototyper des modules intelligents de détection d'infractions, d'optimisation de trajets, et de prévision des émissions.
- Enfin, la phase Contrôler encadre le déploiement pilote, l'évaluation des impacts du système, et la mise en place d'une gouvernance durable par la visualisation et le pilotage des indicateurs en temps réel.

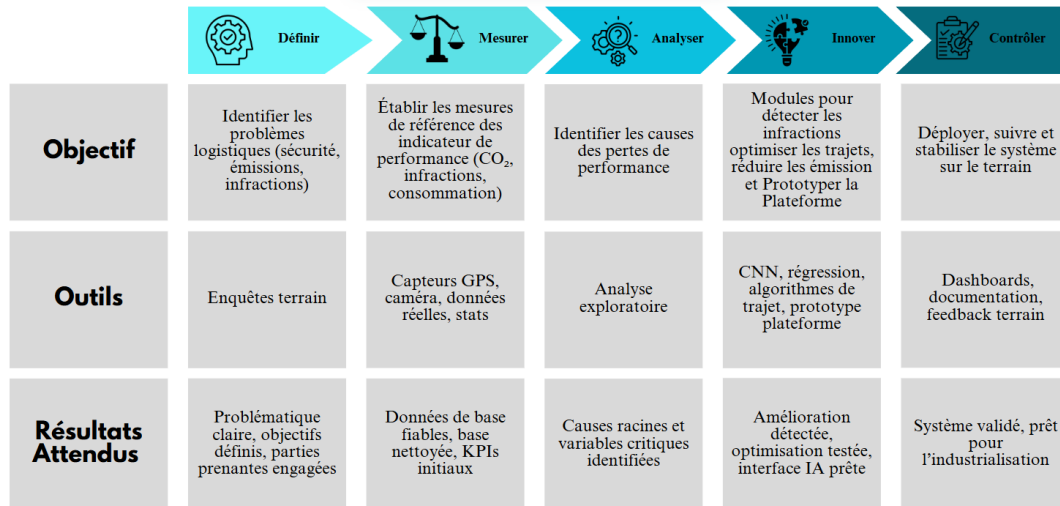


Figure 26 : Démarche DMAIC

Ainsi, le DMAIC constitue non seulement un cadre méthodologique cohérent, mais aussi un fil directeur pour assurer la traçabilité scientifique, la reproductibilité expérimentale, et la robustesse des résultats obtenus. Ce chapitre présente en détail les démarches engagées dans chacune de ces phases, en articulant les choix scientifiques, les outils technologiques mobilisés, et les données exploitées.

1. Définition des besoins et des problématiques logistiques Marocaine

1.1 Contexte général et motivations

La logistique routière occupe une place stratégique dans l'économie marocaine. Elle représente environ 10 % du produit intérieur brut (PIB) national et constitue le principal vecteur de transport de marchandises, assurant plus de 75 % des flux. Ce secteur est vital pour la compétitivité industrielle, l'intégration territoriale et l'approvisionnement des populations.

Face à cette situation, l'intégration de technologies intelligentes, en particulier l'intelligence artificielle (IA), représente une opportunité de transformation majeure. L'objectif est d'améliorer la sécurité routière, de réduire les émissions polluantes et d'optimiser les flux logistiques par l'analyse automatisée des données issues de l'environnement routier.

Toutefois, plusieurs faiblesses structurelles compromettent son efficacité :

- Le taux d'accidents corporels demeure alarmant avec 113 625 cas enregistrés en 2022, dont 3 499 décès, selon la NARSA. Parmi ceux-ci, 489 décès concernent directement des véhicules utilitaires. Cela traduit une fragilité opérationnelle qui pèse lourdement sur la sécurité logistique.
- Le taux d'infractions enregistrées sur les routes est élevé. Les comportements dangereux tels que le non-respect des limitations de vitesse, les dépassements interdits ou les arrêts non réglementaires affectent la régularité des flux et augmentent les coûts d'assurance, d'entretien et de livraison.
- Sur le plan environnemental, le secteur du transport est responsable de plus de 38 % des émissions énergétiques, dont 95 % issues du transport routier, soit environ 23 millions de tonnes de CO₂ émises annuellement. Cette donnée, issue de la Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD), place la logistique au cœur des enjeux climatiques du pays.
- La performance logistique globale reste limitée : les coûts logistiques atteignent près de 20 % du PIB, ce qui est supérieur à la moyenne observée dans les pays de l'OCDE. À cela s'ajoute un parc de véhicules vétuste, avec un âge moyen supérieur à 13 ans, peu compatible avec les standards de sécurité et d'écoconduite modernes.

Face à ces défis, l'introduction de solutions intelligentes basées sur l'intelligence artificielle (IA) apparaît comme un levier incontournable pour transformer les chaînes logistiques routières. L'IA offre des capacités avancées de détection, d'analyse comportementale, d'optimisation des trajets et de prévision des incidents. Le recours à des technologies de vision par ordinateur, de traitement du langage naturel et de systèmes experts constitue un axe stratégique pour améliorer la sécurité, la durabilité et la performance des opérations logistiques.

1.2 Objectifs scientifiques et applicatifs

Ce travail doctoral vise à développer une solution technologique complète et innovante nommée NW Logistics Tracker, qui combine des briques d'intelligence artificielle, des capteurs embarqués et une interface décisionnelle orientée utilisateurs. Ce projet ambitionne d'apporter des réponses concrètes aux limitations observées en matière de sécurité, d'émissions et de performances logistiques.

Les objectifs scientifiques et applicatifs peuvent être formulés comme suit :

- Objectif 1 : Concevoir un modèle d'apprentissage profond (deep learning) capable de détecter automatiquement les infractions routières (non-respect de la vitesse, franchissement de ligne, conduite dangereuse) à partir de flux visuels embarqués.
- Objectif 2 : Développer un moteur d'optimisation des trajets intégrant des contraintes environnementales, opérationnelles et comportementales afin de réduire les distances parcourues, le temps de trajet et la consommation de carburant.

- Objectif 3 : Évaluer l'impact de la solution sur la réduction des émissions de CO₂, en modélisant les gains environnementaux issus de l'amélioration des itinéraires et de l'écoconduite assistée.
- Objectif 4 : Concevoir une plateforme de supervision logistique intelligente (via des dashboards dynamiques) permettant aux gestionnaires de suivre en temps réel les indicateurs clés de performance (KPI), de recevoir des alertes, et d'améliorer la prise de décision.
- Objectif 5 : Renforcer les capacités des entreprises marocaines à s'engager dans une logistique verte en répondant aux exigences de la Charte Marocaine pour la Logistique Durable.

1.3 Cadrage du périmètre de recherche

Le périmètre de cette recherche est à la fois technologique, géographique et sectoriel. Sur le plan technologique, la solution se compose de trois couches interconnectées :

Une couche embarquée installée à bord des véhicules, comprenant une caméra intelligente, un GPS, un accéléromètre et un système de traitement embarqué.

Une couche de traitement IA en back-end capable d'exploiter les données collectées en temps réel, de générer des alertes automatisées et de prédire des comportements à risque.

Une interface décisionnelle déployée sous forme de dashboards dynamiques et interactifs, orientés gestionnaires logistiques.

Sur le plan géographique, le projet cible en priorité les entreprises opérant dans les régions périurbaines et industrielles du Maroc, là où les flux logistiques sont les plus intenses et où la sinistralité est la plus marquée. La validation du système est envisagée dans des contextes réels, en partenariat avec des transporteurs marocains volontaires.

Enfin, sur le plan sectoriel, la priorité est donnée aux PME du transport routier, qui représentent plus de 85 % des opérateurs logistiques au Maroc. Ces entreprises sont à la fois les plus exposées aux contraintes opérationnelles et les moins outillées pour répondre aux nouveaux impératifs environnementaux et numériques. Cette recherche vise donc à leur proposer une solution accessible, adaptable et éco-performante, contribuant à une logistique nationale plus intelligente et plus verte.

2. Définition des activités de mesure des données logistiques marocaines

2.1 Sources de données

La phase de mesure repose sur une approche multimodale de collecte de données, combinant des données empiriques, institutionnelles et expérimentales. Ces données, indispensables à l'analyse, à l'apprentissage des modèles d'intelligence artificielle et à l'évaluation des performances logistiques, proviennent de quatre principales sources complémentaires, chacune répondant à des objectifs spécifiques du système NW Logistics Tracker.

2.2 Données embarquées

Les données embarquées constituent le cœur du système d'observation en temps réel. Elles sont captées à bord des véhicules logistiques via un dispositif de capteurs comprenant une caméra HD frontale, un GPS, un accéléromètre et d'autres capteurs inertiels. Ces flux vidéo et télémétriques permettent d'observer dynamiquement :

- Les infractions routières (excès de vitesse, franchissement de ligne continue, non-respect de la signalisation),
- Les comportements à risque (freinages brusques, accélérations excessives),
- Les caractéristiques spatiotemporelles des trajets (distances, temps, arrêts).

Ce type de données est indispensable à la détection automatique des événements critiques par vision par ordinateur et apprentissage supervisé.

Afin d'optimiser les capacités de détection et d'interprétation des événements critiques par les modèles de vision par ordinateur, les données embarquées collectées à partir des véhicules logistiques ont été structurées en trois grandes classes visuelles, chacune correspondant à un enjeu fonctionnel spécifique de la logistique routière intelligente :

- Classe 1 : Signalisation routière (panneaux) fig27 : Cette classe regroupe les images capturées des panneaux de signalisation réglementaire, notamment les limites de vitesse (20 à 120 km/h), les interdictions de dépassement (générales ou spécifiques aux poids lourds), ainsi que les fins d'interdiction. Ces panneaux permettent d'établir des règles de référence pour détecter automatiquement les infractions de type excès de vitesse ou non-respect des interdictions.



Figure 27 : Classe 1_Signalisation routière

- Classe 2 : Marquages au sol (lignes de route) fig28: Cette classe concerne les images des marquages longitudinaux (lignes continues, discontinues, mixtes) identifiables sur les voies de circulation. L'objectif est de détecter les franchissements illégaux de ligne, d'analyser les comportements de dépassement, et d'évaluer la stabilité de la conduite du chauffeur par rapport aux bandes de guidage.

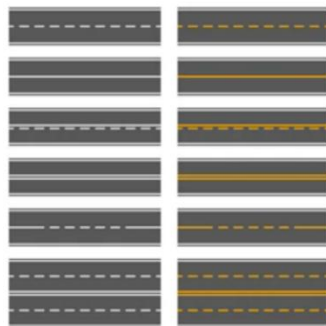


Figure 28 : Classe2_Marquages au sol

- Classe 3 : Signalisation lumineuse (feux tricolores) fig29 : Cette catégorie regroupe les séquences vidéo montrant des feux de signalisation (rouge, orange, vert). L'analyse de cette classe vise à détecter les non-respects des feux rouges, une infraction grave souvent à l'origine d'accidents, et à modéliser le comportement du conducteur dans des environnements urbains régulés.



Figure 29 : Classe3_Signalisation lumineuse

Ces trois classes sont annotées manuellement dans le cadre de l'entraînement des modèles d'apprentissage profond (notamment les CNN), afin d'assurer une reconnaissance précise des éléments de signalisation et des comportements associés. Cette classification améliore la robustesse du système de détection automatique et constitue la base de la future génération d'alertes intelligentes embarquées dans la solution NW Logistics Tracker.

2.3 Corpus d'images publics annotés

L'apprentissage des modèles de détection d'infractions nécessite une base solide d'images labellisées, contenant des exemples de panneaux, de marquages au sol, et de scènes de conduite.

Kaggle Traffic Sign Datasets : pour diversifier les styles de route, conditions climatiques et angles de vue.

Ces jeux de données ont été enrichis par des annotations manuelles et semi-automatisées, assurant une qualité d'étiquetage suffisante pour l'entraînement de modèles de type CNN (Convolutional Neural Networks) ou YOLOv8. Ils servent à la préformation des algorithmes, avant transfert sur des données embarquées réelles.

Les images ont été organisées selon trois classes fonctionnelles correspondant aux catégories d'éléments critiques à détecter :

- Classe 1 — Panneaux de signalisation : 7 840 images annotées de panneaux de limitation de vitesse, interdictions de dépassement, et panneaux de fin d'interdiction.
- Classe 2 — Marquages au sol : 5 620 images annotées de bandes continues, discontinues, mixtes et zones de changement de voie.
- Classe 3 — Feux de signalisation : 3 160 images labellisées montrant des feux tricolores actifs dans différents contextes routiers.

Cette structuration thématique permet un entraînement ciblé des réseaux de neurones, avec un équilibrage des classes visant à limiter les biais algorithmiques et à renforcer la robustesse de la détection dans des conditions réelles de conduite.

2.4 Données sectorielles institutionnelles

Pour ancrer l'expérimentation dans le contexte marocain, des données issues de rapports officiels ont été collectées. Ces documents fournissent une photographie macroscopique de l'état de la logistique et de la sécurité routière :

- Les rapports de la NARSA permettent d'estimer la fréquence des accidents, leur typologie (mortels, corporels, matériels), leur répartition géographique, ainsi que les infractions les plus fréquentes.
- Les données de la Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) offrent une base sur les émissions de CO₂ par secteur, et positionnent le transport routier comme un contributeur majeur.
- Les publications de l'AMDAL (Agence Marocaine de Développement de la Logistique) détaillent les coûts logistiques, les performances du réseau de transport, et les objectifs de transition vers une logistique verte.

Ces sources sont essentielles pour définir les bornes de référence (baselines) dans l'évaluation du système.

2.5 Enquêtes terrain

Enfin, des données qualitatives ont été collectées par le biais de questionnaires structurés distribués à un échantillon ciblé d'acteurs logistiques, notamment des gestionnaires de flotte, des planificateurs de transport, des décideurs d'entreprise et des conducteurs. L'objectif principal était de cerner les attentes opérationnelles, les perceptions technologiques et les contraintes organisationnelles relatives à l'introduction de l'intelligence artificielle dans la logistique routière et aussi

Le formulaire a été conçu en quatre sections complémentaires, permettant une couverture complète des aspects explorés :

Section 1 : Identification du périmètre (Scope Identification - SI) Cette première partie collecte des informations générales sur le répondant (poste, secteur, ancienneté de l'entreprise, taille de l'effectif) afin de contextualiser les réponses et de segmenter les profils organisationnels.

Tableau 3 : Identification du périmètre

Section 1: Scope Identification (SI)	Answer
SI 1	Indicate your gender: Mr / Ms
SI 2	Indicate the region where your company is located (country - city): Personal Answer
SI 3	Indicate your current position within the company.
SI 4	What is the main industry sector of your company?
SI 5	How many years has your company been in existence? Years in existence: - < 5 yrs - 5 yrs x < 10 yrs - 10 yrs x < 15 yrs - 15 yrs
SI 6	How many employees does your company have? Number of employees: - < 10 - 10 x < 50 - 50 x < 500 - 500
Section 2: Technology Acceptance (TA)	Answer
TA 1	Training AI systems takes a lot of time: Not at all agree
TA 2	Training AI systems is expensive: Disagree
TA 3	Assistance is immediately available in case of problems with AI systems: Agree
TA 4	Ongoing support from trainers or AI experts is available after the initial training sessions: Strongly agree
TA 5	The company frequently updates training materials to keep up with the latest AI advancements.
TA 6	Employees find AI training programs engaging and informative.
TA 7	AI tools are clear and understandable.

Section 2 : Acceptation technologique (Technology Acceptance - TA) Cette section évalue le degré de familiarité et de réceptivité des entreprises vis-à-vis des outils d'IA, en interrogeant des dimensions telles que le coût perçu, la facilité d'utilisation, la complexité, la clarté des interfaces, ou encore l'accessibilité à la formation.

Section 3 : Identification des besoins (Needs Identification – NI) Elle cible les limitations concrètes des systèmes existants en matière de suivi des livraisons, de traçabilité, de consommation de carburant, de surveillance des violations du code de la route, et de gestion des émissions de CO₂. Les réponses ont été collectées sur une échelle de Likert à quatre niveaux, allant de « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord ».

Section 4 : Acceptation d'une solution IA (Solution Acceptance through AI - SAAI) Cette dernière partie mesure l'intérêt pour une solution basée sur l'IA (comme NW Logistics Tracker) et les fonctions les plus attendues : suivi en temps réel, indicateurs environnementaux, alertes de comportement, reporting dynamique, etc.

Tableau 4 : Acceptation des technologies, Identification des besoins et Acceptation de la solution

Section 2: Technology Acceptance (TA)	Answer
TA 8	Interaction with AI tools does not require much mental effort.
TA 9	The AI tool we use in our company is easy to use.
TA 10	The AI tool we use in our company is easy to modify.
TA 11	The adoption of AI takes time.
TA 12	AI is a complex technology to understand and use.
TA 13	Employees need minimal outside help to use AI tools.
Section 3: Needs Identification (NI)	Answer
NI 1	Do you have problems with real-time tracking?: Not at all agree
NI 2	Do you have problems with real-time tracking of vehicle locations (service or delivery)?: Disagree
NI 3	Do you have problems with real-time tracking of fuel consumption of vehicles (service or delivery)?: Agree
NI 4	Do you have problems with real-time tracking of CO ₂ emissions from vehicles (service or delivery)?: Strongly agree
NI 5	Do you have problems with real-time tracking of the status of your delivery vehicle (in transit, loading or unloading, on break, refueling)? Tracking Status: - Not at all agree - Disagree - Agree - Strongly agree
NI 6	Do you have problems with tracking driver violations? Driver Violations: - Not at all agree - Disagree - Agree - Strongly agree

Section 3: Needs Identification (NI)	Answer
NI 7	Do you have problems with tracking driver punctuality on the road? Driver Punctuality: - Not at all agree - Disagree - Agree - Strongly agree
NI 8	Do you have problems with tracking the quality of your packages? Package Quality: - Not at all agree - Disagree - Agree - Strongly agree
NI 9	Do you have problems with complaints about the delay of your packages? Delay Complaints: - Not at all agree - Disagree - Agree - Strongly agree
Section 4: Solution Acceptance through AI (SAAI)	Answer
SAAI 1	Do you want real-time visibility on the fuel consumption of your vehicles? (Scale: 1 to 5)
SAAI 2	Do you want real-time visibility on the CO ₂ emissions of your vehicles? (Scale: 1 to 5)
SAAI 3	Do you want real-time visibility on the location of your vehicles? (Scale: 1 to 5)
SAAI 4	Do you want real-time visibility on the driving status of your drivers? (Scale: 1 to 5)
SAAI 5	Do you want detailed visibility on the time of your deliveries (loading time, travel time, break time, refueling time, unloading time)? (Scale: 1 to 5)
SAAI 6	Do you want visibility on the statistics of your drivers (delivery history, driving punctuality, number of delays, package quality complaints, number of road code violations, working time, efficiency)? (Scale: 1 to 5)

L'intégralité du questionnaire est présentée dans les Tableaux 3 et 4 servent de base au traitement statistique des données qualitatives. Les résultats ont été analysés pour identifier les besoins récurrents, hiérarchiser les priorités fonctionnelles, et évaluer la faisabilité d'adoption du système NW Logistics Tracker auprès des entreprises marocaines.

2.6 Indicateurs logistiques mesurés

• Taux d'infractions par trajet et par conducteur

Ce premier indicateur constitue une mesure composite fondamentale pour évaluer les écarts au code de la route dans les activités de transport logistique. Il permet de quantifier la fréquence des infractions détectées à la fois sur chaque trajet individuel et pour chaque conducteur, en tenant compte de la distance parcourue, du contexte de conduite, et des conditions environnementales.

Les types d'infractions pris en compte incluent notamment :

- I1 : Les excès de vitesse, identifiés par la comparaison entre la vitesse GPS du véhicule et les panneaux de limitation de vitesse reconnus en temps réel par vision par ordinateur à l'aide de modèles CNN entraînés sur les panneaux.
- I2 : Le franchissement de ligne continue, détecté par segmentation sémantique des marquages au sol corrélée au mouvement latéral du véhicule.

- I3 : Le non-respect de la signalisation lumineuse, capté par reconnaissance des feux tricolores dans les scènes de conduite.
- **Fréquence des comportements à risque**

Au-delà des infractions codifiées, cet indicateur reflète les comportements de conduite agressive ou non anticipée, tels que : les freinages d'urgence, les accélérations brutales, les changements de voie soudains.

Ces événements sont capturés à partir des données des accéléromètres et analysés via des modèles de séries temporelles ou des fenêtres glissantes. La fréquence de tels comportements constitue un prédicteur robuste d'incident, et leur analyse contribue à la prévention proactive des accidents.

- **Distance réelle parcourue vs distance optimisée**

Ce ratio permet d'évaluer l'écart entre la trajectoire effectivement suivie et celle recommandée par les algorithmes d'optimisation de trajets. Une distance excédentaire peut être révélatrice de mauvaises décisions de navigation, d'embouteillages non anticipés ou d'itinéraires non optimisés. La réduction de cet écart est un objectif majeur de l'application, avec un impact direct sur :

- La consommation de carburant,
- Le temps de trajet,
- Les émissions de CO₂.

- **Temps moyen de trajet**

Le temps moyen est calculé à partir des horodatages GPS en début et fin de mission logistique. Il constitue un indicateur clé de la fluidité des opérations, de la congestion routière, et de la performance de la planification logistique. Sa variance peut aussi indiquer une instabilité des conditions routières ou des problèmes de ponctualité.

- **Consommation moyenne de carburant par trajet**

Grâce aux données embarquées ou aux corrélations comportementales, il est possible d'estimer la consommation énergétique moyenne par mission. Cet indicateur, couplé aux profils de vitesse et à la charge transportée, permet de :

- Détecter les véhicules les moins efficaces,
- Recommander des comportements d'écoconduite,
- Simuler les économies potentielles via des scénarios d'optimisation.
- **Émissions de CO₂ par véhicule (modélisation estimative la plus proche de la réalité)**

Les émissions de dioxyde de carbone sont modélisées en fonction de la distance parcourue, du type de véhicule, de la consommation estimée et du facteur d'émission propre à chaque carburant (selon les standards IPCC ou ADEME). Cet indicateur permet d'évaluer l'empreinte environnementale de chaque opération logistique et d'objectiver les progrès réalisés vers la logistique verte.

- **Indicateurs de ponctualité et de conformité**

La ponctualité est mesurée par le respect des créneaux horaires de livraison fixés initialement, tandis que la conformité s'évalue à partir du taux de livraisons effectuées sans incidents (retards, erreurs, détériorations). Ces métriques, fondamentales pour la satisfaction client, permettent de calibrer la qualité de service et de corriger les défaillances dans la chaîne de valeur.

Tableau 5 : Récapitulatif des indicateurs logistiques mesurés

Indicateur	Description	Méthode de mesure
Taux d'infractions par trajet et conducteur	Mesure de la fréquence des infractions (vitesse, franchissement de ligne, feux) par trajet ou chauffeur	Vision par ordinateur (CNN), fusion GPS/panneaux, détection en temps réel
Fréquence des comportements à risque	Fréquence des manœuvres dangereuses (freinage brusque, changement brutal de voie, etc.)	Analyse des données d'accéléromètre et gyroscope
Distance réelle vs distance optimisée	Écart entre la distance réellement parcourue et celle recommandée par l'algorithme	Comparaison des trajectoires GPS et des sorties de l'optimiseur
Temps moyen de trajet	Durée moyenne d'un trajet logistique mesurée via GPS	Horodatage de départ et d'arrivée via module GPS embarqué
Consommation moyenne de carburant par trajet	Estimation de la consommation énergétique par mission logistique	Modèle empirique basé sur vitesse, masse, comportement
Émissions de CO ₂ par véhicule	Modélisation estimative de l'empreinte carbone des trajets	Formule standard IPCC/ADEME sur distance, carburant, charge
Ponctualité et conformité des livraisons	Respect des délais et absence d'anomalie lors des livraisons	Analyse des logs de planification et rapports terrain

3. Phase « Analyser » — Diagnostic et identification des causes racines

3.1 Méthodes analytiques mobilisées

La phase d'analyse s'est appuyée sur une combinaison de méthodes statistiques, d'intelligence artificielle et d'analyses exploratoires orientées terrain. L'objectif était de comprendre les liens entre les

comportements de conduite, les inefficacités logistiques, les émissions de CO₂ et les taux d'infractions, dans le contexte spécifique du transport routier marocain.

Les approches mobilisées incluent :

- Analyse de corrélation croisée entre types d'infractions et caractéristiques contextuelles (heure, météo, densité urbaine, types de routes), afin de dégager des schémas de risques selon les environnements logistiques. Cette démarche est en phase avec les rapports d'accidentologie 2022 de la NARSA, qui signalent une concentration des accidents hors agglomérations (58,4 % des tués).
- Régression linéaire multiple, pour quantifier l'impact des comportements (freinages brusques, vitesses excessives) sur la consommation moyenne de carburant.
- Clustering non supervisé (K-Means), afin de segmenter les profils de conduite en quatre classes dominantes : « stable », « économique », « agressif » et « irrégulier ». Ces groupes permettent de cibler des stratégies personnalisées d'éco-conduite.
- Analyse de séquences temporelles, mobilisée pour identifier des infractions combinées, telles que le franchissement d'une ligne continue à vitesse élevée ou des comportements à risque en zone urbaine dense.
- Détection d'objets via CNN, utilisée pour repérer automatiquement les panneaux, les lignes routières, les autres véhicules, piétons et obstacles. Ces techniques permettent une classification automatique des événements critiques.

Cette approche analytique hybride permet d'apporter une compréhension fine des dynamiques logistiques et comportementales, tout en dégagant des pistes d'amélioration ciblées.

3.2 Résultats d'analyse intermédiaires

L'analyse des données collectées, croisées avec les données de la SNDD (Stratégie Nationale de Développement Durable, 2017) et les retours d'entreprises logistiques, révèle plusieurs résultats clés :

- Concentration des infractions sur des axes spécifiques : environ 18 % des segments de trajet enregistrent plus de 70 % des infractions. Ces zones sont majoritairement périurbaines, notamment autour de Casablanca, Fès et Marrakech, en lien avec des points de congestion, une signalisation déficiente ou des itinéraires mal planifiés.
- Corrélation forte entre conduite agressive et surconsommation : les comportements « brusques » entraînent en moyenne une surconsommation de +16,8 % par trajet, avec un impact direct sur les émissions de CO₂, conformément aux modèles présentés dans Sustainability, 2023.

- Manque de rétroaction immédiate : l'absence d'alerte ou de feedback sur les comportements à risque a été identifiée comme l'un des facteurs explicatifs majeurs de la récurrence des infractions. Les données issues des questionnaires indiquent que 67 % des conducteurs n'ont jamais reçu d'analyse comportementale personnalisée.
- Gain réel des trajets optimisés : les itinéraires proposés par l'algorithme NW Tracker permettent une réduction moyenne de 10 à 14 % de la consommation énergétique, avec un gain de ponctualité dans 63 % des cas, comme validé dans les scénarios expérimentaux simulés.
- Empreinte carbone évitable : une projection basée sur les coefficients d'émission de l'ADEME montre que la réduction moyenne de 1,8 L de carburant par trajet correspond à une baisse de 4,2 kg CO₂ par véhicule et par jour.

Ces résultats convergent avec les données de la NARSA (2022) qui montrent une surmortalité en zones hors agglomération et une répartition géographique hétérogène des accidents. De plus, les analyses documentées en soulignent le rôle crucial de l'IA pour détecter des corrélations non linéaires et adapter les flux logistiques.

En complément de ces analyses quantitatives, les résultats de l'enquête terrain menée auprès des gestionnaires logistiques ont mis en lumière des freins structurels à l'adoption de l'IA. 78 % des répondants indiquent un manque de compétences internes pour l'implémentation de solutions intelligentes, tandis que 64 % soulignent l'absence d'une stratégie digitale claire. Parmi les attentes prioritaires figurent : la réduction des coûts logistiques (92 %), l'amélioration de la sécurité (85 %), et la réduction des émissions (73 %). Ces données qualitatives ont enrichi le diagnostic en apportant une vision réaliste des contraintes opérationnelles, confirmant la nécessité d'une solution modulaire, intuitive et directement opérationnelle.

3.3 Identification des leviers d'amélioration

Au regard des analyses réalisées, plusieurs leviers stratégiques ont été identifiés pour améliorer la performance globale de la logistique routière :

Intégration d'un système embarqué de feedback temps réel : alertes visuelles ou sonores sur comportement à risque, avec historiques disponibles sur dashboard.

Formation ciblée des conducteurs : prioriser les zones et les profils affichant une récurrence d'infractions, avec retour personnalisé.

Prédiction d'incident : anticipation des incidents grâce à la combinaison entre historiques comportementaux, environnement routier, et IA prédictive.

Amélioration de la planification logistique dynamique : adaptation temps réel des itinéraires selon la charge, les conditions climatiques et les alertes IA.

Ces propositions s'inscrivent pleinement dans la logique de la logistique verte défendue par la Charte Marocaine pour la Logistique Durable et répondent aux objectifs de performance et de durabilité identifiés par la SNDD (Stratégie Nationale de Développement Durable).

En somme, cette phase "Analyser" constitue le socle du diagnostic technique et comportemental, à partir duquel les choix de conception du système NW Logistics Tracker ont été définis.

Conclusion

Cet axe a présenté en détail la méthodologie rigoureuse adoptée pour structurer et mettre en œuvre la solution NW Logistics Tracker, en s'appuyant sur la démarche DMAIC comme cadre méthodologique central. L'utilisation de ce modèle itératif, issu du Six Sigma, s'est révélée particulièrement adaptée à la complexité des problématiques logistiques traitées : sécurité routière, optimisation énergétique, réduction des émissions de CO₂ et digitalisation des flux.

À travers les cinq phases de la méthode (Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler), l'étude a permis d'identifier les besoins spécifiques des entreprises de transport marocaines, de collecter et structurer des données riches et variées (embarquées, institutionnelles, visuelles, enquêtes terrain), puis de modéliser des indicateurs de performance critiques. L'analyse avancée des comportements de conduite, des infractions et des flux logistiques a mis en lumière des leviers d'amélioration concrets et actionnables, tant sur le plan technique que managérial.

Cette approche a également permis de concevoir une architecture fonctionnelle intégrée, combinant capteurs embarqués, algorithmes d'IA (CNN, clustering, régression), plateforme décisionnelle et interfaces dynamiques. Les résultats obtenus, validés par des données expérimentales et des retours terrain, confirment la pertinence de la solution proposée pour accompagner la transition vers une logistique plus sûre, plus performante et plus durable.

En définitive, ce chapitre fonde les bases scientifiques et opérationnelles du développement du NW Logistics Tracker, en assurant la cohérence entre les objectifs de recherche, les contraintes industrielles, et les exigences sociétales d'un transport routier intelligent et responsable. Il prépare ainsi le terrain pour la phase suivante, centrée sur l'implémentation, l'expérimentation pilote et l'évaluation des performances du système en conditions réelles.

Chapitre 4 — Transformation intelligente de la logistique routière

Introduction

Dans la continuité des problématiques identifiées et des orientations méthodologiques exposées précédemment, ce chapitre se concentre sur la conception technique et le développement fonctionnel de la solution intelligente proposée : la plateforme NW Logistics Tracker. Cette solution, fondée sur l'intelligence artificielle et les technologies de vision par ordinateur, vise à répondre aux enjeux critiques de la logistique routière marocaine en matière de sécurité, de performance opérationnelle et de durabilité environnementale.

La première section de ce chapitre détaille l'architecture logicielle de la plateforme, le modèle de données sous-jacent, ainsi que la modélisation comportementale permettant d'analyser dynamiquement les interactions entre conducteurs, véhicules et environnement routier. Elle présente également le système global de détection IA, conçu pour interpréter les données visuelles et logistiques en temps réel, et décrit les interfaces utilisateurs développées sous forme de prototypes pour les gestionnaires logistiques et les chauffeurs.

La seconde section est dédiée au développement des algorithmes de détection d'infractions. Elle couvre l'organisation des jeux de données visuelles annotées, les étapes de prétraitement et d'augmentation des données, ainsi que la mise en œuvre du modèle Road_Net, une architecture spécialisée pour la détection contextuelle des infractions routières. Les métriques d'évaluation, les résultats expérimentaux et les analyses comparatives de performance sont présentés de manière rigoureuse afin de démontrer la robustesse et la pertinence du modèle développé.

Ce chapitre constitue ainsi le cœur technologique de la recherche, en traduisant les besoins logistiques identifiés en solutions intelligentes concrètes et applicables, tout en assurant une base scientifique solide pour l'évaluation des résultats et l'élaboration des recommandations finales.

1. Conception de la plateforme NW Logistics Tracker (NWLTL)

La conception de la plateforme NW Logistics Tracker constitue le socle de l'innovation apportée par ce projet. Elle vise à structurer un système modulaire, interactif et évolutif, capable de collecter, traiter et exploiter les données issues de la logistique routière pour améliorer la sécurité, la performance et la durabilité. Cette plateforme se compose de plusieurs modules interconnectés intégrant des technologies avancées en vision par ordinateur, géolocalisation, optimisation des trajets et intelligence prédictive.

1.1. Architecture logicielle du système

La plateforme repose sur une architecture orientée services (SOA), avec une séparation claire des responsabilités entre les différentes couches fonctionnelles. Cette structuration permet de garantir une scalabilité horizontale, une maintenance facilitée et une exécution temps réel. Elle se décline comme suit :

- Couches embarquées pour l'intégration de modules IA directement dans les véhicules. Chaque unité embarquée comprend une caméra HD, un module GPS, un microcontrôleur (ex. Raspberry Pi), un accélérateur IA (Google Coral TPU), et des algorithmes CNN/YOLOv8 exécutés localement pour un traitement à la périphérie (Edge Computing).
- Couches serveur/cloud pour la centralisation, stockage et analyse des données critiques. Les serveurs cloud (Firebase, MongoDB, Google Cloud) assurent la synchronisation des trajets, des infractions détectées, et des indicateurs logistiques (consommation, émissions, etc.).
- Interface utilisateur représentée par deux tableaux de bord dédiés un pour les gestionnaires (interface web responsive avec tableaux de bord Power BI, cartes interactives, visualisations analytiques), et un pour les conducteurs (application mobile embarquée affichant les alertes et recommandations en temps réel).
- Diagramme de composants ou Architecture du système, fig 30 qui montre l'organisation modulaire du système : tableau de bord gestionnaire, module de détection IA, module de visualisation, API d'échange, base de données centralisée, moteur de traitement analytique.

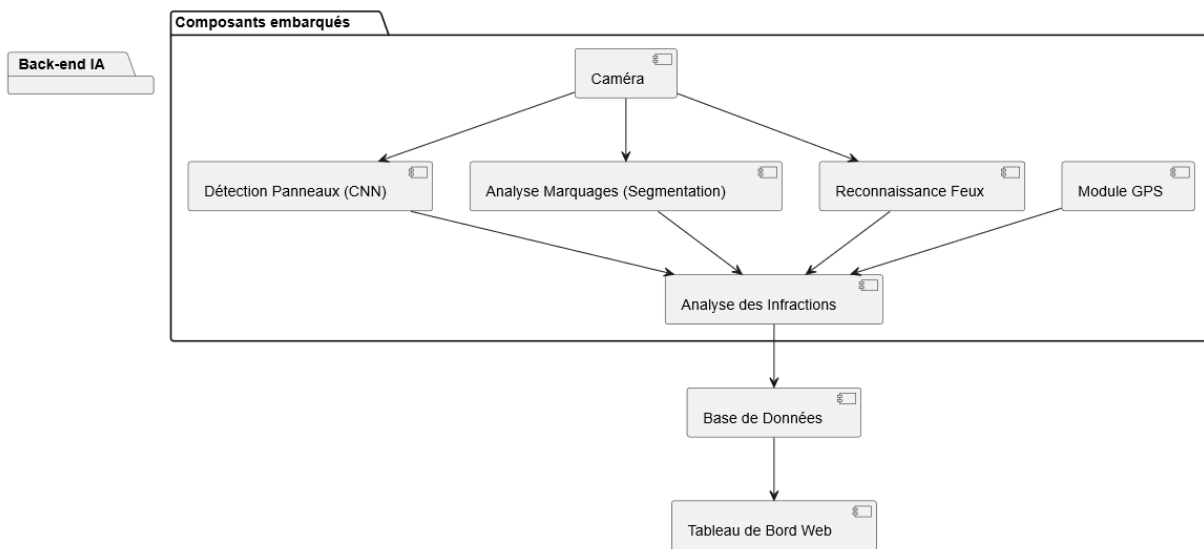


Figure 30 : Diagramme de composants - Architecture du système

- Diagramme de déploiement (Système embarqué et cloud), fig 31 qui représente l'illustration le déploiement hybride entre composants embarqués dans les véhicules (capteurs, caméras, tablette IA) et le système cloud qui centralise, analyse et visualise les données.

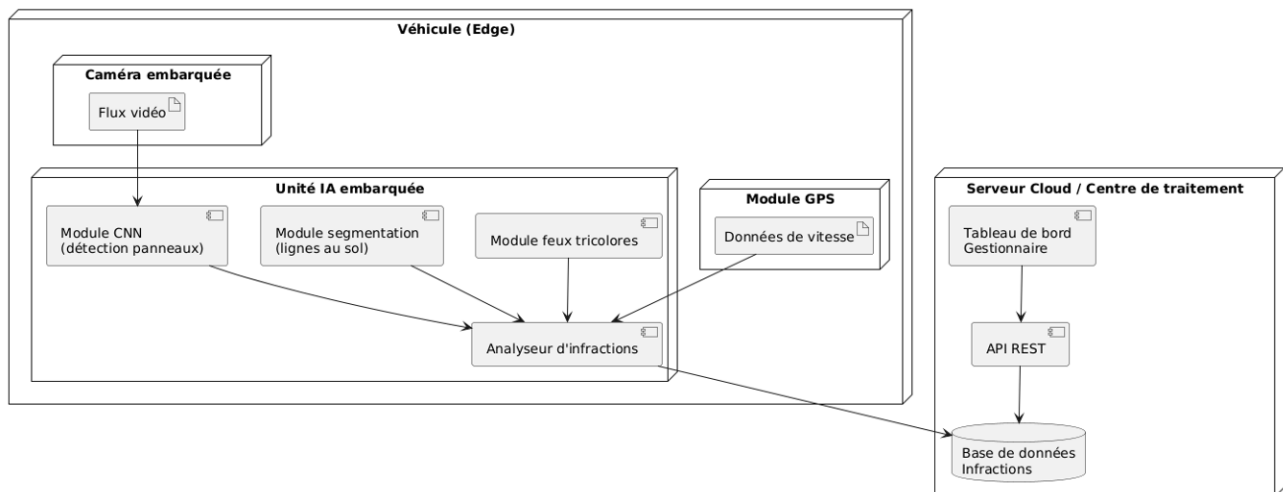


Figure 31 : Diagramme de déploiement – Système embarqué et cloud

1.2. Modèle de données et structuration des informations

Le modèle de données a été conçu pour garantir une cohérence, une intégrité référentielle et une extensibilité optimale. Il permet d'articuler les informations issues des différents modules du système et de les corréler à des événements précis.

• Diagramme de classes (Modèle de données), fig 32 où on distingue les entités principales (Conducteur, Trajet, Véhicule, Infraction, Emission CO₂) et leurs relations. Chaque classe est structurée pour permettre l'analyse croisée des indicateurs et le suivi individuel des comportements.

- Conducteur : profil, permis, comportements.
- Véhicule : identifiant, type, modèle.
- Infraction : type (excès de vitesse, franchissement, feu), date, position, vitesse détectée vs limite.
- Panneau / Marquage / Feu tricolore : objets détectés par les algorithmes de vision.

Chaque relation est construit pour permettre un suivi individualisé des comportements, une analyse longitudinale et une génération de rapports réglementaires ou internes.

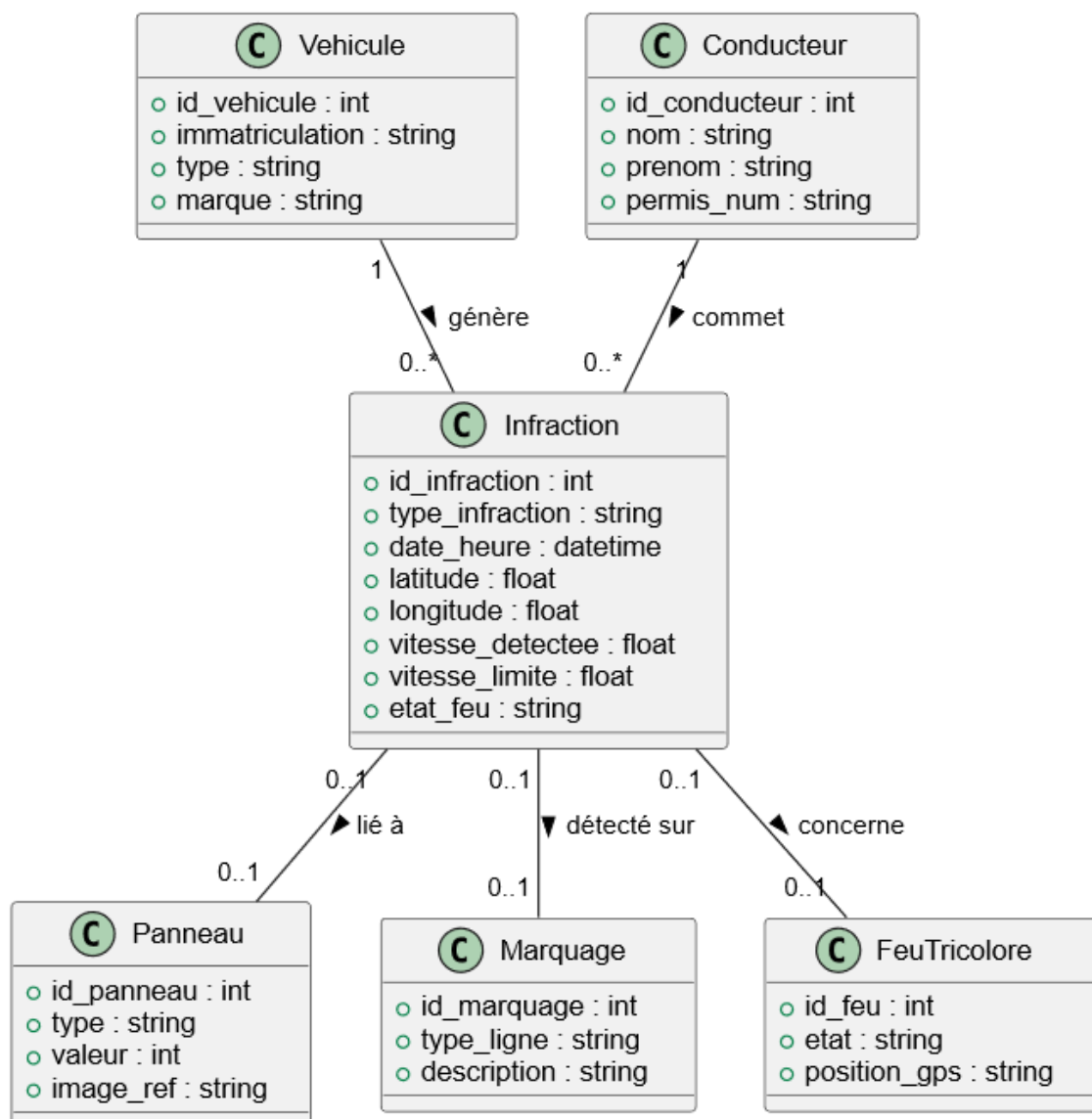


Figure 32 : Diagramme de classes – Modèle de données

1.3. Modélisation comportementale et dynamique des événements routiers

La conception dynamique du système repose sur une modélisation orientée événements, capable de capturer les changements d'état du véhicule et du système de détection en fonction des flux reçus représenté dans le diagramme d'états (Système global de détection), fig 33, qui représente les phases de vie du système depuis l'initialisation, la capture de flux, jusqu'à l'analyse et à la réaction (enregistrement ou alerte). L'approche permet de formaliser les scénarios d'interruption, les états d'erreur, et les reprises automatiques.

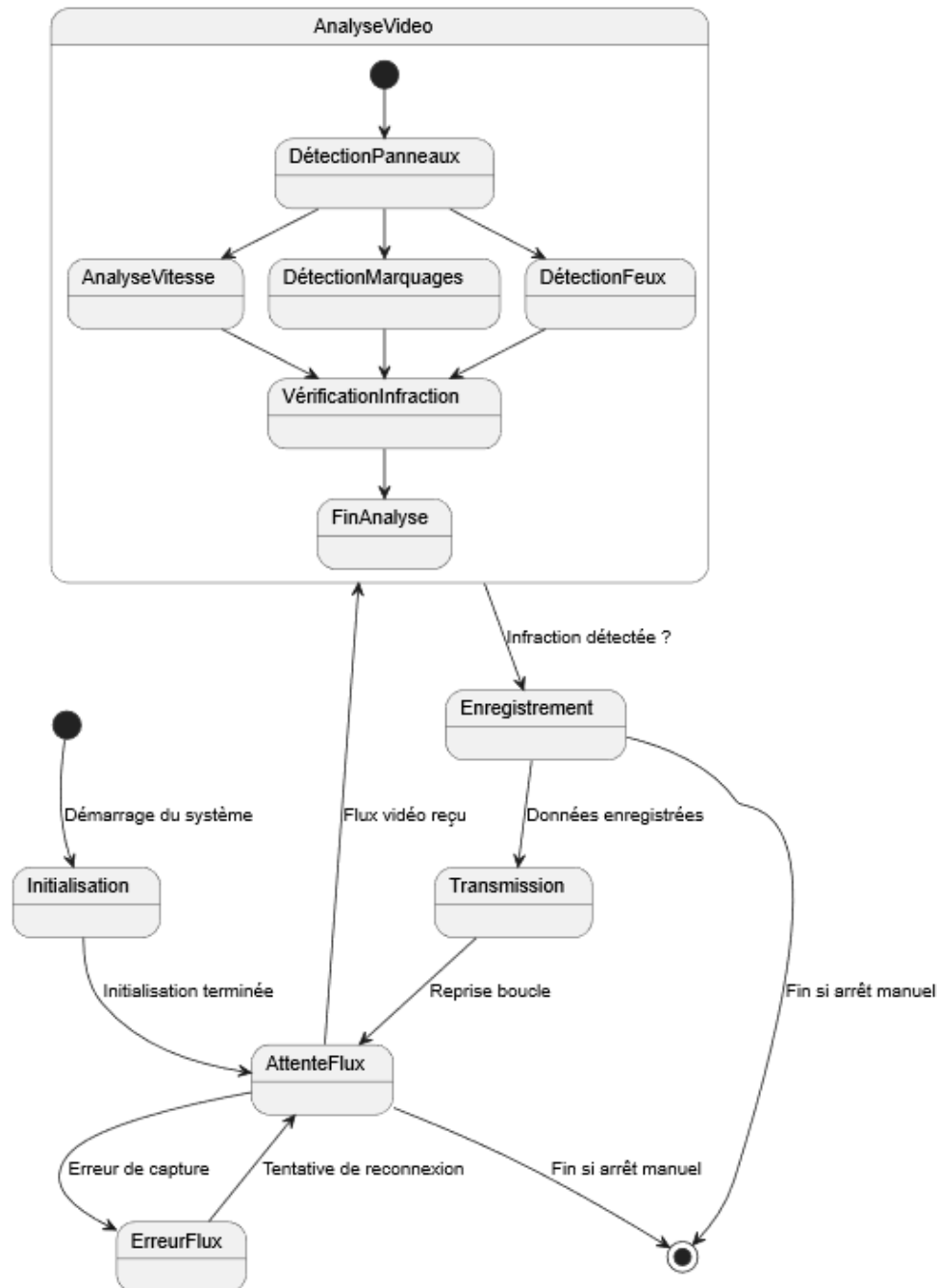


Figure 33 : Diagramme d'états – Système global de détection

• Diagramme de séquence de détection d'infractions, fig 44, montre en détaille l'interaction entre les composants. À chaque nouvelle image :

1. Le module caméra envoie un flux vers les unités IA.
2. Les panneaux, lignes et feux sont identifiés.
3. Le système croise ces informations avec la vitesse GPS.
4. L'infraction est enregistrée si une règle est violée.
5. Les résultats sont immédiatement transférés vers le dashboard.

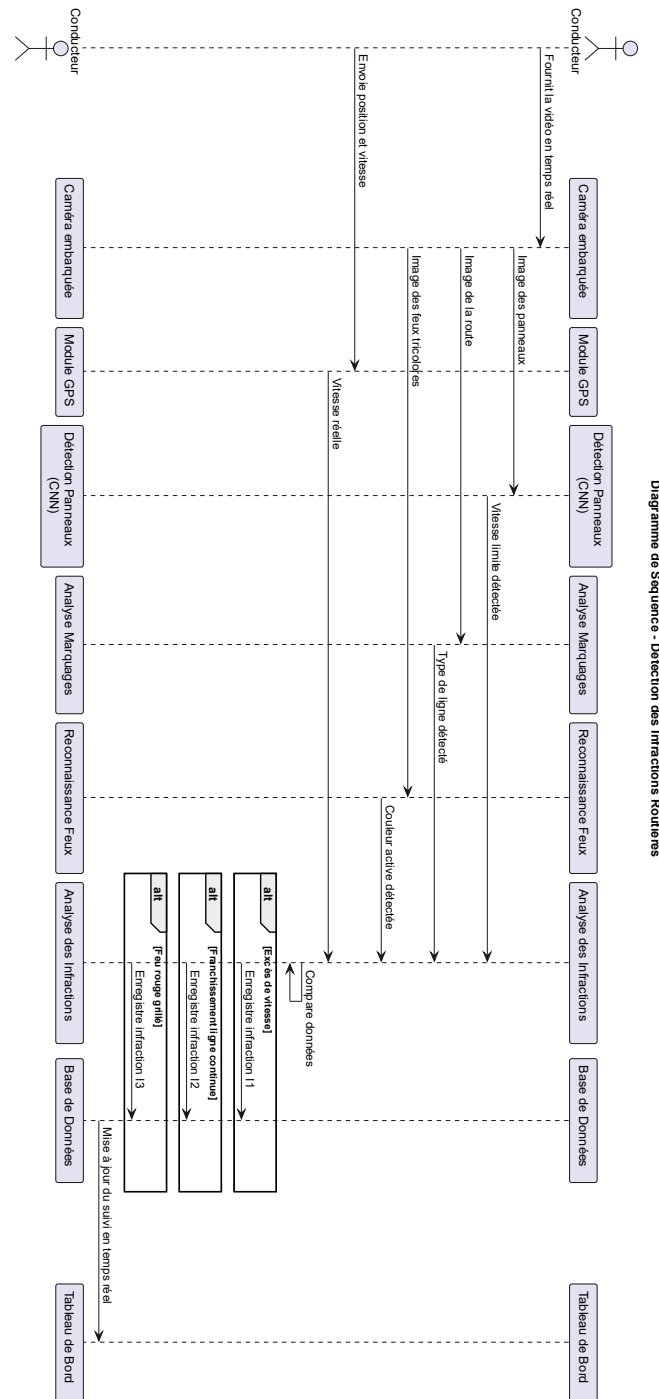


Figure 34 : Diagramme de séquence – Détection d'infractions

- Diagramme d'activité (Processus de détection), fig 35, synthétise les opérations élémentaires et les décisions métier (ex : "vitesse réelle > limite ?") avec des blocs conditionnels successifs, ce qui permet de simuler ou valider la logique métier avant implémentation.

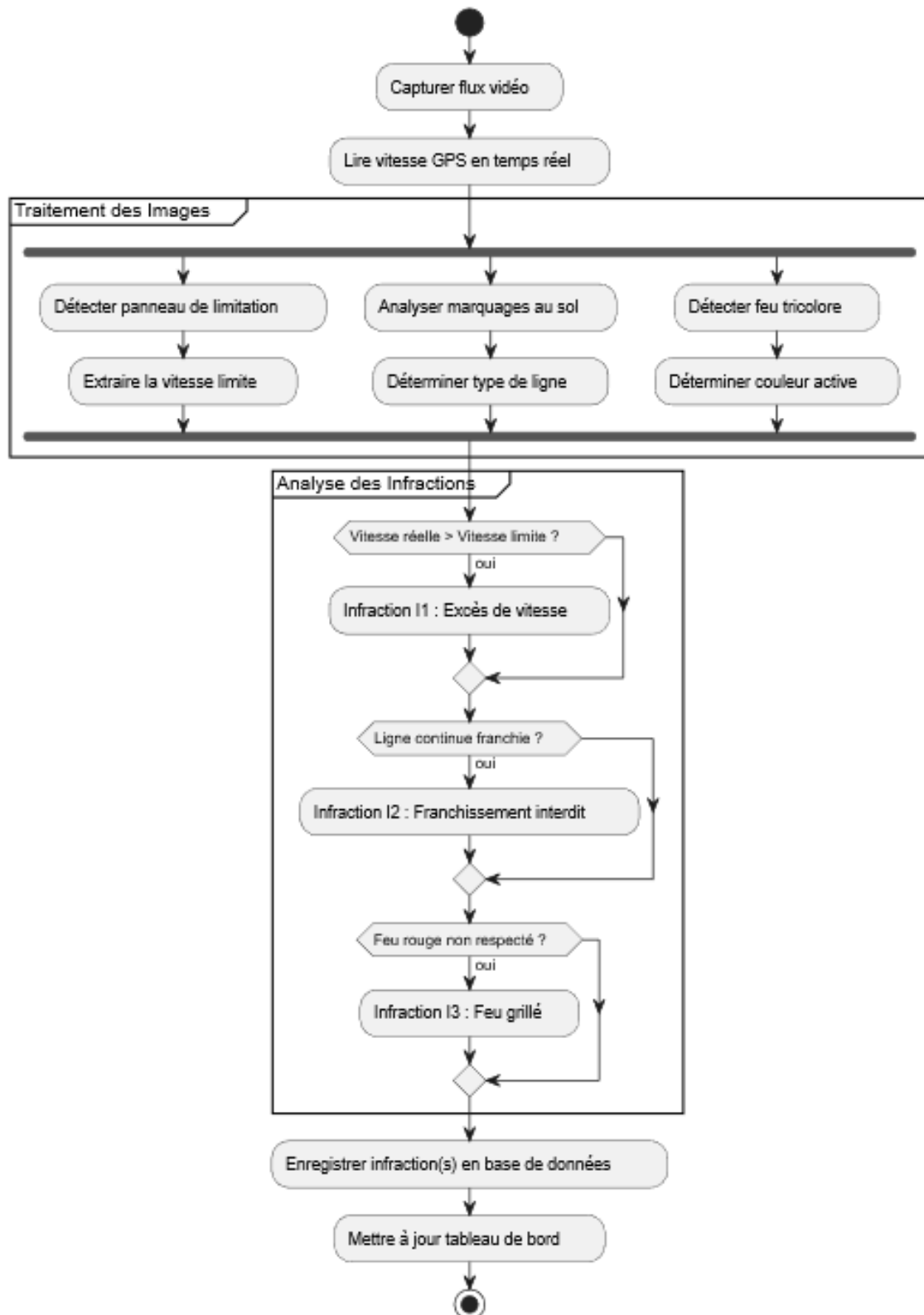


Figure 35 : Diagramme d'activité – Processus de détection

1.4. Système global de détection IA

Le système, fig 36, embarqué est conçu pour fusionner les données issues de la caméra, du GPS et des accéléromètres afin de détecter des infractions complexes (vitesse, franchissement de ligne, signalisation).

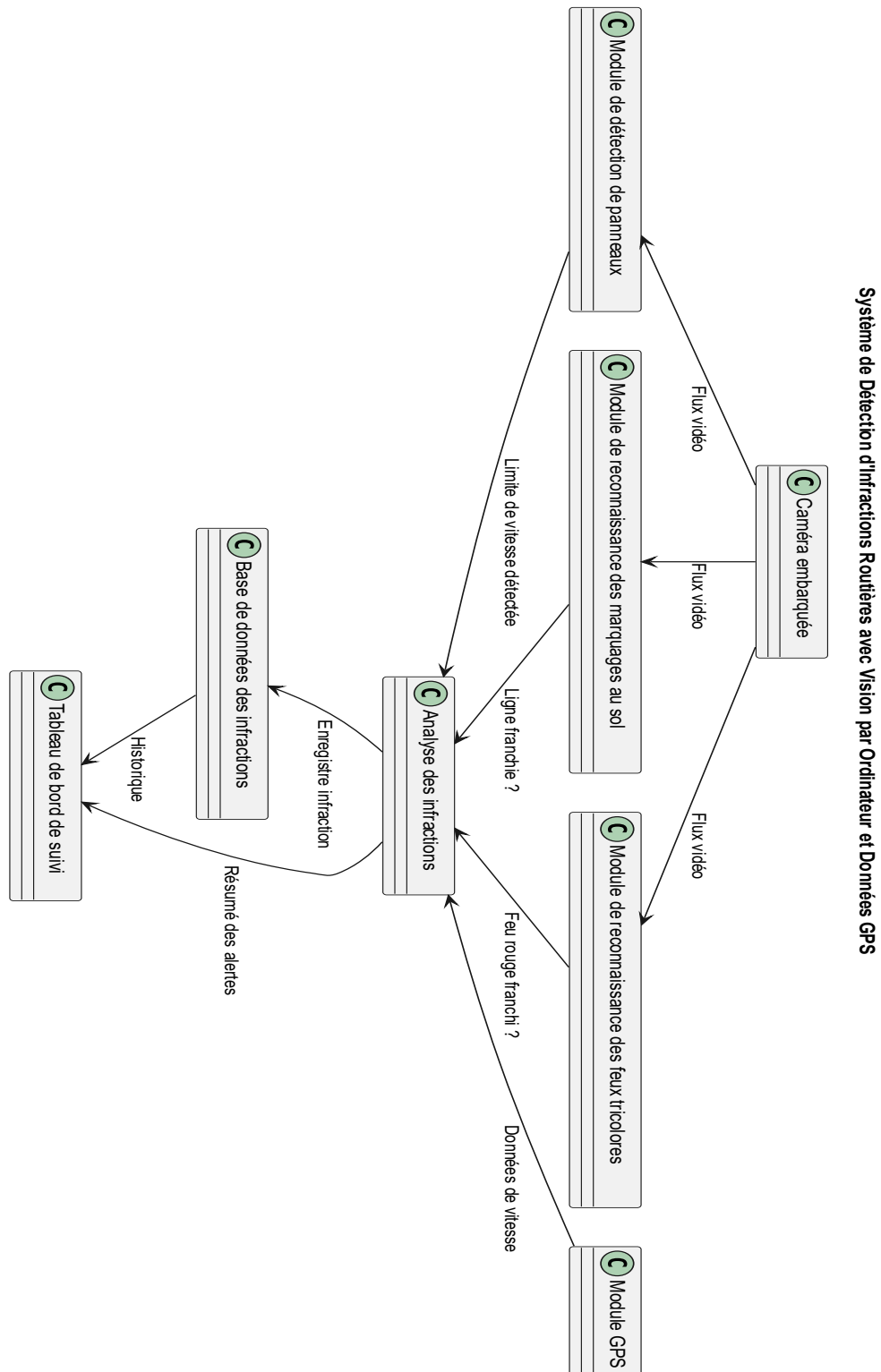


Figure 36 : Diagramme global – Détection via vision par ordinateur et données GPS

Diagramme global – Détection via vision par ordinateur et données GPS : Cette figure présente le flux général d'un traitement embarqué : acquisition → prétraitement → analyse IA → génération d'événement.

1.5. Interfaces (Prototype de NWLT)

La conception des interfaces de la plateforme NW Logistics Tracker repose sur une démarche centrée utilisateur, appliquée avec rigueur sur l'outil Figma. L'objectif fondamental est de proposer une expérience visuelle et fonctionnelle qui réponde aux besoins opérationnels des deux acteurs principaux du système.

1.5.1. Le dashboard gestionnaire.

L'interface web est le centre névralgique du système de supervision. Elle permet au gestionnaire de suivre en temps réel l'ensemble des opérations logistiques, de piloter la flotte, d'affecter les ressources, et d'analyser les performances environnementales et économiques. Conçue entièrement sur Figma avec une navigation verticale latérale fig37.

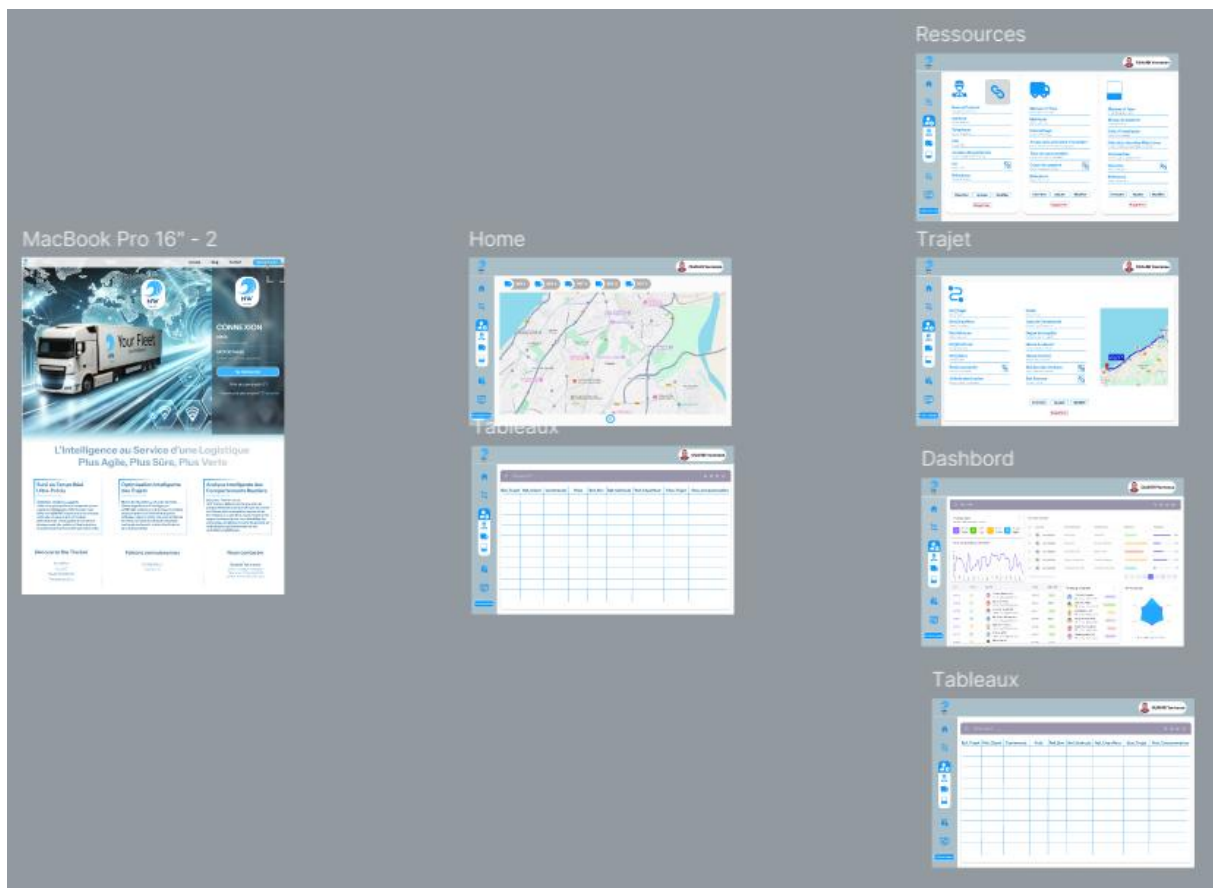


Figure 37 : Interface globale Figma

L'interface se structure en plusieurs vues fonctionnelles illustrées ci-dessous :

- [Page d'accueil & Connexion](#)

Fig 38 représente la page d'accueil propose une mise en contexte visuelle forte, associant un fond animé de type “smart logistics” à un camion personnalisé aux couleurs de la marque NW Tracker. Le module de connexion, intégré à droite, permet une saisie fluide des identifiants, et propose des liens de récupération de mot de passe et d'inscription.



Figure 38 : Page d'accueil & Connexion

- Carte interactive de la flotte

Fig 39, cette section affiche une carte dynamique localisant les véhicules en temps réel, avec un bouton pour chaque camion référencé (REF1 à REF5). L'utilisateur peut cliquer sur un camion pour afficher son parcours, son état et ses données en direct. Cette carte facilite la visualisation géospatiale des activités logistiques.

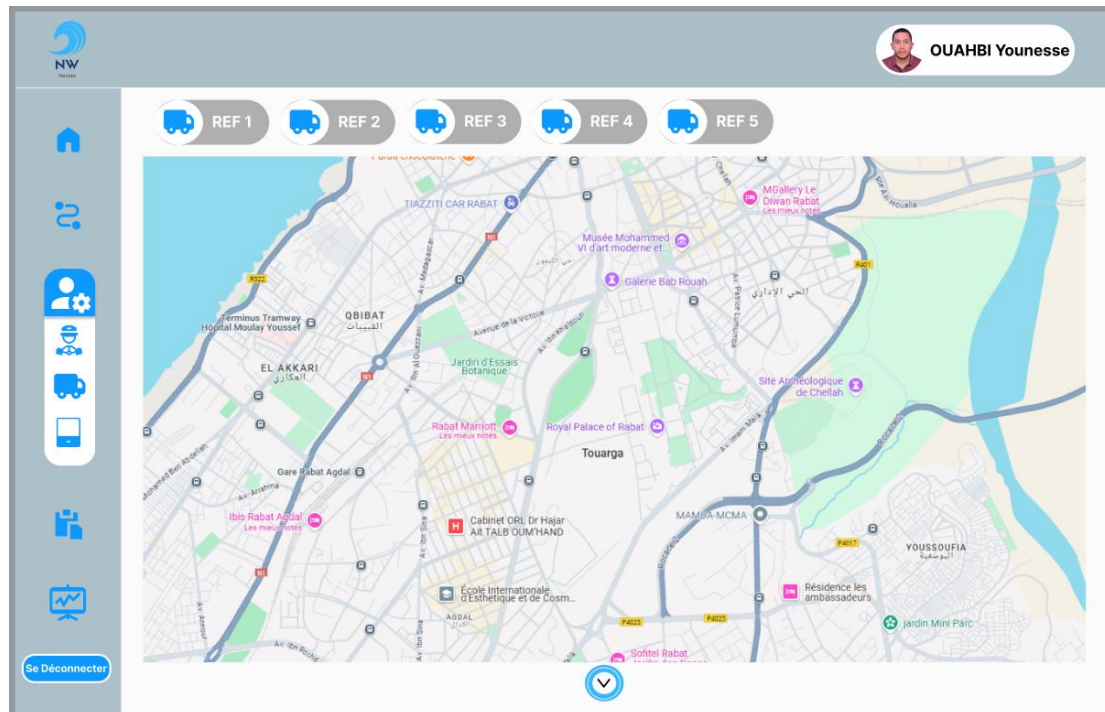


Figure 39 : Carte interactive de la flotte

- Formulaire d'affectation de missions

Cette interface, fig 40 regroupe un formulaire intelligent à gauche et une carte de calcul de l'itinéraire à droite. L'utilisateur peut remplir toutes les métadonnées liées à une mission : chauffeur, camion, client, produit, fragilité, horaires, ainsi que les documents associés (facture, bon de livraison). Le parcours optimal est automatiquement affiché avec durée estimée. Ce module vise à minimiser les erreurs d'affectation et à optimiser les temps de transport.

Figure 40 : Formulaire d'affectation de missions

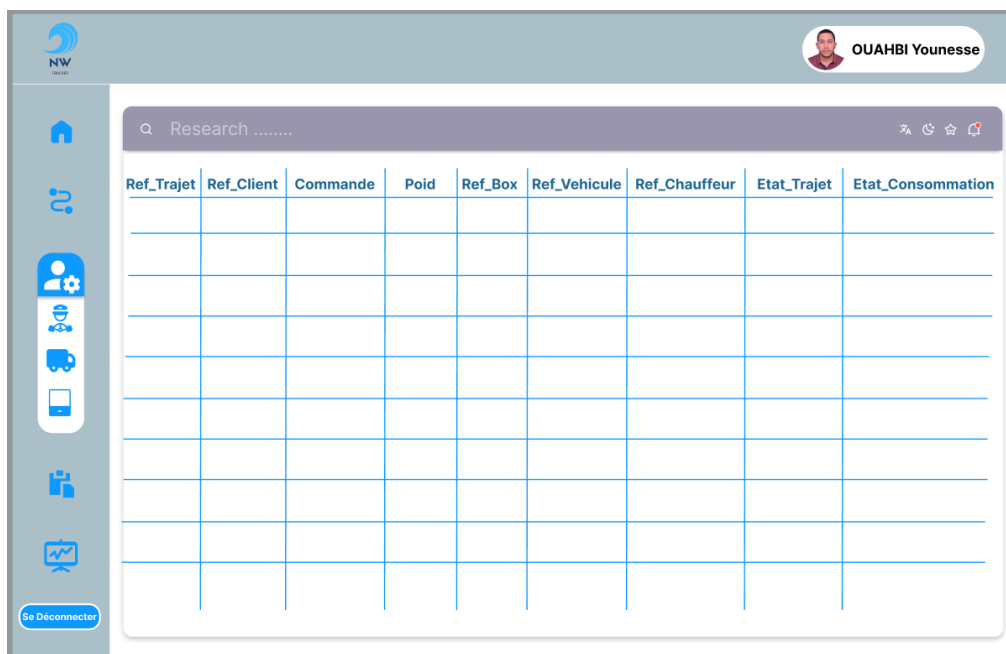
- Fiches de gestion des ressources humaines et matérielles

L'usage présentée en figure 41 affiche trois panneaux dédiés aux conducteurs, aux véhicules et aux boîtiers IA embarqués. Elle permet la gestion des identités, documents, données techniques et états des équipements. Chaque fiche peut être ajoutée, modifiée ou supprimée via des boutons interactifs. L'ensemble assure une traçabilité complète des ressources logistiques et technologiques.

Figure 41 : Fiches de gestion des ressources humaines et matérielles

- **Tableau des missions logistiques**

La Fig 42 représente un affichage tabulaire structuré des missions actives. Chaque ligne représente une affectation incluant les références du trajet, du conducteur, du véhicule et des indicateurs de consommation. Le champ de recherche intelligent situé en haut permet de filtrer instantanément les données. Ce tableau est destiné à l'analyse rapide des opérations logistiques.



Ref_Trajet	Ref_Client	Commande	Poids	Ref_Box	Ref_Vehicule	Ref_Chauffeur	Etat_Trajet	Etat_Consummation

Figure 42 : Tableau des missions logistiques

- **Dashboard analytique intégré**

Cette interface illustrée dans la figure 43, intègre plusieurs widgets analytiques permettant une visualisation centralisée et intuitive des données logistiques. Elle comprend tout d'abord des indicateurs clés de performance (KPI) synthétiques tels que le nombre de clients, les itinéraires actifs, le niveau de satisfaction et les revenus générés. Un graphique mensuel dédié à la consommation permet de suivre les variations d'usage ou de dépenses sur une base temporelle. La gestion du parc de véhicules est facilitée par un tableau récapitulatif affichant l'état de chaque véhicule, incluant les alertes techniques, la température interne et les éventuelles anomalies détectées. L'interface intègre également un planning des réunions, assurant la coordination entre les acteurs de la chaîne logistique. Enfin, un graphique radar synthétise la performance globale à travers plusieurs axes stratégiques, offrant ainsi une évaluation visuelle et comparative des résultats opérationnels.

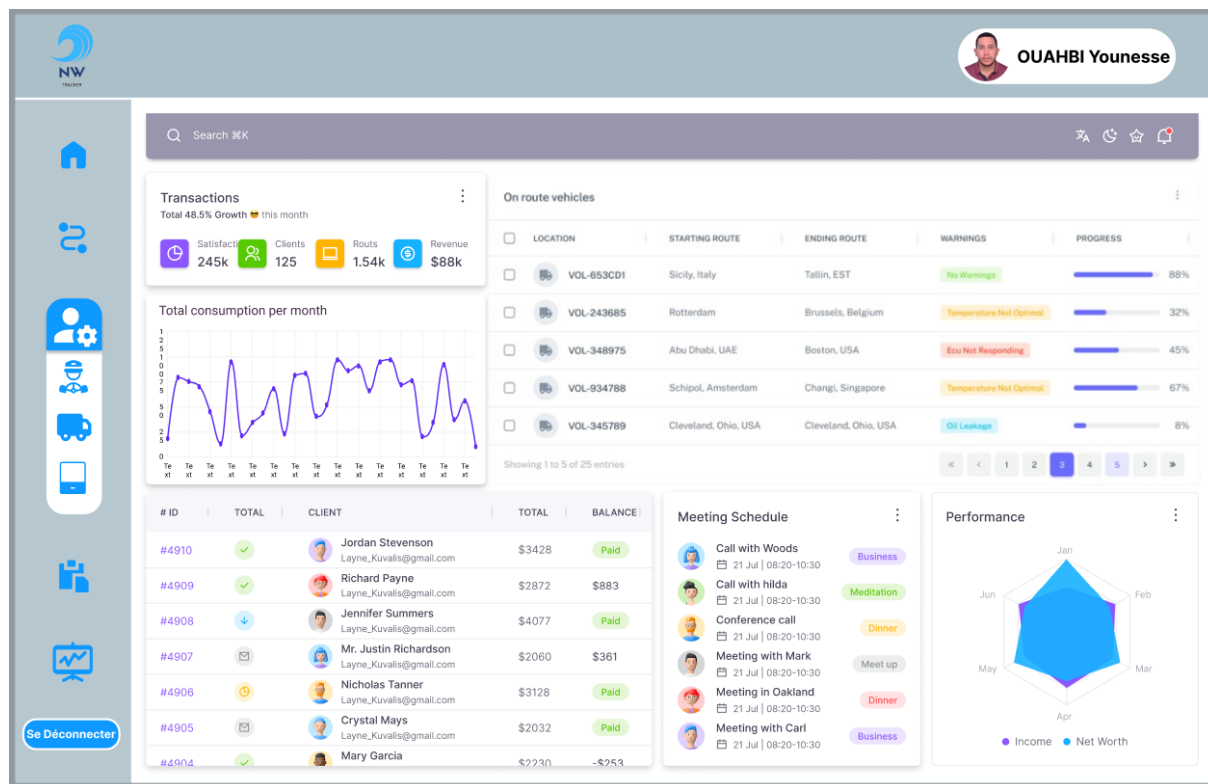


Figure 43 : Dashboard analytique intégré

Cette interface représente une interface décisionnelle visuelle, permettant au gestionnaire de prendre des décisions rapides et documentées, tout en évaluant l'efficacité globale du système.

1.5.2. Le tableau de bord conducteur

Pensée pour un usage en situation de mobilité, cette interface simplifiée offre une expérience rapide, réactive et focalisée sur la mission en cours.

- Page de connexion chauffeur :

Similaire à la version gestionnaire, avec une image de marque cohérent, mais accès restreint au rôle conducteur. (Fig44)



Figure 44 : Page de connexion chauffeur

- Accueil conducteur :

Notifications de nouveaux trajets, accès rapide à trois blocs : fiche chauffeur, trajet en cours, indicateurs de performance (KPI). (Fig 45)

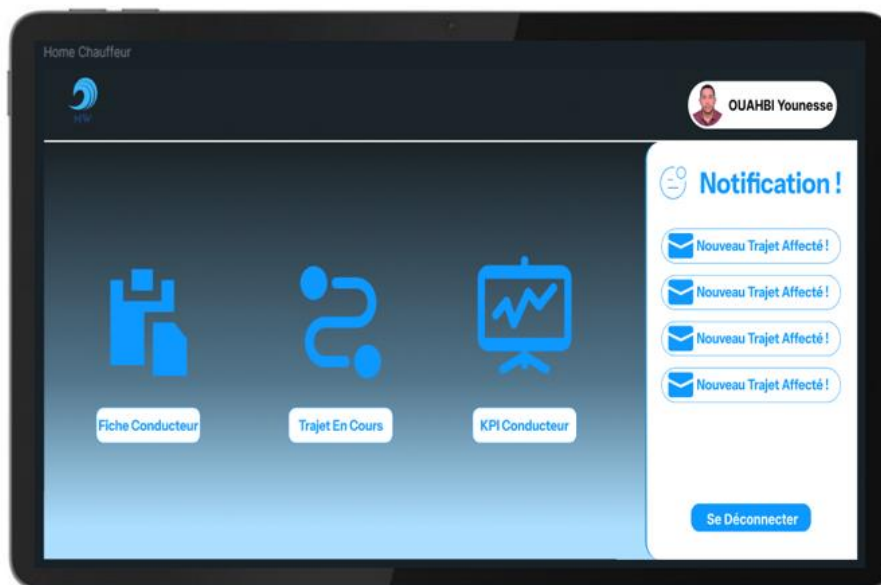


Figure 45 : Accueil conducteur

- Fiche du conducteur :

Permet au chauffeur de consulter ses informations personnelles et administratives (CIN, permis, adresse, photo). (Fig 46)

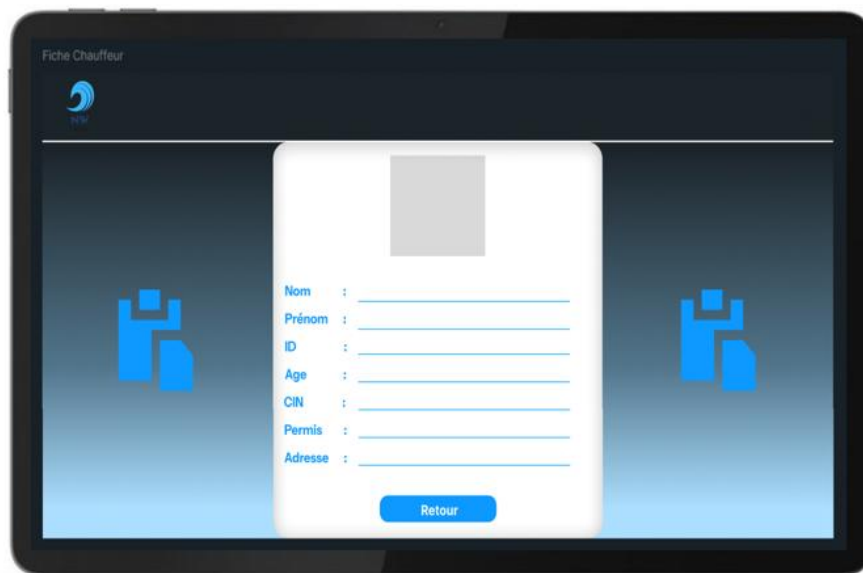


Figure 46 : Fiche du conducteur

- **Trajet en cours :**

Résumé du trajet affecté, informations client, carte GPS, et accès rapide aux documents de mission (bon de livraison, facture). (Fig 47)

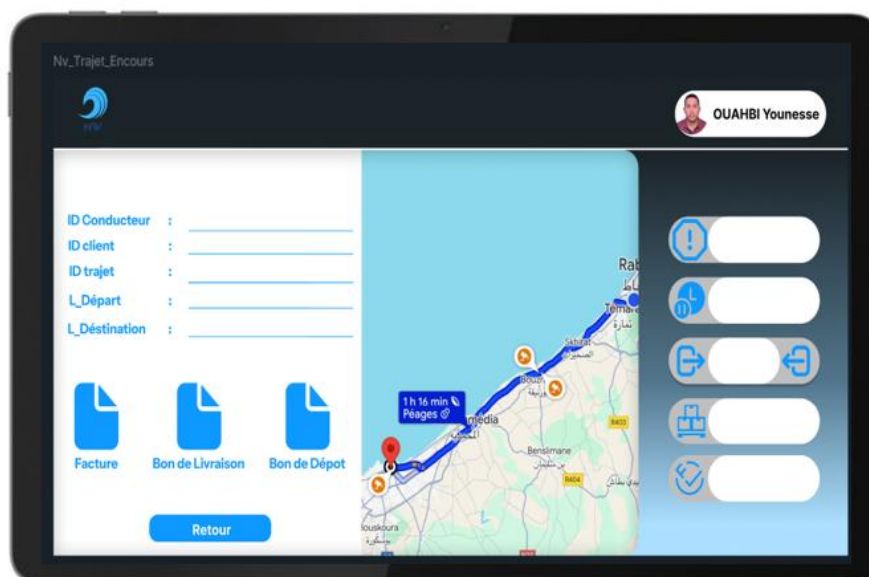


Figure 47 : Trajet en cours

- **Dashboard embarqué :**

Présente les KPI individuels : nombre de livraisons, taux de satisfaction client, nombre d'infractions, kilomètres parcourus par semaine. (Fig 48)

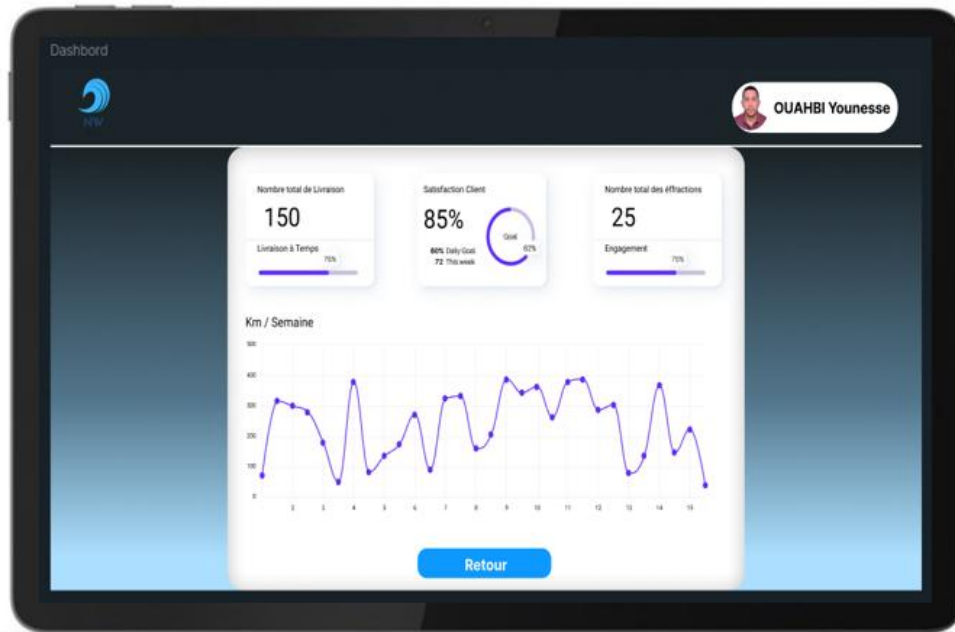


Figure 48 : Dashboard embarqué

Cette interface optimise la réactivité et la transparence, tout en facilitant la responsabilisation des conducteurs dans la logique d'une logistique écoresponsable et intelligente.

L'ergonomie de la plateforme a été pensée pour répondre aux besoins des gestionnaires logistiques, conducteurs, et analystes de performance environnementale, tout en assurant la scalabilité vers d'autres cas d'usage (maintenance prédictive, affectation automatisée de missions).

2. Développement des algorithmes de détection d'infractions routières

L'un des axes fondamentaux de cette recherche est le développement de modèles capables d'analyser, en temps réel, le comportement des conducteurs et de détecter automatiquement les infractions au Code de la route. Deux familles de techniques ont été mobilisées :

- Réseaux de neurones convolutifs (CNN) : utilisés pour la reconnaissance visuelle des panneaux de signalisation vitesse, interdiction de dépasser, des lignes de marquage au sol (lignes continues, passages piétons), et des feux tricolores.
- Analyse GPS : pour croiser les informations de vitesse réelle et limitations légales.

Ces algorithmes permettent une analyse continue du flux vidéo, associée à un moteur de décision embarqué générant des alertes visuelles et sonores en cas de comportement dangereux ou d'écart réglementaire.

2.1. Structuration thématique des jeux d'apprentissage pour la détection d'infractions

Dans le cadre du développement des algorithmes de détection d'infractions par vision par ordinateur, une structuration thématique rigoureuse des images d'entraînement a été opérée. Cette organisation a pour objectif d'optimiser la spécialisation des modèles CNN selon le type d'éléments critiques à détecter dans l'environnement routier. Les données ont ainsi été réparties en trois classes fonctionnelles principales, correspondant aux dimensions visuelles fondamentales du Code de la route.

2.1.1. Classe 1 : Panneaux de signalisation

Cette première catégorie regroupe les éléments verticaux de régulation, particulièrement les signaux d'interdiction et de limitation, essentiels à la détection des excès de vitesse ou des comportements interdits (ex : dépassement). Cette classe se compose de :

- **Volume total** : 7 840 images annotées
- **Contenu** :
 - Panneaux de limitation de vitesse (30, 30, 50, 80, 100 km/h...)
 - Panneaux d'interdiction de dépasser
 - Panneaux de fin d'interdiction et de limitation
- **Contexte** : conditions variées (jour/nuit, pluie, campagne, ville)

Cette classe est cruciale pour le croisement avec la vitesse GPS, permettant de détecter des excès en temps réel.

2.1.2. Classe 2 : Marquages au sol

La deuxième classe vise les éléments horizontaux visibles sur la chaussée, tels que les lignes continues, mixtes ou discontinues en cas normale et en cas de travaux, qui conditionnent la légalité de manœuvres comme le dépassement ou le changement de voie. Cette classe se compose de :

- **Volume total** : 5 620 images annotées
- **Contenu** :
 - Bandes continues (franchissement interdit)
 - Bandes discontinues (dépassement autorisé)
 - Zones zébrées, lignes mixtes, et transitions de voie

2.1.3. Classe 3 : Feux tricolores

Enfin, la troisième classe couvre les images de feux de signalisation dans divers contextes urbains ou périurbains. L'analyse de ces signaux est indispensable pour détecter les infractions liées au non-respect des arrêts imposés. Cette classe se compose de :

- **Volume total** : 3 160 images labellisées
- **Contenu** :
 - Feux rouges, orange, et verts détectés avec états visibles
 - Situations en intersection, carrefour ou passage piéton
 - Feux couplés à panneaux ou marquages

Les feux sont détectés à l'aide de modèles CNN spécialisés en reconnaissance d'objets à faible contraste.

Afin d'assurer la robustesse et la fiabilité des modèles d'apprentissage profond développés dans cette recherche, une stratégie de répartition systématique des données a été appliquée à l'ensemble des classes fonctionnelles du corpus d'images. Conformément aux pratiques reconnues en intelligence artificielle, les jeux de données ont été divisés en trois sous-ensembles principaux : un ensemble d'entraînement (training set) permettant l'apprentissage des réseaux de neurones, un ensemble de validation (validation set) destiné à l'ajustement des hyperparamètres et à la détection du surapprentissage, et un ensemble de test (test set) utilisé pour l'évaluation finale des performances en conditions simulées.

Dans un souci de cohérence méthodologique et de reproductibilité expérimentale, une répartition généralisée des pourcentages a été adoptée, sauf mention contraire justifiée par des contraintes spécifiques liées à la volumétrie ou à la nature des données. Ainsi, sauf exception, les jeux d'images ont été structurés selon la logique suivante : 70% pour l'entraînement, 15% pour la validation, et 15% pour le test, avec un ajustement ponctuel selon la complexité visuelle ou la rareté des classes. Cette structuration homogène garantit un équilibre optimal entre performance algorithmique, rigueur scientifique et la généralisation des résultats.

2.2. Prétraitement et Augmentation des Données

Le traitement préalable des images constitue une phase essentielle dans tout processus d'apprentissage profond, en particulier dans les tâches de détection et de classification basées sur la vision par ordinateur. Ce processus vise à homogénéiser, nettoyer et enrichir les données visuelles afin d'optimiser les performances du modèle et de limiter les biais liés à la variabilité du contexte d'acquisition. Cette phase est structurée en deux grandes étapes : le prétraitement des images et l'augmentation des données. (Fig 49)



Figure 49 : Prétraitement et Augmentation des Données

2.2.1.1 Prétraitement des images (Image Preprocessing)

Le prétraitement d'image prépare les données d'entrée aux contraintes des modèles de réseaux de neurones convolutionnels (CNN) et permet une amélioration significative de la qualité des prédictions. Comme l'illustre la Figure 2, chaque image passe par plusieurs phases séquentielles. (Fig 50)

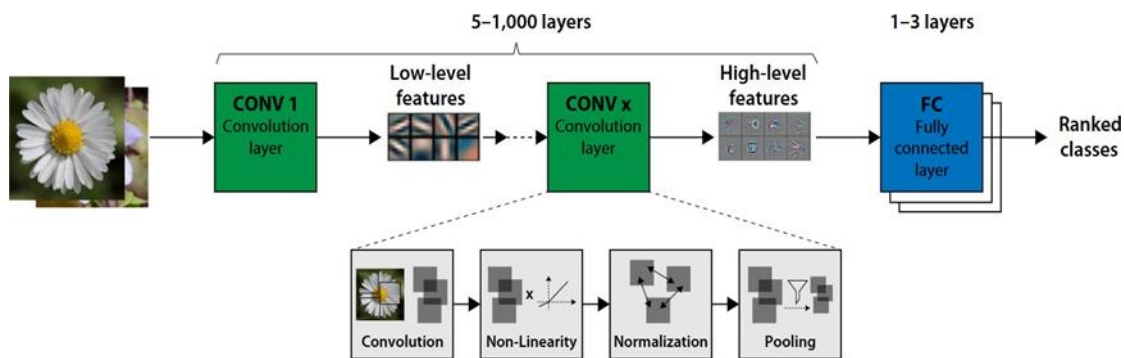


Figure 50 : Exemple Prétraitement des images

2.2.2.Redimensionnement (Resizing)

Toutes les images sont redimensionnées à une taille uniforme (par exemple, 300×300 pixels). Cette étape assure une cohérence dans les dimensions des entrées et réduit la charge computationnelle des couches convolutionnelles.

2.2.3.Normalisation des valeurs de pixels (Normalization)

Les valeurs de pixels sont normalisées entre 0 et 1 par division sur 255, puis centrées selon les statistiques des bases ImageNet (moyenne et écart-type). Ce traitement permet de rendre les données compatibles avec les poids pré-entraînés et d'accélérer la convergence.

2.2.4.Transformations aléatoires contrôlées (Transform)

Diverses transformations aléatoires (rotation, symétrie horizontale, recadrage) sont appliquées pour diversifier les situations représentées. Cela augmente la généralisation du modèle en l'exposant à des variations d'angle, de perspective ou de bruit visuel.

2.2.5. Génération de masques binaires et de bounding boxes

Pour chaque image, un masque binaire localise précisément l'objet d'intérêt (p. ex. panneau routier), à partir duquel sont extraites les boîtes englobantes (bounding boxes) utilisées pour l'apprentissage supervisé.

2.2.6. Encodage des images et masques

Les images et annotations sont converties dans un format exploitable par les modèles profonds, sous forme de tenseurs NumPy ou PyTorch, avec des coordonnées normalisées en fonction de la taille des images redimensionnées.

2.3. Techniques d'augmentation de données

L'augmentation de données est une stratégie essentielle pour enrichir artificiellement le jeu d'entraînement, en générant de nouvelles instances à partir des images existantes. Cette démarche vise à accroître la diversité des situations présentées au modèle, tout en réduisant le risque de surapprentissage (overfitting) et en améliorant la généralisation face à des contextes variés de conduite (luminosité, météo, angles de vue, etc.).

Parmi les techniques employées, le renversement horizontal aléatoire consiste à inverser une image selon l'axe vertical avec une probabilité de 50 %, ce qui simule un changement de direction ou de perspective. La rotation aléatoire permet d'appliquer une inclinaison de $\pm 10^\circ$, simulant une variation de l'orientation de la caméra ou de l'angle de prise de vue.

- Le redimensionnement (scaling) modifie la taille des objets dans l'image avec une amplitude aléatoire pouvant aller jusqu'à ± 50 %, ce qui est utile pour détecter des objets à différentes distances. La translation, quant à elle, introduit des décalages horizontaux ou verticaux (jusqu'à 20 %) pour simuler des légers mouvements de caméra ou des positions changeantes des objets.

- Des ajustements dans l'espace de couleur HSV (Hue-Saturation-Value) sont également appliqués pour reproduire des conditions lumineuses variables. Ces transformations incluent des modifications de teinte (± 0.015), de saturation (± 0.7) et de luminosité (± 0.4).

- La technique de mosaïque (Mosaic Augmentation) est utilisée durant 90 % des époques d'entraînement. Elle consiste à combiner plusieurs images en une seule scène, exposant le modèle à des configurations complexes et à une grande variété de contextes simultanés.

- L'effacement aléatoire (Random Erasing) permet de masquer aléatoirement une région de l'image (avec une probabilité de 40 %), forçant ainsi le modèle à apprendre à détecter les objets même lorsqu'une partie est manquante ou obstruée.

- Le copier-coller (Copy-Paste Augmentation) introduit des objets copiés depuis d'autres images dans la scène cible, avec une fréquence de 10 %, afin de générer des cas de surcharge visuelle ou de présence multiple d'éléments critiques. Enfin, la méthode Mixup superpose deux images en les

mélangeant à 10 %, une technique qui aide à stabiliser les frontières de décision du modèle et à réduire la sensibilité à des cas particuliers.

2.4. Architecture du modèle Road_Net

Le modèle Road_Net repose sur l'utilisation de réseaux de neurones convolutifs (CNN) comme approche centrale pour la détection automatique et la classification des objets critiques de la signalisation routière. Il est conçu pour identifier trois classes fonctionnelles majeures : les panneaux de signalisation (tels que les limitations de vitesse et les interdictions de dépassement), les marquages au sol (lignes continues, discontinues ou zones de changement de voie) et les feux tricolores (rouge, orange, vert), en contexte réel. Cette segmentation thématique permet au modèle de répondre aux exigences spécifiques de la détection embarquée dans les systèmes intelligents de suivi de la conduite. (Fig 51)

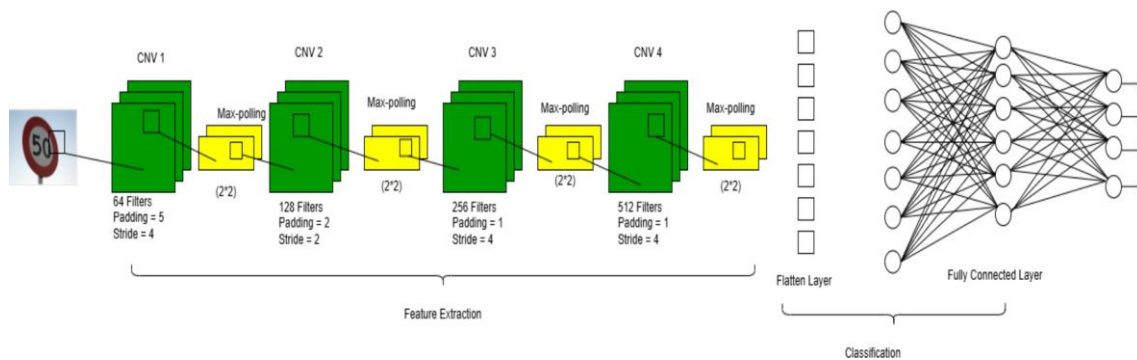


Figure 51 : Architecture du model Road_Net

L'architecture de Road_Net intègre une série de couches convolutives, de pooling, de normalisation et de classification dense. Plus précisément, elle est composée de trois couches convolutives successives, chacune appliquant des filtres linéaires de tailles spécifiques, permettant l'extraction progressive des caractéristiques visuelles à bas et haut niveau, telles que les bords, les formes géométriques ou les contours significatifs. Ces représentations sont ensuite traitées par trois couches de max-pooling, dont le rôle est de réduire la dimensionnalité spatiale des cartes de caractéristiques tout en conservant l'information discriminante. À chaque étape, les couches de normalisation par lot (batch normalization) viennent stabiliser l'apprentissage, accélérer la convergence et limiter les variations internes du flux de données entre les couches.

Afin de garantir la robustesse du modèle face au surapprentissage, deux couches de régularisation de type dropout ont été introduites, avec des taux respectifs de 0.1 et 0.2. Celles-ci désactivent aléatoirement des neurones durant l'entraînement, empêchant ainsi le modèle de mémoriser les données plutôt que de généraliser les représentations. Les informations extraites à travers les couches convolutives et de pooling sont ensuite transmises à une couche entièrement connectée (FCL) composée de 256 neurones, laquelle joue un rôle d'intégration globale des caractéristiques.

La fonction d'activation ReLU est utilisée dans toutes les couches convolutives. Elle introduit la non-linéarité nécessaire à la capture de structures complexes dans les données visuelles. En fin de réseau, une fonction d'activation Softmax est appliquée à la sortie de la dernière couche dense, permettant d'estimer la probabilité que l'entrée appartienne à l'une des trois classes définies. Cette stratégie de classification probabiliste assure une prise de décision fiable et interprétable.

L'ensemble du modèle est optimisé à l'aide de la fonction de perte par entropie croisée (cross-entropy loss), qui ajuste les paramètres du réseau pour maximiser sa capacité à prédire correctement les classes. Grâce à cette architecture modulaire et compacte, Road_Net atteint un bon équilibre entre précision et simplicité, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications embarquées dans des environnements à ressources limitées. La figure 51 illustre l'architecture complète, tandis que les paramètres détaillés des couches sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres du model

Layer	Parameters
CONV-1 MAX-POOLING BATCH-NORMALIZATION	64 filters, 11×11 , padding=5, stride=4 2×2
CONV-2 MAX-POOLING BATCH-NORMALIZATION	128 filters, 5×5 , padding=2, stride=2 2×2
CONV-3 MAX-POOLING BATCH-NORMALIZATION	256 filters, 3×3 , padding=1, stride=4 2×2
CONV-3 MAX-POOLING BATCH-NORMALIZATION	512 filters, 3×3 , padding=1, stride=4 2×2
FCL DROPOUT	256 0.1

2.5. Évaluation des métriques du modèle Road Net

Une fois les modèles développés implémentés et entraînés, l'étape suivante consiste à appliquer des métriques d'évaluation afin d'analyser leurs performances. Dans ce travail, plusieurs méthodes d'évaluation sont utilisées. En premier lieu, des métriques de comparaison telles que la précision (accuracy), le rappel (recall), la précision (au sens strict : precision), et le score F1 sont mobilisées. En second lieu, une matrice de confusion normalisée permet d'avoir une vue d'ensemble détaillée des

performances de classification du modèle. En troisième lieu, la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) et la surface sous cette courbe (AUC — Area Under Curve) sont examinées pour évaluer la performance du modèle dans sa tâche de classification.

Les métriques utilisées sont les suivantes :

- **Précision (Accuracy) :**

$$\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

- **Précision au sens strict (Precision) :**

$$\frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

- **Rappel (Recall) :**

$$\frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

- **Score F1 (F1-score) :**

$$\frac{2*Precision*Recall}{Precision+Recall} \quad (4)$$

Où TP, TN, FP, et FN désignent respectivement :

- **TP (True Positive) :** Vrai positif
- **TN (True Negative) :** Vrai négatif
- **FP (False Positive) :** Faux positif
- **FN (False Negative) :** Faux négatif

Ces mesures sont essentielles dans le processus de classification pour déterminer la présence ou l'absence d'objets (comme dans le cas des maladies sur des images médicales, ou ici dans notre contexte, des infractions ou des objets détectés). Elles permettent notamment de calculer des indicateurs tels que la sensibilité, la spécificité, l'accuracy et le score F1, fournissant ainsi une vision approfondie de la performance globale du modèle.

2.6. Résultats expérimentaux et analyse des performances du modèle Road Net

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux de notre modèle CNN bayésien et analysons son efficacité. L'objectif de notre analyse est d'évaluer la capacité de classification du modèle, de quantifier l'incertitude, d'identifier les axes d'amélioration possibles, et de proposer des pistes pour des recherches futures. À travers une série d'expériences rigoureuses, nous évaluons les performances

globales du modèle et proposons une analyse détaillée des résultats obtenus. Ces résultats sont également confrontés aux travaux existants afin d'en tirer des implications pour les recherches à venir.

La Figure 52 illustre les courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) obtenues pour les trois classes. La courbe ROC de la classe 0 montre un taux de vrais positifs (TPR) élevé, associé à un faible taux de faux positifs (FPR), avec une aire sous la courbe (AUC) de 0,92, ce qui traduit une excellente capacité de distinction pour cette classe.

La classe 1 atteint une classification parfaite avec une AUC de 1,00, démontrant que le modèle identifie cette classe de manière impeccable, avec un taux de vrais positifs de 100 % et un nombre de faux positifs quasiment nul.

Enfin, la courbe ROC de la classe 2 montre une performance remarquable avec une AUC de 0,97, traduisant un excellent équilibre entre un taux de vrais positifs élevé et un taux de faux positifs très bas.

Dans l'ensemble, le modèle démontre des performances solides sur la majorité des classes, avec des résultats particulièrement impressionnants pour la classe 1. Cependant, une amélioration est encore envisageable pour la classe 0 et 2.

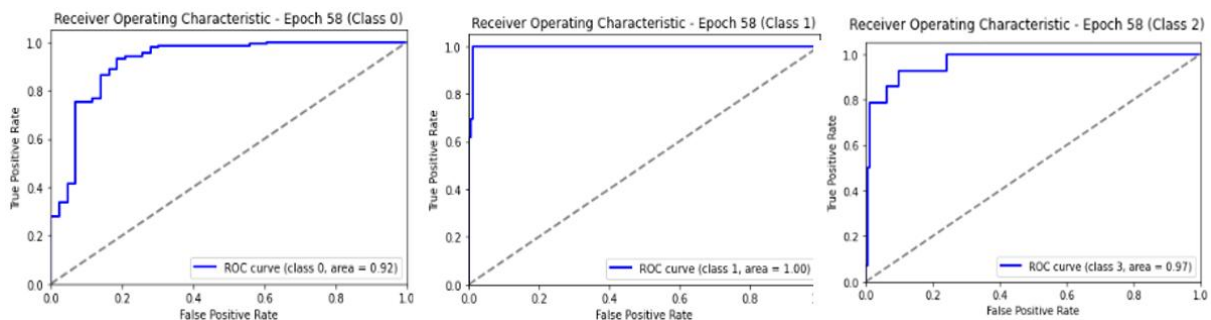


Figure 52 : ROC des classes 0, 1 et 2

Dans la Figure 53, deux graphiques illustrent l'évolution de la perte (loss) et de la précision (accuracy) au cours de 100 itérations (epochs) d'apprentissage et de validation. Le premier graphique représente la courbe de perte : la courbe d'apprentissage (en bleu) présente des fluctuations marquées avec des pics et des creux, ce qui pourrait indiquer une instabilité dans le processus d'entraînement. La courbe de validation (en orange) suit une tendance similaire mais reste globalement plus stable, bien qu'elle demeure supérieure à la courbe de perte d'entraînement. Cela suggère que le modèle rencontre des difficultés à généraliser aux données de validation, un signe probable de surapprentissage (overfitting).

Le deuxième graphique présente l'évolution de la précision : la précision sur les données d'entraînement progresse globalement, malgré certaines fluctuations notables, pour atteindre environ 0,91 à 0,92 en fin d'entraînement. La précision sur les données de validation suit une tendance similaire mais demeure plus variable, oscillant entre 0,89 et 0,91. L'écart entre les précisions d'entraînement et de validation, ainsi que la variabilité des courbes, suggère que le modèle pourrait bénéficier de techniques supplémentaires pour améliorer sa généralisation, telles que la régularisation ou l'ajustement du taux d'apprentissage. Ces stratégies seront approfondies et optimisées dans les travaux futurs afin d'améliorer les performances du modèle et de limiter les effets du surapprentissage.

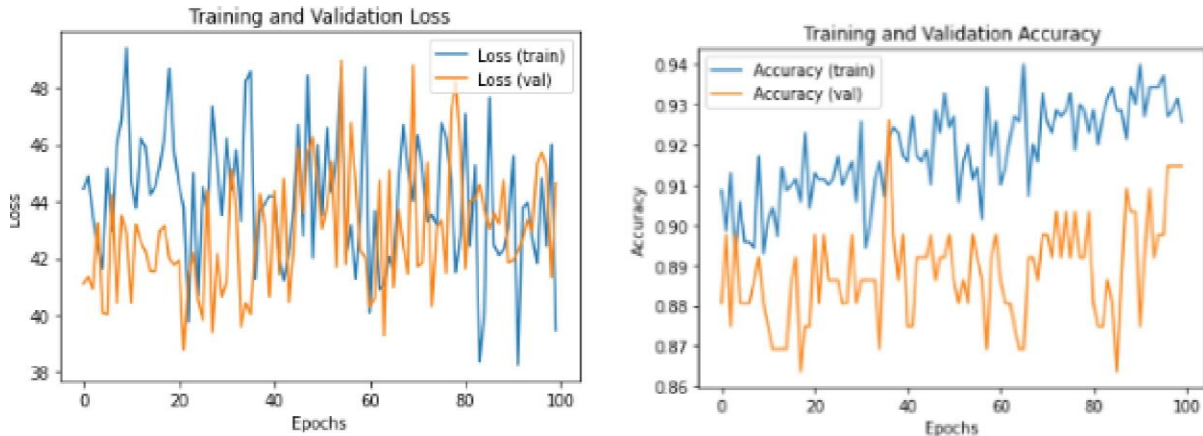


Figure 53 : Perte et précision dans la phase Test et validation

L'analyse conjointe des courbes de perte et de précision issues de l'entraînement du modèle Road_Net révèle des signes qui manifestent le surapprentissage (overfitting). En effet, bien que la précision sur les données d'apprentissage atteigne des valeurs élevées ($\approx 0,91$ – $0,92$), la précision sur le jeu de validation demeure légèrement inférieure ($\approx 0,89$ – $0,91$) avec une variabilité marquée, traduisant une capacité de généralisation plus limitée. De plus, la courbe de perte d'entraînement présente des fluctuations irrégulières (pics et creux), témoignant d'une instabilité dans le processus d'apprentissage, tandis que la perte de validation reste supérieure tout au long des itérations. Cette dissociation entre les performances sur l'ensemble d'entraînement et celles sur l'ensemble de validation indique que le modèle s'est trop adapté aux caractéristiques spécifiques des données d'apprentissage, au détriment de sa capacité à traiter de nouvelles données. Ce phénomène de surapprentissage nuit directement à la robustesse du modèle dans des conditions réelles d'application.

Afin de remédier aux effets du surapprentissage, plusieurs techniques bien établies dans la littérature ont été envisagées. Celles-ci incluent la régularisation L1/L2, le réglage du taux d'apprentissage, l'utilisation du mécanisme early stopping, la réduction de la complexité du modèle, ainsi que l'application de méthodes d'augmentation des données et de Dropout régulier. Dans le cadre de notre travail, deux correctifs spécifiques ont été retenus. D'une part, une stratégie avancée d'augmentation des données a été mise en œuvre, consistant à générer des variations réalistes des images d'entraînement afin d'enrichir la diversité des scénarios d'apprentissage et d'améliorer la capacité du modèle à généraliser. D'autre part, le paramétrage du Dropout, déjà introduit de manière partielle dans le modèle

initial avec un taux **0.1** a été renforcé. Des taux de Dropout supplémentaires ont été définis dans les couches critiques du réseau afin de réduire la co-adaptation des neurones et d'encourager une meilleure robustesse structurelle du modèle. Ces deux ajustements ont été intégrés dans une optique d'amélioration de la performance, généralisation et la robustesse.

Les nouveaux chiffres obtenus après amélioration du modèle (Fig 54) révèlent une évolution remarquable. Elle montre une courbe de perte beaucoup plus lisse, plus stable et plus faible, tant pour l'apprentissage que pour la validation, avec une nette convergence observée aux premières époques. Un bref pic apparaît vers l'époque 20, probablement dû à une valeur aberrante ou à une anomalie de mise à jour liée à un lot, mais il est rapidement corrigé. L'alignement étroit entre les deux courbes indique que le modèle se généralise désormais bien, sans surapprentissage apparent. De plus, elle affiche une très grande précision, atteignant 99 % à 100 % pour l'apprentissage et la validation. Les courbes de précision d'apprentissage et de validation sont presque superposées, ce qui confirme la robustesse du modèle et sa forte capacité de généralisation. L'intégration du Dropout, avec des taux compris entre 0.1 et 0.5 a clairement contribué à stabiliser le réseau tout en préservant une forte capacité d'apprentissage. En conclusion, ces résultats expérimentaux démontrent l'efficacité des techniques de régularisation, en particulier du Dropout, pour améliorer les performances et la fiabilité du modèle. Le système formé est désormais capable de produire des prédictions très précises avec une faible variance entre les phases de formation et de validation, ce qui en fait un candidat solide pour les applications d'IA critiques, en particulier dans les tâches de reconnaissance visuelle ou la prise de décision intelligente en logistique.

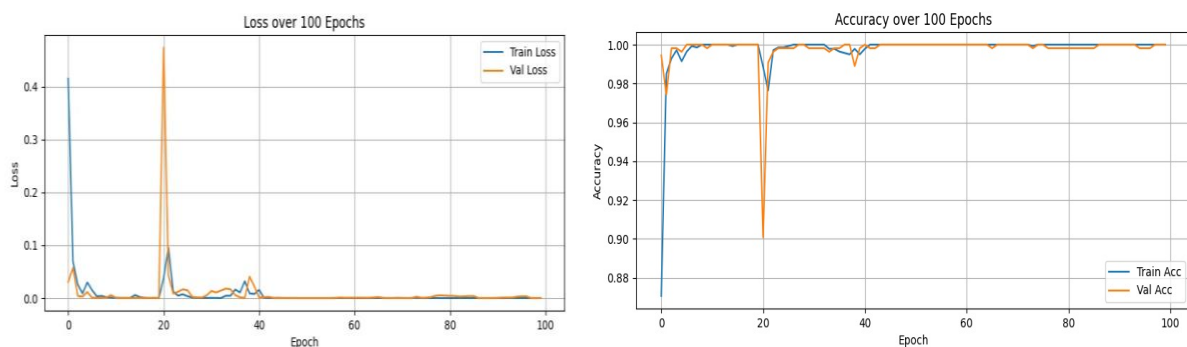


Figure 54 : Perte et précision dans la phase Test et validation après amélioration

2.7. Comparaison des métriques d'évaluation du modèle Road Net

Le Tableau 7 fournit une comparaison détaillée des métriques d'évaluation pour les modèles Road_Net, VGG16 ainsi que d'autres travaux de recherche dans le domaine. Lors de la phase d'entraînement, le modèle Road_Net affiche des performances remarquables pour l'ensemble des métriques, atteignant une précision, un rappel, un F1-score et une exactitude (accuracy) de 0.960, avec une perte (loss) d'entraînement relativement faible de 0.486.

En revanche, VGG16 montre une performance légèrement inférieure, avec une précision de 0.860, un rappel de 0.870, un F1-score de 0.850, une précision globale de 0.8737, mais une perte d'entraînement très élevée atteignant 52.41, suggérant une mauvaise optimisation pendant l'entraînement.

Tableau 7 : Comparaison des métriques dans la phase entraînement

Méthode	Précision (train)	Rappel (train)	F1-score (train)	Exactitude (train)	Perte (train)
Roadnet	0.960	0.960	0.960	0.960	0.486
VGG16	0.860	0.870	0.850	0.8737	0.524
Trappey [38]	0.920	0.910	0.915	0.930	0.490
Chen [39]	0.910	0.910	0.910	0.930	0.470
Bai [40]	0.915	0.910	0.915	0.930	0.470

Durant la phase de validation, tableau 8, Road_Net et VGG16 présentent des résultats similaires avec une précision, un rappel et un F1-score de 0.886, et une exactitude de 0.886 pour les deux modèles. Cependant, Road_Net conserve un léger avantage avec une perte de validation de 0.461, contre 48.081 pour VGG16, soulignant une meilleure généralisation sur des données non vues.

Tableau 8 : Comparaison des métriques dans la phase validation

Méthode	Précision (val)	Rappel (val)	F1-score (val)	Exactitude (val)	Perte (val)
Roadnet	0.897	0.886	0.889	0.886	0.461
VGG16	0.886	0.886	0.880	0.886	0.480
Trappey [38]	0.886	0.880	0.885	0.880	0.480
Chen [39]	0.880	0.880	0.880	0.890	0.470
Bai [40]	0.885	0.885	0.895	0.895	0.470

L'analyse expérimentale approfondie menée dans cette section a permis de valider l'efficacité du modèle Road_Net en matière de classification d'éléments de signalisation routière. En dépit de signes initiaux de surapprentissage, les ajustements apportés notamment l'augmentation des données et l'optimisation du Dropout ont renforcé sa capacité de généralisation comme le démontre le Tableau 9. La comparaison avec le modèle VGG16 et d'autres travaux de la littérature montre que Road_Net se positionne favorablement tant sur les performances en entraînement que sur la robustesse en validation, tout en maintenant une perte significativement plus faible. Ces résultats confirment le potentiel de cette solution pour une intégration fiable dans un système intelligent de détection d'infractions, et posent les bases solides pour le déploiement abordé dans la prochaine phase du projet.

Tableau 9 : Comparaison des métriques après amélioration

Méthode	Précision (train)	Rappel (train)	F1-score (train)	Exactitude (train)	Perte (train)
Roadnet	0.960	0.960	0.960	0.960	0.486
VGG16	0.860	0.870	0.850	0.8737	0.524
Trappey [38]	0.920	0.910	0.915	0.930	0.490
Chen [39]	0.910	0.910	0.910	0.930	0.470
Bai [40]	0.915	0.910	0.915	0.930	0.470

Méthode	Précision (val)	Rappel (val)	F1-score (val)	Exactitude (val)	Perte (val)
Roadnet	0.897	0.886	0.889	0.886	0.461
VGG16	0.886	0.886	0.880	0.886	0.480
Trappey [38]	0.886	0.880	0.885	0.880	0.480
Chen [39]	0.880	0.880	0.880	0.890	0.470
Bai [40]	0.885	0.885	0.895	0.895	0.470

Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail la conception et le développement du modèle Road_Net, ainsi que sa comparaison avec d'autres architectures de référence telles que VGG16, dans le cadre de la détection intelligente des panneaux de signalisation. L'objectif était de proposer une solution fiable, précise et adaptée aux contraintes des environnements logistiques réels.

Les résultats obtenus ont mis en évidence la supériorité du modèle Road_Net en termes de précision, de rappel, de F1-score et d'exactitude, tant en phase d'apprentissage que de validation. Sa performance robuste confirme sa pertinence pour des applications temps réel, en particulier dans des contextes à faibles ressources computationnelles.

En comparaison, le modèle VGG16, bien qu'efficace sur certains aspects, présente une perte d'apprentissage plus élevée, révélant une moins bonne capacité de généralisation et suggérant la nécessité d'une optimisation plus poussée de ses paramètres.

Grâce à une architecture CNN enrichie, combinant traitement multi-échelle, apprentissage par transfert, et une gestion efficace de la régularisation, Road_Net a montré sa capacité à traiter des scènes complexes avec des conditions d'éclairage variables, des occlusions et des variantes de signalisation routière.

Ces résultats confortent l'intégration de Road_Net dans le système global de NW Logistics Tracker, comme une brique technologique essentielle pour améliorer la sécurité routière, le respect du code de la route, et la fiabilité de la prise de décision embarquée.

Toutefois, certains défis techniques demeurent. Des améliorations futures pourront s'appuyer sur l'intégration de mécanismes d'attention pour une meilleure interprétation contextuelle des scènes et une régularisation plus fine pour prévenir durablement le surapprentissage, notamment en conditions dynamiques.

Enfin, le choix stratégique d'intégrer l'intelligence artificielle dans la logistique routière, et plus spécifiquement dans la reconnaissance intelligente des infractions et de la signalisation, s'inscrit dans les recommandations récentes de la littérature scientifique.

Ce chapitre constitue ainsi le socle technique de notre proposition d'architecture intelligente, et ouvre la voie à la phase suivante de déploiement, qui sera traitée selon l'approche DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler).

Conclusion générale

Cette thèse s'est inscrite dans une démarche à la fois scientifique et opérationnelle visant à concevoir, développer et évaluer une solution intelligente de gestion logistique routière, reposant sur l'intégration avancée de l'intelligence artificielle. Elle s'est articulée autour de plusieurs axes complémentaires, combinant une revue approfondie des fondements théoriques, une étude bibliométrique du champ de recherche, une modélisation méthodologique rigoureuse et un développement technique orienté vers l'implémentation réelle.

La première partie a permis d'asseoir les bases conceptuelles en éclairant les transformations majeures que connaît la chaîne logistique à l'ère de la digitalisation et de l'IA. La logistique, autrefois perçue comme une fonction de soutien, est aujourd'hui un levier stratégique de performance, de durabilité et de compétitivité. Dans ce contexte, l'intelligence artificielle en particulier les réseaux de neurones convolutifs s'affirme comme un outil puissant pour le traitement d'images, la reconnaissance de comportements, et la prise de décision automatisée.

La seconde partie s'est focalisée sur la conception et le développement de NW Logistics Tracker, une plateforme technologique modulaire intégrant des fonctions avancées de suivi de trajets, d'analyse comportementale et de détection intelligente d'infractions routières. L'architecture du système repose sur une organisation logicielle cohérente, des interfaces adaptées aux différents profils utilisateurs (gestionnaires et conducteurs), et une structure de données interopérable. Le modèle Road_Net, développé et optimisé au sein de ce système, s'est révélé particulièrement performant face aux exigences des environnements réels, démontrant sa supériorité face à des architectures de référence telles que VGG16.

Les résultats expérimentaux obtenus confirment la pertinence de la solution proposée : avec des scores élevés de précision, rappel et F1-score, une robustesse notable en phase de validation, et une capacité à s'adapter à des conditions routières complexes, Road_Net représente une brique technologique clé pour la logistique de demain. Néanmoins, certaines limites subsistent, notamment en ce qui concerne le surapprentissage ou la variabilité des performances selon les conditions environnementales. Pour y remédier, des techniques telles que l'augmentation des données et le renforcement du Dropout ont été appliquées, améliorant significativement la généralisation du modèle.

Cette recherche ouvre ainsi plusieurs perspectives. À court terme, le déploiement de NW Logistics Tracker en conditions réelles permettra de mesurer l'impact concret de l'IA sur la sécurité routière, la réduction des infractions, et l'optimisation des trajets et les contrôler. À moyen terme, l'intégration de mécanismes d'attention, de modèles hybrides ou encore l'exploitation de flux de données en temps réel (edge computing, IoT, 5G) renforceront la pertinence du système dans des contextes plus larges. Enfin,

sur le plan scientifique, cette thèse participe à la structuration d'un champ interdisciplinaire à fort potentiel : l'IA appliquée à la supply chain et exactement à la logistique durable, en lien avec les objectifs de sécurité, d'efficacité énergétique et de transition écologique.

Les travaux développés dans cette thèse offrent un large éventail de perspectives d'évolution, à la fois scientifiques, technologiques, opérationnelles et sociétales. L'enjeu principal réside dans l'amélioration continue des modèles d'intelligence artificielle mis en œuvre, l'extension fonctionnelle du système NW Logistics Tracker, ainsi que la consolidation de l'empreinte positive de l'IA dans le secteur de la logistique durable, sécurisée et intelligente.

Du point de vue de l'intelligence artificielle appliquée à la logistique routière, plusieurs pistes prometteuses s'ouvrent. L'architecture Road_Net, développée dans ce cadre, a montré des performances solides, mais sa généralisation pourrait être renforcée. L'intégration de mécanismes d'attention ou de structures hybrides telles que les Vision Transformers permettrait d'accroître sa robustesse face à des situations complexes, comme les conditions météorologiques extrêmes ou la dégradation des signalisations. En parallèle, le développement de modèles multitâches capables de détecter en temps réel divers événements logistiques (infractions, comportements anormaux, retards) renforcerait la valeur ajoutée du système. Par ailleurs, l'introduction de l'intelligence artificielle explicable (XAI) constitue un levier stratégique pour rendre les décisions du modèle compréhensibles et acceptables pour les utilisateurs, favorisant ainsi leur confiance et l'adoption du système.

Sur le plan technique, le NW Logistics Tracker peut connaître plusieurs évolutions. Son interopérabilité avec d'autres sources de données embarquées telles que les capteurs de pollution, la télémétrie motrice ou encore les capteurs biométriques du conducteur pourrait enrichir la plateforme et offrir une vue intégrée et prédictive du transport routier. L'intégration de modules avancés de prévision, notamment pour les risques d'accidents, la maintenance prédictive ou les retards anticipés, constitue une piste d'évolution majeure, en s'appuyant sur des modèles de séries temporelles alimentés par l'IA. À terme, un déploiement à grande échelle à travers des expérimentations pilotes avec des opérateurs logistiques marocains permettrait de valider l'efficacité du système en conditions réelles.

Les implications sociétales et réglementaires méritent également une attention particulière. L'acceptabilité par les conducteurs et les entreprises constitue un facteur clé de succès. Cela implique la mise en place de formations ciblées, d'interfaces utilisateurs intuitives et de mécanismes de retour d'expérience permettant une amélioration continue du système. D'un point de vue légal, la généralisation des dispositifs de surveillance intelligente devra s'accompagner d'un encadrement réglementaire respectueux de la vie privée, de la sécurité des données, et conforme aux normes nationales et internationales. Enfin, l'impact environnemental mesurable du système devra être intégré aux politiques publiques de décarbonation, en cohérence avec les engagements climatiques du Maroc et les stratégies de logistique verte.

En somme, cette thèse propose une approche concrète, innovante et fondée sur des résultats mesurables, contribuant à faire de l'intelligence artificielle un levier d'intelligence collective et de responsabilité dans le pilotage des chaînes logistiques du XXI^e siècle.

Références

1. Jawab, F., Arif, J., 2017. *Modélisation de l'externalisation des activités logistiques*. Presses Académiques Francophones, Saarbrücken, Germany. ISBN: 978-3-8381-4855-7.
2. Liu, X., 2023. The Collaborative Application of Internet of Things and Artificial Intelligence in Smart Logistics. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*.
3. Danchuk, V., Comi, A., Weiß, C., Svatko, V., 2023. The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*.
4. Bai, H., 2021. RETRACTED: Design of New Logistics Control Chain Based on Artificial Intelligence. *Journal of Physics: Conference Series*.
5. Liu, Y., Tao, X., Li, X., Colombo, A., Hu, S., 2023. Artificial Intelligence in Smart Logistics Cyber-Physical Systems: State-of-The-Arts and Potential Applications. *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*.
6. Zemlyak, S., Nozdreva, I., Sivakova, S., 2024. Implementation of AI in Smart Logistics Based on Mobile Technologies. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*.
7. Rosendorff, A., Hodes, A., Fabian, B., 2021. Artificial intelligence for last-mile logistics - Procedures and architecture. *Online Journal of Applied Knowledge Management*.
8. Hui, Z., Lee, A., 2016. Supply Chain Analytics.
9. Yu, X., 2022. Logistics Distribution for Path Optimization Using Artificial Neural Network and Decision Support System.
10. Li, N., Mao, Z., 2022. DBNTFPO: ANN-Based Approach for Logistics Distribution Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*.
11. Ailawadi, K.L., Bradlow, E.T., Draganska, M., Nijs, V., Roederkerk, R.P., et al., 2010. Empirical models of manufacturer-retailer interaction: A review and agenda for future research. *Marketing Letters*.
12. Liu, B., 2021. Logistics Distribution Route Optimization Model Based on Recursive Fuzzy Neural Network Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*.
13. Jucha, P., 2021. Use of artificial intelligence in last mile delivery. *SHS Web of Conferences*.
14. Shawon, R.E.R., Hasan, M.R., Rahman, M.A., Ghandri, M., Lamari, I.A., Kawsar, M., et al., 2025. Designing and Deploying AI Models for Sustainable Logistics Optimization: A Case Study on Eco-Efficient Supply Chains in the USA. *Journal of Ecohumanism*.
15. Cichosz, M., 2018. Digitalization and Competitiveness in the Logistics Service Industry.
16. Pugacheva, O., 2025. Basic directions for the use of artificial intelligence technologies in the transportation and logistics sector. *Competitiveness and Innovation in the Knowledge Economy*, 28th Edition.

17. Giuffrida, N., Fajardo-Calderin, J., Masegosa, A., Werner, F., Steudter, M., Pilla, F., 2022. Optimization and Machine Learning Applied to Last-Mile Logistics: A Review. *Sustainability*.
18. Zhao, M., Ji, S., Wei, Z., 2020. Risk prediction and risk factor analysis of urban logistics to public security based on PSO-GRNN algorithm. *PLoS ONE*.
19. Adeoye, Y., Onotole, E.F., Ogunyankinnu, T., Aipoh, G., Osunkanmi, A.A., Egbemhenghe, J., 2025. Artificial Intelligence in Logistics and Distribution: The function of AI in dynamic route planning for transportation, including self-driving trucks and drone delivery systems. *World Journal of Advanced Research and Reviews*.
20. Xia, W.-h., Zhou, D., Xia, Q.-y., Zhang, L., 2020. Design and implementation path of intelligent transportation information system based on artificial intelligence technology. *Jurnal Engineering*.
21. Iklassov, Z., Sobirov, I., Solozabal, R., Takác, M., 2024. Reinforcement Learning for Solving Stochastic Vehicle Routing Problem with Time Windows. *arXiv.org*.
22. Liu, Q., 2024. Logistics Distribution Route Optimization in Artificial Intelligence and Internet of Things Environment. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*.
23. Stupnitsky, O., Pryiatelchuk, O., 2021. Intelligence Technologies in Logistic Infrastructure Modernisation. *Economics & Education*.
24. Danilochkina, N., Lysenko, A., 2024. Optimization of Logistic Routes Through the Use of Artificial Intelligence Technologies. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*.
25. Gui-e, S., Jian-guo, S., 2020. Artificial Intelligence-Based Optimal Control Method for Energy Saving in Food Supply Chain Logistics Transportation. *Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence*.
26. Balagopal, P.A., Setia, J., Lakhani, A., 2024. Revolutionizing Logistics and Fleet Management: A Comprehensive Analysis of the Impact of EunoKinetiX on Operational Efficiency and Societal Dynamics. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*.
27. Peng, G., Wen, Y., Dou, W., Li, T., Xu, X., Ye, Q., 2024. Edge Intelligence Empowered Delivery Route Planning for Handling Changes in Uncertain Supply Chain Environment. *Journal of Cloud Computing*.
28. Xue, D., Guo, Y., Li, N., Song, X., Zhang, L., 2023. Cross-Domain Coordination of Resource Allocation and Route Planning for the Edge Computing-Enabled Multi-Connected Vehicles. *Journal of Cloud Computing*.
29. Che Hassan, M.H., Osman, L.H., 2025. Machine Learning in Logistic: Scoping Review. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*.
30. Meng, X., 2024. Research on the Development of Modern Design Through Data Mining Technology. *Informatica*.
31. Mohammed, I.A., Sofia, R., Radhakrishnan, G.V., Jha, S., Al Said, N., 2025. The Role of Artificial Intelligence in Enhancing Business Efficiency and Supply Chain Management. *Journal of Information Systems Engineering & Management*.

32. Călinescu, G., 2022. The Applications of Blockchain and Artificial Intelligence in Logistics. *Romanian Economic Journal*.
33. Singh, P.K., 2023. Digital Transformation in Supply Chain Management: Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) as Catalysts for Value Creation. *International Journal of Supply Chain Management*.
34. Yadav, M.S., Shukla, R., Parthasarathy, C., Chikati, D., Chandan, R.R., Gupta, K., et al., 2024. Transportation Logistics Monitoring for Transportation Systems Using Machine Learning. *Journal of Autonomous Intelligence*.
35. Balbaa, M., Abdurashidova, M., 2024. The Impact of Artificial Intelligence in Decision Making: A Comprehensive Review. *EPRA International Journal of Economics, Business and Management Studies*.
36. Fatorachian, H., Kazemi, H., 2024. AI-Enhanced Fault-Tolerant Control and Security in Transportation and Logistics Systems: Addressing Physical and Cyber Threats. *Complex Engineering Systems*.
37. Zhang, Y., 2019. The Application of Artificial Intelligence in Logistics and Express Delivery. *Journal of Physics: Conference Series*.
38. Woschank, M., Rauch, E., Zsifkovits, H.E., 2020. A Review of Further Directions for Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Smart Logistics. *Sustainability*.
39. Ponomarenko, I., Ponomarenko, D., 2023. AI-Powered Logistics and Digital Marketing for Business Optimisation. *Economics & Education*.
40. Emam, O., Haggag, R.M., Nabil, N., 2022. Using a Fuzzy Genetic Algorithm for Solving Transportation Logistics Problems. *Journal of Business and Management Studies*.
41. Váscónez, J.P., Schotborgh, E., Váscónez, I.N., Moya, V., Pilco, A., Menéndez, O., et al., 2024. Smart Delivery Assignment through Machine Learning and the Hungarian Algorithm. *Smart Cities*.
42. Singh, S., 2024. Enhancing Road-Based Supply Chain Efficiency in the US: Integrating AI/ML-Based C3I Systems with IoT-Enabled Trucks. *International Journal of Supply Chain Management*.
43. Hindarto, D., 2023. Battle Models: Inception ResNet vs. Extreme Inception for Marine Fish Object Detection. *SinkrOn*.
44. Zhang, F., Luan, J., Xu, Z., Chen, W., 2020. DetReco: Object-Text Detection and Recognition Based on Deep Neural Network.
45. Ren, X., Wang, R., 2023. A Target Detection Algorithm in Traffic Scenes Based on Deep Reinforcement Learning. *arXiv.org*.
46. Wan, S., Xu, X., Wang, T., Gu, Z., 2021. An Intelligent Video Analysis Method for Abnormal Event Detection in Intelligent Transportation Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

47. Kumar, S., Jain, A., Rani, S., Alshazly, H., Idris, S.A., Bourouis, S., 2022. Deep Neural Network Based Vehicle Detection and Classification of Aerial Images. *Intelligent Automation & Soft Computing*.
48. Murthy, J.S., Siddesh, G., Lai, W., Parameshachari, B., Patil, S.N., Hemalatha, K.L., 2022. ObjectDetect: A Real-Time Object Detection Framework for Advanced Driver Assistant Systems Using YOLOv5. *Wireless Communications and Mobile Computing*.
49. Cabanes, Q., Senouci, B., 2017. Objects Detection and Recognition in Smart Vehicle Applications: Point Cloud Based Approach. *International Conference on Ubiquitous and Future Networks*.
50. Chelliah, B.J., Chauhan, V., Mishra, S., Sharma, V., 2019. Advancement of Driverless Cars and Heavy Vehicles using Artificial Intelligence (Object Detection). *International Journal of Engineering and Advanced Technology*.
51. Jagannathan, P., Rajkumar, S., Frnda, J., Divakarachari, P., Subramani, P., 2021. Moving Vehicle Detection and Classification Using Gaussian Mixture Model and Ensemble Deep Learning Technique. *Wireless Communications and Mobile Computing*.
52. Mustafa, T., Karabatak, M., 2024. Real Time Car Model and Plate Detection System by Using Deep Learning Architectures. *IEEE Access*.
53. Singh, G., Singh, S., 2024. Advanced Systems for Detecting and Recognizing Traffic Objects. *International Journal of Scientific Research in Computer Science Engineering and Information Technology*.
54. Loce, R., Bernal, E.A., Wu, W., Bala, R., 2013. Computer Vision in Roadway Transportation Systems: A Survey. *Journal of Electronic Imaging*.
55. Wang, S., 2023. Research on Computer Vision Image Classification. *Academic Journal of Computing & Information Science*.
56. Kumar, M., Ghorpade, J., Kulkarni, V., Bedi, R., 2012. Neural Network Based Smart Vision System for Driver Assistance in Extracting Traffic Signposts. *CUBE International IT Conference & Exhibition*.
57. Alit, P., Santiary, W., Made, I., Widyantara, O., Hartati, R.S., 2018. Traffic Signs Detection Based on Saliency Map Using Canny Edge.
58. Saraswathy, C., Nandhini, K., Kalaivani, R., 2022. Traffic Sign Detection and Recognition Based on Convolutional Neural Network. *International Journal of Health Sciences*.
59. Salhi, A., Minaoui, B., Fakir, M., 2014. Robust Automatic Traffic Signs Recognition Using Fast Polygonal Approximation of Digital Curves and Neural Network.
60. Barodi, A., Bajit, A., El Aidi, S., Benbrahim, M., Tamtaoui, A., 2020. Applying Real-Time Object Shapes Detection to Automotive Traffic Road Signs. *International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies*.
61. Toshniwal, D., Loya, S., Khot, A., Marda, Y., 2024. Optimized Detection and Classification on GTRSB: Advancing Traffic Sign Recognition with Convolutional Neural Networks. *arXiv.org*.

62. Iparraguirre, O., Amundarain, A., Brazález, A., Borro, D., 2021. Sensors on the Move: Onboard Camera-Based Real-Time Traffic Alerts Paving the Way for Cooperative Roads. *Italian National Conference on Sensors*.
63. Güney, E., Bayilmis, C., Çakan, B., 2022. An Implementation of Real-Time Traffic Signs and Road Objects Detection Based on Mobile GPU Platforms. *IEEE Access*.
64. Sinha, S., 2023. Traffic Sign Detection and Recognition Based on Convolutional Neural Network. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*.
65. Patil, R., Ahire, P., Bamane, K., Patankar, A., Patil, P.D., Badoniya, S., et al., 2024. Real-Time Traffic Sign Detection and Recognition System Using Computer Vision and Machine Learning. *Journal of Electrical Systems*.
66. Pang, D., Guan, Z., Luo, T., Su, W., Dou, R., 2023. Real-Time Detection of Road Manhole Covers with a Deep Learning Model. *Scientific Reports*.
67. Li, M., Zhang, L., Li, L., Song, W., 2022. Yolo-Based Traffic Sign Recognition Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*.
68. Naranjo, M., Fuentes, D., Muelas, E., Díez, E., Ciruelo, L., Alonso, C., et al., 2023. Object Detection-Based System for Traffic Signs on Drone-Captured Images. *Drones*.
69. Satti, S.K., Rajareddy, G.N.V., Mishra, K., Gandomi, A.H., 2024. Potholes and Traffic Signs Detection by Classifier with Vision Transformers. *Scientific Reports*.
70. Jadhav, A., 2023. Traffic Sign Detection and Voice Alert. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*.
71. Chen, R.-C., Dewi, C., Zhuang, Y.-C., Chen, J.-K., 2023. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization for Recognizing Road Marking at Night Based on Yolo Models. *IEEE Access*.
72. Rithish, H., Modhugu, R., Reddy, R., Saluja, R., Jawahar, C.V., 2021. Evaluating Computer Vision Techniques for Urban Mobility on Large-Scale, Unconstrained Roads. *arXiv.org*.
73. Mahadshetti, R., Kim, J., Um, T.-W., 2024. Sign-YOLO: Traffic Sign Detection Using Attention-Based YOLOv7. *IEEE Access*.
74. Nafaa, S., Ashour, K., Mohamed, R., Essam, H., Emad, D., Elhenawy, M., et al., 2024. Advancing Roadway Sign Detection with YOLO Models and Transfer Learning. *International Conference on Multimodal Interaction*.
75. Jayashree, C., Krishnan, P.N., Kuralamudhu, K., 2023. Implementation of Fatal Vehicle Collision Avoidance System for the Deterrence of Mishaps in Potential Zones. *Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences*.
76. Ho, G., Tsang, Y., Wu, C.-H., Wong, W.-H.C., Choy, K., 2019. A Computer Vision-Based Roadside Occupation Surveillance System for Intelligent Transport in Smart Cities. *Italian National Conference on Sensors*.

77. McLauchlan, P., Beymer, D., Coifman, B., Malik, J., 1997. A Real-Time Computer Vision System for Measuring Traffic Parameters. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
78. Huang, M.Z., Yen, S.-H., 2004. A Real-Time and Color-Based Computer Vision for Traffic Monitoring System. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*.
79. Abiyev, R., Arslan, M., 2023. Vehicle Detection Systems for Intelligent Driving Using Deep Convolutional Neural Networks. *Discover Artificial Intelligence*.
80. Sun, Z., Bebis, G., Miller, R., 2002. On-Road Vehicle Detection Using Gabor Filters and Support Vector Machines. *14th International Conference on Digital Signal Processing Proceedings (DSP 2002)*.
81. Öztürk, G., Eldoğan, O., Köker, R., 2024. Computer Vision-Based Lane Detection and Detection of Vehicle, Traffic Sign, Pedestrian Using YOLOv5. *Sakarya University Journal of Science*.
82. Lin, Y.-K., Tu, C.-Y., Kurosawa, L., Liu, J.-H., Wang, Y.-Z., Roy, D., 2024. Applications of Computer Vision in Transportation Systems: A Systematic Literature Review. *SHS Web of Conferences*.
83. Hosseini DolatAbadi, S.H., Hashemi, S.M.H., Hosseini, M., AliHosseini, M.-A., 2025. Revolutionizing Traffic Management with AI-Powered Machine Vision: A Step Toward Smart Cities. *arXiv.org*.
84. Usmanhujaev, S., Baydadaev, S., Woo, K.J., 2020. Real-Time, Deep Learning Based Wrong Direction Detection.
85. Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Heidarrezai, M., Rahimian Kolor, S.S., Petru, M., 2020. A Review on Vehicle Classification and Potential Use of Smart Vehicle-Assisted Techniques. *Italian National Conference on Sensors*.
86. Chen, Z., Pears, N.E., Freeman, M., Austin, J., 2014. A Gaussian Mixture Model and Support Vector Machine Approach to Vehicle Type and Colour Classification.
87. Gaur, K., Dhakar, J., Singh, S., Khosla, A., 2023. Nighttime Rainy Season Traffic Analysis: Vehicle Detection, Tracking, and Counting with YOLOv8 and DeepSORT. *Journal of Innovative Image Processing*.
88. Lin, J.-P., Sun, M.-T., 2018. A YOLO-Based Traffic Counting System. *International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence*.
89. Qadri, S., Gökçe, M., Öner, E., 2020. State-of-Art Review of Traffic Signal Control Methods: Challenges and Opportunities. *European Transport Research Review*.
90. Azimjonov, J., Özmen, A., Varan, M., 2023. A Vision-Based Real-Time Traffic Flow Monitoring System for Road Intersections. *Multimedia Tools and Applications*.
91. Liu, Y., Tian, B., Chen, S., Zhu, F., Wang, K., 2013. A Survey of Vision-Based Vehicle Detection and Tracking Techniques in ITS. *Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*.

92. Hilbert, E.E., Rennie, P.A., Kneidl, W.A., 1980. A Sensor for Control of Arterials and Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
93. Gunasekara, S.V.S., Gunarathna, D., Dissanayake, M.B., 2021. Advanced Driver-Assistance System with Traffic Sign Recognition for Safe and Efficient Driving. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*.
94. Shah, H., Srinivasan, K., Rinayat, P., Sagotiya, G., Bagde, A., et al., 2022. Traffic Violation Detection and Control. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*.
95. Dede, D., Sarsil, M.A., Shaker, A., Altintas, O., Ergen, O., 2023. Next-Gen Traffic Surveillance: AI-Assisted Mobile Traffic Violation Detection System. *arXiv.org*.
96. Absadyk, A., Absattar, Y., 2023. Using a Virtual Twin of a Building to Ensure Security in Educational Institutions. *Scientific Journal of Astana IT University*.
97. Shoman, W., Yeh, S., Sprei, F., Koehler, J., Plötz, P., Todorov, Y., et al., 2023. A Review of Big Data in Road Freight Transport Modeling: Gaps and Potentials. *Data Science for Transportation*.
98. Moufad, I., Jawab, F., El Yadari, M., Ridaoui, H., 2024. Artificial Intelligence Use in Urban Logistics and Transport Activities: Overview and Research Trends. *IEEE 15th International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*.
99. Asatiani, A., Malo, P., Nagbøl, P.R., Penttinen, E., Rinta-Kahila, T., Salovaara, A., 2020. Challenges of Explaining the Behavior of Black-Box AI Systems. *MIS Quarterly Executive*.

Annexe 1

Le ministère de l'économie et des finances du Royaume du Maroc lance une nouvelle étude - en collaboration avec FSD Africa - explorant les options de financement pour les petites et moyennes entreprises dans le cadre de l'économie verte en plein essor au Maroc.

- *Les petites et moyennes entreprises (PME) marocaines représentent 93 % de l'ensemble des entreprises du pays et emploient plus de 46 % de la main-d'œuvre. Elles ne génèrent que 40 % du produit intérieur brut (PIB) du pays et 31 % de ses exportations.*
- *Les PME sont censées jouer un rôle important dans la réalisation des contributions déterminées au niveau national (CDN) du Maroc (l'atténuation et l'adaptation nécessiteront respectivement 38,8 et 40 milliards de dollars américains), environ 40 % des mesures d'atténuation et 55 % des mesures d'adaptation devant être mises en œuvre par des PME, soit directement, soit par le biais de la sous-traitance à de grandes entreprises.*

La publication fournit des estimations du potentiel considérable de l'économie verte du Maroc - ainsi que son alignement sur les efforts du pays pour atteindre les CDN - et explore l'offre de financement vert aux PME, si essentielle à la croissance du secteur.

Rabat, le 23 mai 2023 – Le Ministère de l'Economie et des Finances du Royaume du Maroc, aux côtés de ses partenaires de FSD Africa et de l'ambassade britannique au Maroc (Foreign Commonwealth Development Office), a mené une étude portant sur l'accessibilité et la diversité des offres financières disponibles pour les PME et les MPME au Maroc, et sur la capacité de ces entreprises (qui représentent 93 % de l'ensemble des entreprises du pays et emploient 46 % de sa main-d'œuvre) à accélérer la transition du Maroc vers l'économie verte.

L'offre de financement vert a augmenté dans le Royaume, avec plusieurs offres émergeant au cours des dernières années pour soutenir les projets verts. Qu'il s'agisse des institutions publiques mandatées pour soutenir les entreprises marocaines, des institutions régionales et continentales de financement du développement ou des banques commerciales locales, il existe un écosystème de plus en plus sophistiqué d'acteurs capables de stimuler la croissance des petites entreprises marocaines innovantes par le biais de la dette, des fonds propres et des subventions. Néanmoins, et face à la demande croissante d'instruments de financement verts, un effort supplémentaire doit être fourni à travers des systèmes de financement innovants pour combler le gap de financement.

L'étude aboutit à la conclusion que l'engagement du pays en faveur d'une croissance financière durable nécessitera une collaboration étroite des diverses parties prenantes. Suite à la publication de cette étude, FSD Africa contribuera à la conception d'un nouvel instrument financier qui augmentera la disponibilité et l'accessibilité du financement vert pour les PME marocaines. Conformément aux Contributions

déterminées au niveau national (CDN) actualisées du Maroc, les PME devraient jouer un rôle important dans la réalisation des CDN du Maroc, avec environ 40 % des actions d'atténuation (15,5 milliards de dollars américains) et 55 % des actions d'adaptation (22 milliards de dollars américains) à mettre en œuvre par les PME, soit directement, soit par le biais de la sous-traitance aux grandes entreprises.

Faisant des commentaires sur le projet, **Madame la Ministre de l'Economie et des Finances, Mme. Nadia Fatah**, a déclaré : "Nous notons avec satisfaction la pertinence de cette étude couvrant une analyse des lacunes de l'offre et des besoins de financement vert ciblant les PME pour la conception d'un nouvel instrument qui pourrait répondre à la demande non satisfaite des PME en termes de financements verts. En effet, ce travail tombe à point nommé pour accompagner les efforts entamés afin de mettre en œuvre l'orientation stratégique du Royaume visant à inscrire la durabilité comme pilier du développement. A cet égard, nous tenons à saluer l'appui de la coopération britannique dans la réalisation de cette étude".

L'ambassadeur du Royaume-Uni au Maroc, Simon Martin, a noté : "En mars 2023, le Royaume-Uni a publié sa stratégie actualisée pour la Finance Verte. Celle-ci met l'accent sur l'opportunité de croissance que représente la transition vers le net zéro pour les entreprises, en particulier les PME, et la nécessité d'un accompagnement dédié. Elle met également en lumière les travaux de FSD Africa au Maroc, contribuant déjà à stimuler les flux de capitaux en faveur de la croissance économique verte. Je suis ravi qu'avec cette étude, nous soyons en mesure de franchir une nouvelle étape dans le soutien à l'économie verte florissante du Maroc et d'élargir davantage notre coopération financière bilatérale".

Mark Napier, PDG de FSD Africa, a ajouté : "Le potentiel du Maroc en tant qu'économie verte est extrêmement prometteur, mais il est essentiel que l'épine dorsale économique du pays - les petites et moyennes entreprises - soit encouragée et soutenue dans ses efforts pour s'engager dans des projets et des activités vertes. Ce n'est qu'en concevant un système de financement vert que les aspirations vertes du Royaume pourront être réalisées. Cette étude constitue une intervention importante et opportune qui, nous l'espérons, suscitera des discussions parmi les décideurs politiques, les législateurs, les acteurs des capitaux privés et d'autres parties prenantes".

L'analyse GAP a permis de dégager une image claire des domaines nécessitant une action au sein de l'espace du financement vert. Certaines industries clés - telles que la construction, le transport, la production d'électricité - ont un fort potentiel d'écologisation mais sont mal desservies par les lignes de crédit vertes, alors que des domaines tels que l'agriculture sont bien couverts. En outre, l'étude conclut que des secteurs clés tels que la pêche et l'habitat durable restent pratiquement à l'écart des offres de financement vert et doivent être pris en compte. Enfin, l'étude souligne l'absence d'instruments clés tels que les produits d'assurance et de garantie verts, ou les fonds d'investissement exclusivement conçus pour les activités vertes.

L'étude formule une série de recommandations dans des domaines allant de la sensibilisation du public à la réglementation et à la fiscalité, en passant par l'assistance technique et la technologie, entre autres.



Pour plus d'informations, veuillez contacter :

FSD Africa

Nelson Karanja

Directeur de la communication et de l'engagement

nelson@fsdafrica.org

Note à l'attention des rédacteurs

Au cours des trois dernières années, FSD Africa s'est activement engagée dans des initiatives de financement climatique en soutenant avec succès huit émissions d'obligations vertes et, plus récemment, en se concentrant sur cinq pays prioritaires : Le Kenya, le Nigeria, l'Éthiopie, le Ghana et le Maroc. Le soutien aux démonstrations d'obligations vertes a été très fructueux, en particulier au Nigeria et au Kenya, grâce au développement de leurs programmes respectifs en la matière. Parmi les exemples de transactions en cours de préparation, on peut citer l'aide à la vérification des obligations souveraines et des obligations d'entreprises telles que l'émission d'obligations vertes souveraines au Nigeria, l'obligation verte souveraine d'Acorn Holdings Limited et l'obligation verte souveraine du Kenya.

A propos de FSD Africa

FSD Africa est une agence de développement spécialisée qui s'efforce de mettre la finance au service de l'avenir de l'Afrique. Basée à Nairobi, l'équipe d'experts du secteur financier de FSD Africa travaille aux côtés des gouvernements, des chefs d'entreprise, des régulateurs et des décideurs politiques pour concevoir et mettre en place des programmes ambitieux qui améliorent le fonctionnement des marchés financiers pour tous. Fondée en 2012, FSD Africa est une société à but non lucratif à responsabilité limitée au Kenya. Elle est financée par une aide du gouvernement britannique.

Pour plus d'informations, veuillez consulter : <http://www.fsdafrica.org>

Annexe 2

PREAMBULE



Le terme logistique désigne un ensemble d'activités, de techniques et de moyens visant à obtenir une gestion optimale des flux de produits et des biens. Une bonne logistique tend à organiser, rationaliser, hiérarchiser, réguler et coordonner l'ensemble de ces flux à partir des sources de matières premières jusqu'au consommateur final en passant par des systèmes de production ou de commercialisation.

Jusqu'à récemment, le paradigme dominant pour ceux qui gèrent la logistique a été principalement basé sur une logique de réduction de coûts directs. Les coûts environnementaux et sociaux plus larges, traditionnellement exclues du bilan, ont été ignorés pendant des décennies.

Au cours des dernières années, la quantification de l'impact de la logistique sur le changement climatique a suscité un réel intérêt. Plusieurs recherches scientifiques et études se sont attelées à la question. Le Forum économique mondial a estimé selon une étude datant de 2009 que l'activité logistique représente environ 5,5 % des émissions des gaz à effet de serre. Selon la même étude, les installations logistiques sont responsables de 9 à 10 % des émissions des GES, tandis que le reste provient du transport de fret. Le transport routier de marchandises est responsable de deux tiers de ces émissions de GES. D'autres études et recherches indiquent des parts plus importantes des opérations logistiques dans les émissions des GES.

A la lumière de ces constats, et dans un contexte caractérisé au cours des dix à quinze dernières années par l'accroissement de l'intérêt des peuples et des gouvernements pour les questions environnementales, en particulier les changements climatiques, les entreprises et acteurs économiques s'investissent de plus en plus dans des pratiques visant à réduire l'impact environnemental de leurs opérations logistiques. Ces pratiques désignées souvent par le terme générique «Green Logistics» sont considérées par des compagnies comme argument de vente à des clients de plus en plus regardants à l'empreinte carbone des produits et services qu'ils consomment.

Au niveau du Maroc, un nombre important d'actions et de pratiques « Green » est entrepris par les acteurs de la logistique notamment dans le cadre des chantiers de la stratégie nationale logistique lancée en 2010 qui se fixe des objectifs ambitieux en termes de réduction des émissions de polluants générées par le secteur.



PREAMBULE

Aujourd'hui et plus qu'auparavant, la communauté logistique marocaine est appelée à se mobiliser davantage autour de ce sujet dans le cadre d'une approche volontariste, inclusive et cohérente en vue de positionner le secteur de la logistique d'une manière efficace dans les efforts du Maroc en matière de développement durable en saisissant l'opportunité de l'organisation dans notre pays de la COP22.

Dans ce cadre, l'Agence Marocaine de Développement de la Logistique a initié, en partenariat avec la Confédération Générale des Entreprises du Maroc, la constitution d'un pool issu de la communauté logistique marocaine dont les travaux ont permis, entre autres actions, l'établissement de la présente charte affirmant ainsi sa volonté d'agir de façon collective en faveur d'une logistique plus respectueuse de l'environnement au Maroc.

Ce pool était composé, en plus d'experts du secteur, de plusieurs entités couvrant une grande partie des activités et des maillons de la chaîne logistique dont notamment :

-  l'Agence Marocaine de Développement de la Logistique (AMDL) ;
-  la Fédération du Transport à la Confédération Générale des Entreprises du Maroc ;
-  la Commission Logistique à la Confédération Générale des Entreprises du Maroc ;
-  la Fédération Nationale de l'Agroalimentaire (FENAGRI) ;
-  l'Association Marocaine des Exportateurs (ASMEX) ;
-  l'Association des Freight Forwarders du Maroc (AFFM) ;
-  l'Association professionnelle des agents maritimes, consignataires de navires et courtiers d'affrètement du Maroc (APRAM) ;
-  l'Office National des Chemins de Fer (ONCF) ;
-  l'Agence Spéciale Tanger Med (TMSA) ;
-  l'Agence Nationale des Ports (ANP).

Ces entités constituent, avec un certain nombre d'organismes volontaires de la communauté logistique, le premier noyau d'adhérents à la présente charte.

La liste des adhérents constituant ce noyau est présentée dans une annexe à la présente charte.

PREAMBULE



L'adhésion ultérieure à la présente charte est ouverte à toute entité et organisation privée ou publique entreprenant ou gérant des activités et opérations logistiques liées aux flux de marchandises.

Cette charte se veut être un outil d'information sur les principes et les bonnes pratiques de la logistique verte et une invitation permanente à ces différentes entités d'adopter ces bonnes pratiques.

Elle vise également à contribuer au développement d'une référence « morale/éthique » pour les entreprises et est conçue pour évoluer dans le cadre d'une démarche de concertation dynamique et collective pour intégrer toutes les évolutions innovantes de la logistique verte.

Cette charte met en exergue plusieurs leviers qui concernent notamment le développement d'infrastructures logistiques durables, l'utilisation de matériel, équipements et méthodes de gestion des chaînes logistiques dociles à l'environnement, la formation, la recherche et développement, l'adoption de normes et labels verts,...

Il est également prescrit dans la présente charte les modalités d'adhésion des entités désireuses de contribuer au développement d'une logistique citoyenne et respectueuse de l'environnement en s'appropriant les principes et les bonnes pratiques qui y sont recommandés.

OBJECTIFS



La présente charte a pour objectifs de :



1

Améliorer la prise de conscience de l'importance de la contribution du secteur de la logistique aux actions globales de lutte contre les changements climatiques ;



2

Assurer une mobilisation maximale de la communauté logistique marocaine (institutionnels, chargeurs, opérateurs logistiques, ...) autour d'une approche volontariste, inclusive et cohérente en matière de développement durable ;



3

Promouvoir les efforts entrepris au niveau national en termes de bonnes pratiques « Green Logistics » ;



4

Initier une nouvelle dynamique de la communauté en la matière privilégiant la mise en place d'actions collaboratives ;



5

Constituer un cadre d'échange des expériences en matière de logistique verte, et un dispositif de veille et de benchmark par rapport aux pratiques et tendances environnementales en logistique à l'international notamment dans les pays développés dans ce domaine.



6

Anticiper le positionnement du secteur logistique au Maroc par rapport aux opportunités de coopération et de financement prévisibles dans le cadre de la mise en œuvre de l'accord de Paris en vertu de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

PRINCIPES DIRECTEURS



Les adhérents à cette charte s'engagent à privilégier dans leurs actions opérationnelles les principes directeurs suivants :

Le secteur de la logistique s'est fortement développé ces dernières années et devient une activité majeure de l'organisation économique actuelle. Ce développement rapide de la logistique intervient dans une période où les préoccupations environnementales sont de plus en plus

marquées et les impacts de l'activité humaine de plus en plus inquiétants.

Principe 1 :

Adopter une démarche progressive et continue pour le développement d'une logistique verte favorable au dynamisme économique

Devant ces constats, il est important que les acteurs de la Supply Chain s'inscrivent dans une démarche progressive et continue de développement durable notamment en conciliant leurs méthodes et opérations avec les pratiques de la logistique verte.

Le secteur de la logistique est un domaine évolutif dans lequel les perspectives sont nombreuses, il constitue un lieu de rencontre des différents acteurs institutionnels et professionnels. De ce fait, s'inscrire dans une démarche collaborative est un impératif qui permet de fédérer un maximum de parties prenantes autour des bonnes pratiques de la logistique verte.

Principe 2 :

Créer une synergie entre les acteurs de la communauté logistique au sujet de la logistique verte

ENGAGEMENTS VOLONTAIRES



Les adhérents à la présente charte s'engagent à porter et à soutenir les projets et les initiatives et à adopter les bonnes pratiques contribuant au développement de la logistique verte et ce dans plusieurs domaines et à différents niveaux :

Développement et exploitation d'infrastructures et installations logistiques efficaces en matière environnementale

La mise en place d'une logistique verte passe en partie par la réalisation et l'exploitation d'infrastructures et installations logistiques respectueuses de l'environnement. Il est notamment recommandé dans ce cadre :

- Le développement des installations à basse consommation d'énergie pour l'entreposage, incluant souvent toitures en panneaux solaires, éoliennes, systèmes d'éclairage restrictifs, récupération d'eaux pluviales ;
- Le développement des corridors ferroviaires sur les grandes distances de et vers les ports.
- La mise en place, pour les grands volumes, de plateformes et hubs logistiques : Les entreprises organisant la distribution de leurs produits à grande échelle, sont appelées à mettre en place des plates-formes de distribution stratégiquement positionnées à proximité des infrastructures de transport internationales ;
- L'utilisation du transport ferroviaire comme moyen écologique de massification des flux de et vers ces hubs logistiques ;
- Le développement des hinterlands portuaires utilisant le ferroviaire comme transport primaire ;
- L'utilisation, si possible, de centres de transporteurs urbains pour mieux gérer les flux de véhicules de transport de marchandises en ville ;
- Le respect de la réglementation en matière de sécurité et d'hygiène des espaces logistiques ;
- L'encouragement d'une gestion novatrice des infrastructures qui atténue l'impact de la circulation des marchandises sur l'environnement notamment en matière de tarification des infrastructures de transport routier de marchandises ;
- La mise en place et l'utilisation efficace des installations permettant d'éviter les trajets supplémentaires des véhicules de transport telles que les stations de pesée obligatoire des conteneurs à l'export ou les ponts bascules sur les grands axes routiers en plus des installations de pesée au niveau de certains ports.



Utilisation de matériel et équipements propres

Si les véhicules polluent de moins en moins avec la mise en place des normes Euro, ils sont de plus en plus nombreux sur les routes. Outre la solution de réduire leur nombre avec de meilleurs taux de remplissage ou des circuits raccourcis, d'autres pistes peuvent être explorées pour les transports en ville, notamment les véhicules hybrides et électriques.

Dans ce domaine, les acteurs de la communauté logistique sont appelés à promouvoir auprès des autorités compétentes des mesures, notamment d'ordre fiscale, encourageant le recours aux véhicules les moins polluants.

Adoption de pratiques propres pour la gestion des chaînes logistiques

Mutualisation et gestion collaborative :

La mutualisation et la gestion collaborative des moyens sont parmi les pratiques logistiques qui répondent au mieux aux enjeux de la « Green Logistics ». Elles permettent aux entreprises de faire ressortir des gains économiques, organisationnels et environnementaux dont elles ne pourraient bénéficier individuellement. Leur mise en place est souvent favorisée par :

- 🌱 L'externalisation où les prestataires des services logistiques sont le maillon facilitateur de la solution ;
- 🌱 L'agrégation et la massification des flux logistiques, à travers la création des structures agrégatives, permettant le groupage de marchandises entre les acteurs et la mutualisation des ressources pour l'organisation d'opérations logistiques.

Multi-modalité :

L'approche multimodale désigne la volonté de développer des chaînes de transport alternatives à la route dont l'impact environnemental est considéré comme négatif.

ENGAGEMENTS VOLONTAIRES



Il est à ce titre préconisé :

- 🌱 Le développement du transport multimodal, privilégiant le ferroviaire, permettant ainsi de réduire les émissions des gaz à effet de serre et la congestion des axes routiers ;
- 🌱 Le développement des procédures permettant le “shift -modal” de la route vers le rail ;
- 🌱 Lorsque les conditions le permettent, le recours au transport maritime courte distance et le cabotage pour le transport de flux massifiés de marchandises.

Optimisation de la logistique inverse :

La logistique inverse a pris, au cours des dernières années, un caractère stratégique et occupe une place importante dans les dispositifs et pratiques de la logistique verte. Elle concerne notamment la gestion des retours de produits ou biens en particulier les substances dangereuses.

Dans ce cadre, une attention particulière devra être accordée à la prise en compte et au traitement des flux de la logistique inverse dans la mesure où une gestion efficace des retours de produits ou biens peut contribuer à des gains importants en termes d’atténuation des externalités négatives des activités logistiques notamment sur le plan environnementale et favoriser les processus de recyclage des marchandises et matériaux utilisés dans les activités logistiques.

Limitation des emballages et augmentation du taux de recyclage des produits :

Face au développement de la collecte des emballages, l’objectif est d’augmenter le taux de régénération et de recyclage des produits en fin de vie afin, notamment, de réduire les taux d’enfouissement ou d’incinération. Le recyclage permet de limiter les importations de matières premières, de contribuer aux économies d’énergie, de limiter les émissions de gaz à effet de serre, d’aller dans le sens d’une démarche de logistique verte et de participer à une démarche écologique et civique.



Il est à ce titre préconisé, pour les procédures import-export de marchandises, une utilisation plus élargie au niveau de l'ensemble de la communauté logistique du guichet unique national des procédures du commerce extérieur PORTNET.

Il est important d'accorder une attention particulière aux opérations logistiques en ville. Dans ce cadre, les acteurs de la logistique urbaine sont appelés à être regardant par rapport à plusieurs aspects notamment :

-  Le dimensionnement et la taille de leurs flottes de distribution en ville ;
-  L'utilisation de matériel de manutention approprié ;
-  La planification des livraisons en coordination avec les points de vente ;
-  L'utilisation de véhicules à basse émission de GES ;
-  La création et l'utilisation d'espaces de logistiques urbains efficaces et idéalement positionnés dans les villes ;
-  Le respect des réglementations locales spatiales et temporelles organisant la circulation des marchandises ;
-  L'utilisation des aires de livraisons pour la desserte des points de vente et de ruptures de charge.

La maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (GES) par les véhicules de marchandises et par les infrastructures logistiques représente un enjeu majeur de la logistique verte.

ENGAGEMENTS VOLONTAIRES



Il est opportun pour les acteurs de la communauté logistique de systématiser, dans la mesure du possible, l'instauration de dispositifs et outils pérennes permettant d'évaluer et suivre l'évolution de l'empreinte carbone des opérations logistiques réalisées. L'objectif est de disposer d'une visibilité claire permettant de prévoir des solutions écologiques pertinentes.

Formation, recherche et développement

Implémentation de plans de formation « Green Logistics » :

Pour améliorer l'image et la performance des activités de logistique, il est nécessaire d'obtenir un comportement adapté des professionnels du secteur, qu'il s'agisse de conduite du véhicule, de stationnement ou de mode de chargement et de déchargement des marchandises.

Pour cela, il est nécessaire de définir et d'exécuter des plans de formation adaptés, notamment en éco-conduite, étant donné que le transport est la composante la plus polluante de la chaîne logistique.

Soutien de pôles de recherche appliquée spécifique à la logistique verte :

Le soutien de pôles de recherche se traduit par le financement d'équipements spécifiques et l'encouragement de projets permettant de fédérer des équipes de recherche sur des thématiques prioritaires spécifiques à la logistique verte. L'objectif étant de répondre aux défis environnementaux de la logistique soulevés par les acteurs de la communauté logistique.

Normalisation et labellisation

Adoption de référentiels et de normes environnementaux pour une logistique plus « verte » :

L'adoption de référentiels et de normes est préconisée comme levier pertinent pour l'instauration d'une logistique plus verte au sein de la communauté logistique.



Adhésion à un label vert pour encourager les pratiques de la « Green Logistics » :

Il est souhaitable, pour la communauté logistique, de promouvoir et soutenir le développement d'un label « logistique verte ». L'intérêt de ce label est de définir une référence reconnue par les acteurs économiques et qui permet de distinguer les organisations engagées dans des mesures d'atténuation des impacts des activités logistiques sur l'environnement.

Sensibilisation et promotion des bonnes pratiques

Soutien à la création d'un prix « Green Logistics » au niveau national :

Des initiatives de reconnaissance, à travers des prix spécifiques récompensant les projets innovateurs dans le domaine de la logistique verte, permettent aux entreprises de se voir mesurer et valoriser les efforts entrepris en matière de « Green Logistics » visant à minimiser l'impact écologique de leurs activités logistiques.

Organisation d'événements pour promouvoir les meilleures pratiques de la logistique verte :

La communauté logistique est invitée à promouvoir l'adoption de bonnes pratiques environnementales constitutives de la logistique verte notamment à travers l'organisation ou la participation à des événements dont l'objectif est de vulgariser et de communiquer autour de ces bonnes pratiques .

Etablissement et promotion de guides spécifiques aux bonnes pratiques de la logistique verte :

Il est recommandé, dans ce cadre, que les acteurs de la communauté logistique entretiennent des canaux de communication avec les citoyens et la société civile notamment avec les fondations RSE en vue d'instaurer une démarche de concertation constructive autour des efforts d'atténuation de l'impact des activités logistiques sur l'environnement.



En outre, la communauté logistique est appelée à développer des outils et des kits de guides permettant de proposer des démarches et des méthodes pour faciliter l'adoption et la mise en pratique de solutions logistiques durables. Ces guides pourront concerner tous les maillons de la chaîne logistique.

Mobilisation de moyens et développement d'instances de portage

Recherche de moyens financiers :

Les adhérents s'engagent à promouvoir des initiatives répondant aux objectifs de la charte auprès de bailleurs de fonds en faisant prendre conscience que la mise en œuvre de mesures respectueuses de l'environnement a un fort potentiel de retour sur investissement économique et social.

Appui aux initiatives « Green Logistics » des clusters logistiques :

Au cours de ces dernières décennies, les clusters ont suscité un intérêt qui s'est de plus en plus accentué au Maroc notamment dans le secteur de la logistique afin de répondre aux enjeux de mise en place d'une logistique performante, intégrée et durable.

A ce titre, les acteurs de la communauté logistique sont appelés à créer et promouvoir ce type de structure dans le secteur de la logistique. L'objectif étant de stimuler les projets collaboratifs innovants en matière de la logistique verte afin de faire émerger des idées novatrices, aider au montage des projets, les suivre et les soutenir et contribuer à valoriser les résultats.

En effet, les clusters pourraient constituer une plateforme d'échange des expériences en matière de la logistique verte, renforcer le dispositif de veille liée à l'environnement et à la logistique mais également établir des analyses comparatives et benchmarks avec ce qui se pratique dans les pays développés dans ce domaine.

MODALITES DE GOUVERNANCE, PROMOTION ET PERENNISATION



L'AMD L assure le rôle de coordinateur des actions entreprises dans le cadre de la charte de concert avec l'ensemble des adhérents. Un comité directeur chargé du suivi et du portage dans la durée de la mise œuvre de la présente charte sera mis en place.

Le comité directeur comprend les adhérents initiateurs de la charte ainsi que toute entité jugée utile de contribuer à ces travaux.

Le comité directeur se réunit régulièrement et au minimum une fois par an. Ce comité pourrait également se réunir en cas de demande d'un ou plusieurs adhérents notamment pour :

- 🌱 présenter une initiative ou action s'inscrivant dans l'esprit de la présente charte,
- 🌱 proposer un amendement ou une révision jugée pertinente de la présente charte,
- 🌱 débattre d'une question en lien avec les domaines d'actions stipulés dans la présente charte.

A ce titre, les adhérents s'engagent à :

- 🌱 Appuyer les efforts de l'Agence dans le cadre de son rôle de coordinateur ;
- 🌱 Promouvoir la charte à grande échelle ;
- 🌱 Informer l'AMD L des actions entreprises en lien avec la mise en œuvre de la charte en vue de permettre l'établissement d'une évaluation régulière et une valorisation adéquate des efforts fournis par l'ensemble.

Par rapport à ce dernier point, L'AMD L assurera le suivi, la communication et la diffusion des actions entreprises dans le cadre de la présente charte.

Un registre sera établi et tenu par l'AMD L pour l'inscription des adhérents.

En outre, et afin de lui assurer un caractère évolutif, la révision de la présente charte peut être envisagée en tenant compte des évaluations de sa mise en œuvre et pour intégrer de nouvelles dispositions jugées pertinentes par les adhérents.

Une instance dédiée (fondation, cluster spécifique ou autre forme adaptée) qui engloberait tous les adhérents pourrait également être mise en place à moyen terme en vue d'une meilleure pérennisation du portage de la présente charte.



ANNEXE :

Liste des premiers adhérents à la charte marocaine en faveur de la Logistique Verte

Fédérations et Associations professionnelles

- ♻️ Confédération Générale des Entreprises du Maroc (CGEM)
- ♻️ Fédération du Transport de la CGEM (FT)
- ♻️ Fédération Nationale de l'Agroalimentaire (FENAGRI)
- ♻️ Fédération Nationale du Bâtiment et des Travaux Publics (FNBTP)
- ♻️ Fédération des Industries de Transformation et de Valorisation des Produits de la Pêche (FENIP)
- ♻️ Fédération Marocaine du Conseil et de l'Ingénierie (FMCI)
- ♻️ Association des Freight Forwarders du Maroc (AFFM)
- ♻️ Association Marocaine Des Exportateurs (ASMEX)
- ♻️ Association Professionnelle des Agents Maritimes, Consignataires de Navires et Courtiers d'Affrètement du Maroc (APRAM)

Institutionnels et Gestionnaires d'infrastructures

- ♻️ Agence Marocaine de Développement de la Logistique (AMDL)
- ♻️ Agence Nationale des Ports (ANP)
- ♻️ Agence Spéciale Tanger Med (TMSA)
- ♻️ Office National des Aéroports (ONDA)
- ♻️ Office National des Chemins de Fer (ONCF)
- ♻️ Autoroutes du Maroc (ADM)
- ♻️ PORTNET S.A
- ♻️ MEDZ
- ♻️ Casa Transport

Chargeurs & Opérateurs Logistiques

- ♻️ AKSAL Groupe
- ♻️ APM Terminals
- ♻️ Bolloré Africa Logistics
- ♻️ Compagnie de Transport au Maroc (CTM)
- ♻️ Cosumar
- ♻️ Dachser Morocco
- ♻️ DHL Express
- ♻️ ECU WORLDWIDE
- ♻️ Futur Trans Atlantic (FTA)

ANNEXE :

Liste des premiers adhérents à la charte marocaine en faveur de la Logistique Verte



-  HOLMARCOM Groupe
-  Ipsen Logistics
-  Label'Vie
-  LafargeHolcim Maroc
-  La Voie Express
-  Logiphar
-  L'Oréal Maroc
-  Maghreb Solutions
-  Marbar logistics
-  Marjane Group
-  Maroc Express
-  Marsa Maroc
-  Militzer & Münch (M&M)
-  Nord Africa bottling company (NABC)
-  OFRET Groupe
-  Panalpina Morocco
-  Poste Maroc
-  Royal Air Maroc Cargo (RAM Cargo)
-  San José Lopez Maghreb (SJL Maghreb)
-  Service Transport Combine Maroc (STCMA)
-  Société Arabo-Africaine de Distribution, d'Édition et de Presse (SAPRESS)
-  Société Nationale du Transport et de la Logistique (SNTL)
-  T.G.S. Transport International
-  Timar Afrique
-  TNT Express Maroc
-  Transit JalaL
-  Transit Services Transport Logistique (TST Logistique)
-  Transmel Group
-  SMTR CARRE
-  UPS Maroc

ANNEXE :

Liste des premiers adhérents à la charte marocaine en faveur de la Logistique Verte



Acteurs formation, R&D, IT et Consulting

- 🌱 A-sis Middle East Africa
- 🌱 Conseil Ingénierie et développement (CID)
- 🌱 GCL Group
- 🌱 Ecole Supérieure des Industries du Textile et de l'Habillement (ESITH)
- 🌱 Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP)
- 🌱 Ecole Mohammadia d'ingénieurs (EMI)
- 🌱 Eumatech
- 🌱 Institut Supérieur de Transport et de la Logistique (ISTL)
- 🌱 LOGIPOLE
- 🌱 Valyans Consulting

Annexe 3



Deutsche Industrie- und
Handelskammer in Marokko
Chambre Allemande de Commerce
et d'Industrie au Maroc

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BILATÉRAL

Revue économique maroco-allemande



Transport & Logistique

SOMMAIRE :

INTRODUCTION

DACHSER : UNE INTERVIEW AU CŒUR DU SECTEUR DE LA LOGISTIQUE

UN PRESTATAIRE LOGISTIQUE COMPLET ET EXPÉRIMENTÉ AU MAROC

PRÉSENTATION DU GROUPE TANGER MED

PLONGEZ DANS L'UNIVERS DYNAMIQUE DU TRANSPORT ET DE LA LOGISTIQUE AVEC NOTRE ÉDITION SPÉCIALE DU BILATÉRAL. DÉCOUVREZ UNE INTRODUCTION CAPTIVANTE SUR L'IMPORTANCE CRUCIALE DE CE SECTEUR POUR L'ÉCONOMIE MONDIALE, METTANT EN LUMIÈRE SON RÔLE ESSENTIEL DANS LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT MODERNE. NE MANQUEZ PAS NOTRE INTERVIEW EXCLUSIVE AVEC DACHSER, QUI VOUS EMMÈNE AU CŒUR DES DÉFIS ET DES INNOVATIONS DANS LE DOMAINE DE LA LOGISTIQUE, OFFRANT DES PERSPECTIVES UNIQUES SUR LES TENDANCES ET LES STRATÉGIES CLÉS. DE PLUS, PLONGEZ DANS LA PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DU GROUPE TANGER MED, UN HUB LOGISTIQUE MAJEUR EN AFRIQUE, QUI JOUE UN RÔLE CENTRAL DANS LA CONNECTIVITÉ RÉGIONALE ET INTERNATIONALE, FAÇONNANT AINSI L'AVENIR DU COMMERCE ET DE LA LOGISTIQUE. EXPLOREZ CES RÉCITS PASSIONNANTS ET BIEN PLUS ENCORE DANS CE NUMÉRO SPÉCIAL.

INTRO

De Joost Zickler, AHK Maroc

Au carrefour du monde (l'Atlantique à l'ouest, la Méditerranée à l'est, l'Afrique au sud et l'Europe au nord) le Maroc est prédestiné à devenir une plaque tournante du commerce international et un axe majeur du transport et de la logistique. Le royaume dispose d'un énorme potentiel relatif à ces deux segments économiques. Analyse du secteur du transport et de la logistique.

Le transport et la logistique génèrent ensemble plus de 10 % de la performance économique du Maroc et emploient environ 182.000 personnes (2019). Aucun secteur n'est plus étroitement lié à tous les autres secteurs économiques, le transport et la logistique sont nécessaires pour chaque autre secteur et agissent idéalement comme un connecteur pour une économie compétitive et efficace. Le secteur est donc au cœur de l'économie marocaine - d'où l'intérêt que lui porte le gouvernement, qui a reconnu depuis longtemps le potentiel logistique du Maroc et a mis en place une stratégie logistique nationale en 2010. L'objectif déclaré de cette stratégie était d'augmenter l'efficacité de la logistique marocaine de manière à réduire les coûts logistiques totaux de 20 à 15 % du PIB avant 2015. En 2012, un bureau national de la logistique a été spécialement créé, l'Agence Marocaine de Développement de la Logistique (AMDL). Néanmoins, l'objectif n'a clairement pas été atteint et la stratégie a été prolongée jusqu'en 2030. Le coût logistique total s'élève toujours à environ 20 % du PIB.

En comparaison face à la réalité internationale, le Maroc se situe dans la moyenne supérieure en ce qui concerne la performance du secteur logistique. Ainsi, l'Agility Emerging Markets Logistics Index classe le Maroc en 2022 à la 20e place des 50 pays émergents les mieux notés. Sur le continent africain, c'est le Maroc qui obtient les meilleurs résultats.



Toutefois, le pays occupait encore la 17e place l'année précédente et a en outre reculé de la 6e à la 9e place au sein de la région MENA entre 2021 et 2022. Les efforts du gouvernement sont pourtant multiples. La stratégie nationale repose sur cinq piliers : la gouvernance doit être adaptée, le flux de marchandises optimisé. Les petites entreprises seront soutenues dans leur évolution vers des acteurs professionnels et performants. Une politique de formation améliorée et adaptée à des normes uniformes et internationalisées doit permettre de promouvoir le savoir-faire logistique dans le royaume. Enfin, des zones logistiques multi-flux (ZLMF), où différentes plateformes logistiques seront concentrées et harmonisées, seront créées sur 3 300 hectares dans tout le pays, avec un volume d'investissement colossal, en particulier dans la région de Casablanca, le cœur économique du pays.

Ce n'est pas tout ; il existe d'autres programmes tels que l'Attestation de Vocation Non-Agricole (AVNA), qui vise à augmenter la disponibilité de terrains attractifs en termes de prix et de structure à des fins logistiques. Le manque de ces derniers est jusqu'à présent un facteur de ralentissement décisif dans le développement du secteur. Toutes ces mesures visent d'une part à garantir des processus logistiques fluides et efficaces afin de renforcer l'économie nationale, d'augmenter le pouvoir d'achat et de rendre les biens nationaux compétitifs au niveau international.

D'autre part, la logistique marocaine doit être développée de manière à répondre aux normes internationales et à attirer les capitaux étrangers. Dernièrement, le secteur logistique marocain a en effet connu une demande accrue de la part d'entreprises étrangères qui souhaitent délocaliser une partie de leurs activités logistiques au Maroc. La petite partie des parcs logistiques marocains qui répondent déjà aux exigences internationales sont utilisés à pleine capacité.

En ce qui concerne le secteur des transports, le Maroc dispose de l'un des réseaux terrestres, ferroviaires et aériens les plus denses d'Afrique. Cependant, une grande partie du Maroc n'est pas encore bien reliée au réseau de transport. La grande majorité du transport de marchandises et de personnes s'effectue par la route, mais les alternatives deviennent de plus en plus attrayantes, notamment parce que le parc automobile national, dont l'âge moyen des véhicules est de 13 ans, peut difficilement répondre aux exigences technologiques et quantitatives d'un réseau de transport moderne.

Le port de Tanger Med et les 12 autres ports commerciaux internationaux placent le Maroc dans le top 20 des meilleurs pays en matière de connectivité maritime. Tanger Med a été classé sixième port de conteneurs le plus efficace au monde pour l'année 2021.

Les 60.000 km de réseau routier, dont environ 1.800 km d'autoroutes à péage et 1.000 km de voies rapides, sont complétés par un réseau ferroviaire de 2.200 km, dont une bonne moitié est électrifiée et qui comprend une ligne à grande vitesse entre les centres économiques de Casablanca et Tanger. Celle-ci doit être prolongée jusqu'à Agadir via Marrakech d'ici 2035 et un autre tracé doit être construit de Rabat à Oujda via Fès. Le réseau ferroviaire existant doit en outre être modernisé et doté de deux voies. Les 18 aéroports internationaux sont également sur la voie de la modernisation depuis ces dernières années, renouvelant leurs infrastructures et élargissant leurs capacités et leurs zones d'intervention.



Il y a donc beaucoup de choses qui bougent au Maroc. Même si le pays reste pour l'instant bien en deçà de ses possibilités, on peut s'attendre à un fort développement dans les années à venir. Toutefois, la pandémie du coronavirus a également laissé des traces. Le transport et la logistique étant si étroitement liés à l'ensemble de l'activité économique, le secteur a subi un choc important en termes de demande lorsque le pays a été paralysé en raison des mesures sanitaires. Le secteur du transport routier en particulier, dominé par un grand nombre de petites et microentreprises et dont une part importante opère dans le secteur informel, a eu du mal à bénéficier de l'aide publique. De nombreuses entreprises sont tombées en faillite. On peut donc espérer que la crise conduira à un changement de mentalité et que les entreprises rejoindront le secteur formel. La crise pourrait même profiter au Maroc à long terme. Le pays profite ainsi de la tendance de l'Europe à se détourner des longues chaînes d'approvisionnement en provenance d'Asie et à chercher des alternatives plus proches. Le Maroc attire de plus en plus l'attention des acteurs européens. Le secteur a également fait preuve d'une grande robustesse pendant la crise – tous les points de vente ont pu être approvisionnés de manière satisfaisante même pendant les restrictions. Les signes avant-coureurs sont donc bons pour le secteur marocain du transport et de la logistique.

DACHSER : UNE INTERVIEW AU CŒUR DU SECTEUR DE LA LOGISTIQUE

par M'hamed Chraïbi, Country Manager, Dachser Maroc

DACHSER
Intelligent Logistics

Pourriez-vous nous présenter l'entreprise Dachser, ses activités et sa présence à l'échelle globale ?

Dachser, groupe familial allemand, est l'un des principaux prestataires de solutions de transport et logistique sur le plan international. Fort d'une présence de près de 40 ans dans le royaume, Dachser Maroc propose des services de transport national et international aérien, maritime et routier, des services d'entreposage et de dédouanement permettant l'optimisation significative et durable du bilan logistique de nos partenaires à travers d'une Supply chain fluide.

Comment l'entreprise se positionne-t-elle sur le marché concurrentiel du transport et de la logistique ?

Installé au Maroc depuis 1984, Dachser se positionne comme le prestataire de transport et de logistique qui offre au marché des solutions intégrées et personnalisées tout au long de la chaîne logistique. Cela nous permet d'accompagner nos clients internationaux pour leurs approvisionnements et/ou leurs exportations.

Nous faisons parfaitement le lien avec l'Europe, grâce à notre réseau européen et à des départs quotidiens dans les deux sens. Cela permet une grande flexibilité pour nos clients.

Quelle a été l'évolution de la filière transport & logistique à travers les dernières années et selon vous à quel besoin cette évolution répond-elle ?

Le secteur a évolué depuis le déploiement de la stratégie nationale de développement de la compétitivité logistique. A partir de 2019, l'AMDL a redoublé d'efforts afin de concrétiser le développement de plusieurs projets : la détermination des zones logistiques, la sécurisation du foncier, l'accélération de la digitalisation. Par ailleurs, la 13e édition de l'Indice Emerging Markets Logistics 2022 qui classe les pays en fonction de leur compétitivité globale, leurs atouts logistiques, leur contexte commercial et, pour la première fois, leur préparation à la numérisation, démontre que le Maroc est le mieux placé en Afrique devant l'Egypte, l'Afrique du Sud et le Kenya. Il occupe le 9ème rang au niveau de la région MENA.



Le pays continue d'investir dans le secteur. En effet, le budget prévisionnel d'investissement du ministère du Transport et de la Logistique s'élève à 1,279 milliard de dirhams (MMDH) au titre de l'année 2022. D'autant plus que l'impulsion qu'a connu le secteur logistique a également engendré une réelle dynamique d'investissement, contribuant ainsi à améliorer la place du Maroc dans le classement « doing business 2020 ».

Qu'est-ce qui différencie Dachser des autres acteurs du segment logistique ?

Dachser propose des solutions pour l'ensemble de la Supply Chain. Nous combinons la force d'une multinationale avec les valeurs d'une entreprise familiale. En combinant notre réseau intégré de transport international avec une logistique d'entreposage, des prestations personnalisées et des solutions IT parfaitement uniformisées, nous optimisons le bilan logistique de nos partenaires en local et à l'international. Nous proposons un service End To End intégrant l'ensemble des axes de la Supply Chain (Transport international, distribution, entreposage), l'objectif est que nos partenaires se concentrent sur leur cœur de métier.

Quelles ont été les répercussions de la Covid-19 sur vos activités ?

Le secteur de la logistique et du transport a été fortement impacté par la crise sanitaire, celle-ci a engendré une accélération de plusieurs initiatives pour permettre une adaptation rapide, le maintien d'une dynamique positive et l'anticipation des changements. La période Covid et les mesures de confinements ont eu un fort impact sur nos activités. Cette période a été un changement important pour une organisation comme la nôtre avec des impacts économiques et sociaux très forts. Pour autant, nous avons maintenu l'ensemble de nos activités, de notre personnel et surtout préparé nos équipes à changer leurs habitudes.



Parmi les effets de la crise sanitaire, nous comptons aussi la digitalisation des processus logistiques, principalement l'administration des douanes. En effet, il faut saluer les réalisations remarquables dans ce domaine, l'accélération de la digitalisation des procédures douanières nous a permis d'améliorer notre qualité de service. Avant cette digitalisation, un client pouvait être amené à se rendre plusieurs fois pour récupérer ses documents de transport. Cette initiative a permis un gain de temps pour le client et une optimisation de nos processus internes.

UN PRESTATAIRE LOGISTIQUE COMPLET ET EXPÉRIMENTÉ AU MAROC

Meyer G Meyer propose des solutions logistiques intégrées sur place



*Convoyeur de triage de cartons automatique.
Sortieranlage (Sorter) mit Kartons in Deutschland.*



*Un camion électrique avec batterie fixe circule en Allemagne.
E-LKW mit fest integrierter Batterie fährt in Deutschland.*

Osnabrück, 28 juin 2022 – En tant que spécialiste du transport, de l'entreposage et des services intégrés à valeur ajoutée, Meyer & Meyer vous propose des solutions logistiques adaptées à vos besoins individuels. Avec plus de 1400 collaborateurs, l'entreprise familiale compte parmi les principaux experts de la logistique de la mode et est un partenaire de croissance pour l'industrie automobile et des biens de consommation en Europe, en Afrique du Nord et en Asie occidentale. Les clients bénéficient d'une vision globale de leur modèle commercial avec des processus économiques et un traitement fiable. Dans le domaine de la mode, l'entreprise fondée en 1902 s'est établie comme partenaire logistique tout au long de la chaîne de valeur textile. Les prestations vont de la logistique amont à la logistique aval directement à la surface de vente ou client final, en passant par les services douaniers, le stockage, la préparation et l'assurance qualité, ainsi que le fulfillment en ligne piloté par les données, y compris la logistique inverse.

Dans le domaine des biens de consommation Meyer & Meyer gère et relie également les chaînes de valeur à l'aide de technologies informatiques optimisées pour les processus et propose, en collaboration avec des partenaires Tangernaires, des solutions omnicanales intelligentes. Les fournisseurs automobile font confiance à la chaîne d'approvisionnement sûre et économique avec un suivi et une traçabilité continus.

Avec des interlocuteurs fixes et des succursales à Tanger et Casablanca, Meyer & Meyer offre un vaste savoir-faire sur place. Les partenaires commerciaux apprécient les 40 ans d'expérience du marché marocain ainsi que les solutions de transport efficaces avec lesquelles ils assurent les livraisons de manière sûre et économique. En outre, l'entreprise propose des services intégrés d'entreposage et de douane dans la région.

Contact / personne de contact

Semmar Sara
Sales Manager

Phone: +212 539 32 11 80
Mobile Phone: +212 661 107 209
E-Mail: ssemmar@meyermeyer.com
Meyer & Meyer Mediam S.A.R.L.
Zone Industrielle Mghougha
Route de Tétouan Allée 2 Lot N° 58 Tanger MA – 90.000 Tanger

PRÉSENTATION DU GROUPE TANGER MED

Le groupe Tanger Med opère et développe des plateformes portuaires, logistiques et industrielles. Il gère le complexe portuaire Tanger Med, 1^{er} port en Méditerranée et en Afrique. A travers sa participation de référence dans « Marsa Maroc », il est impliqué également dans les opérations de 9 autres ports du Royaume. Le volume total traité par le groupe est de 138 Millions de tonnes de marchandises et 8,1 millions de conteneurs EVP. Le groupe a également aménagé plus de 2000 Ha de zones d'activités économiques qui accueillent plus de 1100 entreprises et près de 95 000 emplois ans les secteurs de l'industrie automobile, l'aéronautique, le textile, l'agro-alimentaire et la logistique

Présence des entreprises allemandes à Tanger Med

Le complexe industrialo-portuaire Tanger Med compte aujourd'hui une vingtaine d'entreprises allemandes qui y ont élu domicile. Ces différentes multinationales opèrent dans différents domaines d'activités. Sur le volet portuaire, les deux leaders mondiaux Eurogate et Hapag lloyd interviennent respectivement dans l'exploitation des terminaux à conteneurs et le transport maritime, contribuant ainsi à relier Tanger Med vers plus de 180 ports dans le monde. Sur le volet logistique, des opérateurs logisticiens et distributeurs de renommée internationale comme DHL, Dachser et DB Schenker se sont installés dans la zone logistique de Tanger Med et accompagnent les industriels en offrant des prestations complètes de logistique à valeur ajoutée, de groupage et de redistribution. Sur le volet industriel, des entreprises allemandes sont implantées dans les zones d'activités de Tanger Med, représentant différents secteurs tels que l'énergie (SIEMENS GAMESA), l'automobile (KNAUF, CONTITECH, PRETTL, KOSTAL et STAHLSCHMIDT) ou l'électronique (ABL SURSUM), réalisant des investissements totalisant 230 M Euros et créant plus de 7 800 postes d'emplois.

Tanger Med : Un hub logistique mondial

Le complexe portuaire Tanger Med possède une localisation stratégique. Il est situé sur le Détroit de Gibraltar, 2^{ème} point de passage du commerce mondial à la croisée des routes maritimes majeures Est/Ouest et Nord/Sud. Plus de 100 000 bateaux par an et 200 bateaux cargo passent



à travers le Détroit de Gibraltar par jour sur les services maritimes des plus grands armateurs mondiaux qui relient l'Asie, l'Europe, les Amériques et l'Afrique. Tanger Med est un hub naturel de transbordement pour les flux logistiques mondiaux. Il est ouvert au commerce mondial et est connecté à plus de 180 ports mondiaux et 77 pays. Il offre des capacités de traitement pour 9 millions de conteneurs, transit de 7 millions de passagers et 700 000 camions TIR, et l'export de 1 million de véhicules. Tanger Med est un pont maritime reliant l'Europe à l'Afrique, distant de 14 km ; grâce au port dédié pour les flux rouliers et l'import/export. Plus qu'un port, Tanger Med est une plateforme intégrée, connectée à un réseau de transport multimodal (liaisons ferroviaires, autoroutes, et voie express) pour le traitement des flux conteneurisés, rouliers, ferroviaires pour le transport des marchandises et des personnes.

Tanger Med : Une plateforme industrielle de compétitivité

La plateforme industrielle Tanger Med regroupe 6 zones d'activités industrielles et logistiques sur une surface développée de 2000 HA. Filiale du Groupe Tanger Med, « Tanger Med Zones » est l'aménageur-développeur et opérateur des zones d'activités.

La plateforme industrielle Tanger Med s'est développée ces dernières années autour de filières industrielles bien ancrées, notamment dans les secteurs de l'automobile, l'aéronautique, le textile, l'agro-alimentaire et la logistique.

Les multinationales choisissent la plateforme industrielle grâce à ses qualités infrastructurelles aux standards internationaux, ses atouts compétitifs, et sa proximité aux marchés cibles, permettant ainsi de renforcer leur compétitivité et d'exporter vers les marchés mondiaux.

L'année 2021 a été marquée par l'installation de 28 nouveaux projets industriels sur l'ensemble des zones d'activités de Tanger Med, de 8 nouvelles extensions industrielles, et de 8 nouveaux opérateurs dans la zone logistique portuaire. Le volume d'affaires généré par l'ensemble des zones d'activités de Tanger Med est de 8600 MEUR provenant de 14 pays dont la Belgique, Espagne, UK, France, USA, Allemagne, Italie, Irlande, Chine, Portugal, Japon etc.

L'industrie automobile à Tanger Med : un secteur en pleine croissance

Avec la présence d'un écosystème de près de 110 industriels de rang 1, 2 et 3 dédiés à l'industrie automobile, « Tanger Med Zones » est devenue la première plateforme automobile au monde (classement FT).

Aujourd'hui, la plateforme industrielle compte des leaders mondiaux dans le secteur de l'automobile, venus de l'Europe, d'Amérique, d'Asie. 11 des 20 plus importantes entreprises du secteur automobile au monde opèrent à Tanger Med dans l'industrie du câblage, métal, emboutissage, intérieur véhicule et siège, et injection plastiques. Ces industriels servent les équipementiers automobiles installés au Maroc notamment les constructeurs Renault et PSA-Stellantis mais également ceux basés en Europe (PSA Vigo, Ford, Renault, Volkswagen, etc.)

La logistique des pièces automobiles à Tanger Med : au service de l'industrie automobile

Pour accompagner les besoins de cette industrie automobile, des Magasins Avancés Fournisseurs se sont développés dans les zones d'activités de Tanger Med. Ces zones de stockage sont opérées par des logisticiens de renommée mondiale tels que DHL, Ceva Logistics, Gefco, Nippon Express etc, qui font de la logistique à valeur ajoutée, et redistribuent vers l'Afrique, l'Europe et l'Amérique. A ce jour, Tanger Med a développé près de 200 000 m² de surface logistique, dédiée à la logistique des pièces automobiles. Pres de 30 équipementiers automobiles basés à Tanger Med, s'approvisionnent de ces Magasins Avancés Fournisseurs, pour optimiser leurs opérations logistiques au service de l'industrie automobile, tels que Valéo, Yazaki, SUMITOMI, GMD et bien d'autres. Près de 9 du Top

25 mondial des 3PL sont installés dans les zones d'activités de Tanger Med.

Un accompagnement adapté aux besoins des investisseurs

« Tanger Med Zones » assure une proposition de valeur en lien avec les attentes des acteurs mondiaux, notamment un positionnement stratégique à l'intersection des flux maritime majeurs et à proximité des marchés cibles, un ensemble intégré composé d'une offre infrastructurelle de premier plan et d'une réserve foncière importante, une gestion intégrée des différentes zones d'activités par un opérateur unique et finalement un tissu industriel solidement implanté. Ainsi, « Tanger Med Zones », l'aménageur-développeur et opérateur de la plateforme industrielle de Tanger Med, offre des services 360° et intégrés à ses clients (avant, pendant et après l'investissement). « Tanger Med Zones » met également en relation les différents industriels pour développer leurs activités commerciales. Elle met à leur disposition une équipe de responsable business développement multilingue et des équipes technico-commerciale qui accompagnent étroitement l'opérateur avant, pendant et après son installation.

Annexe 4

FLUX MASSIFIES POUR UNE LOGISTIQUE DURABLE

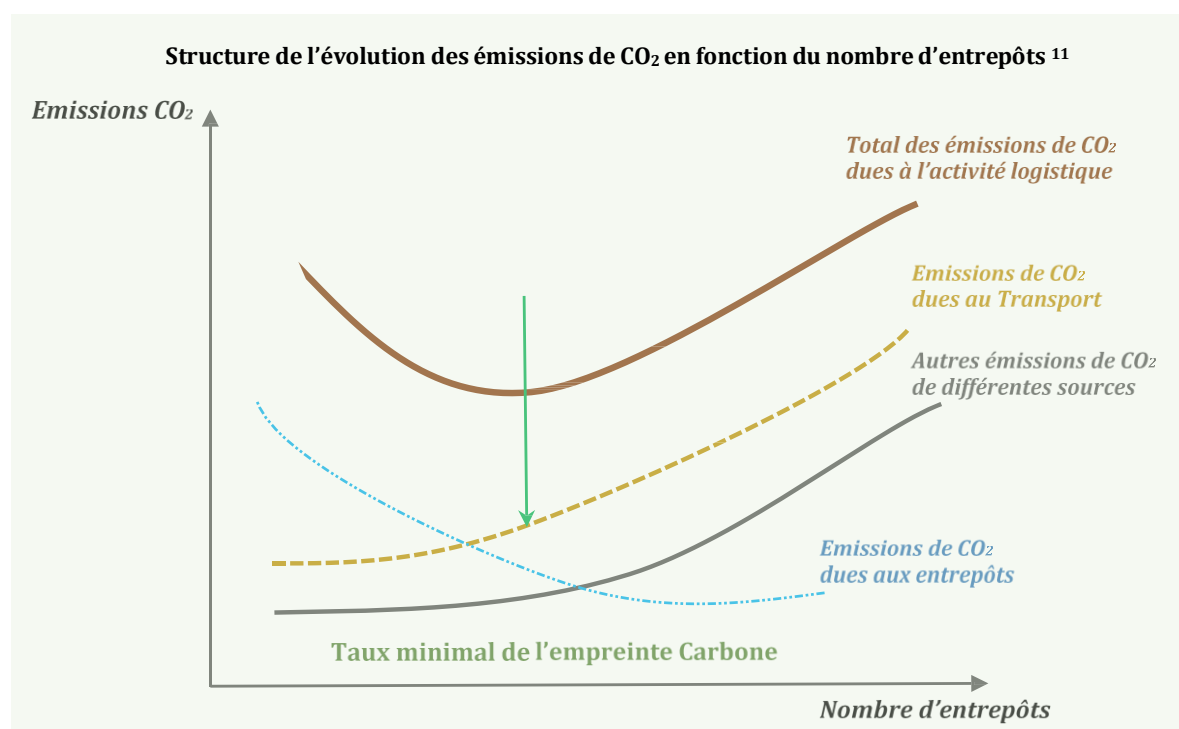


Zones logistiques pour réorganiser les flux

La logistique moderne tend à massifier les flux liés aux mouvements de marchandises notamment à travers le développement de plateformes et de zones d'activités logistiques.

En effet, une gestion mutualisée des flux dans une plateforme logistique, permet d'optimiser le nombre de kilomètres à parcourir pour les livraisons et de rationaliser l'utilisation des moyens de transport et donc de réaliser un gain en terme des émissions de CO₂.

La détermination de la taille et la localisation du réseau des plateformes conditionne fortement son efficacité en particulier eu égard à l'empreinte carbone des opérations et activités logistiques qui utiliseraient comme base ces différentes plateformes.

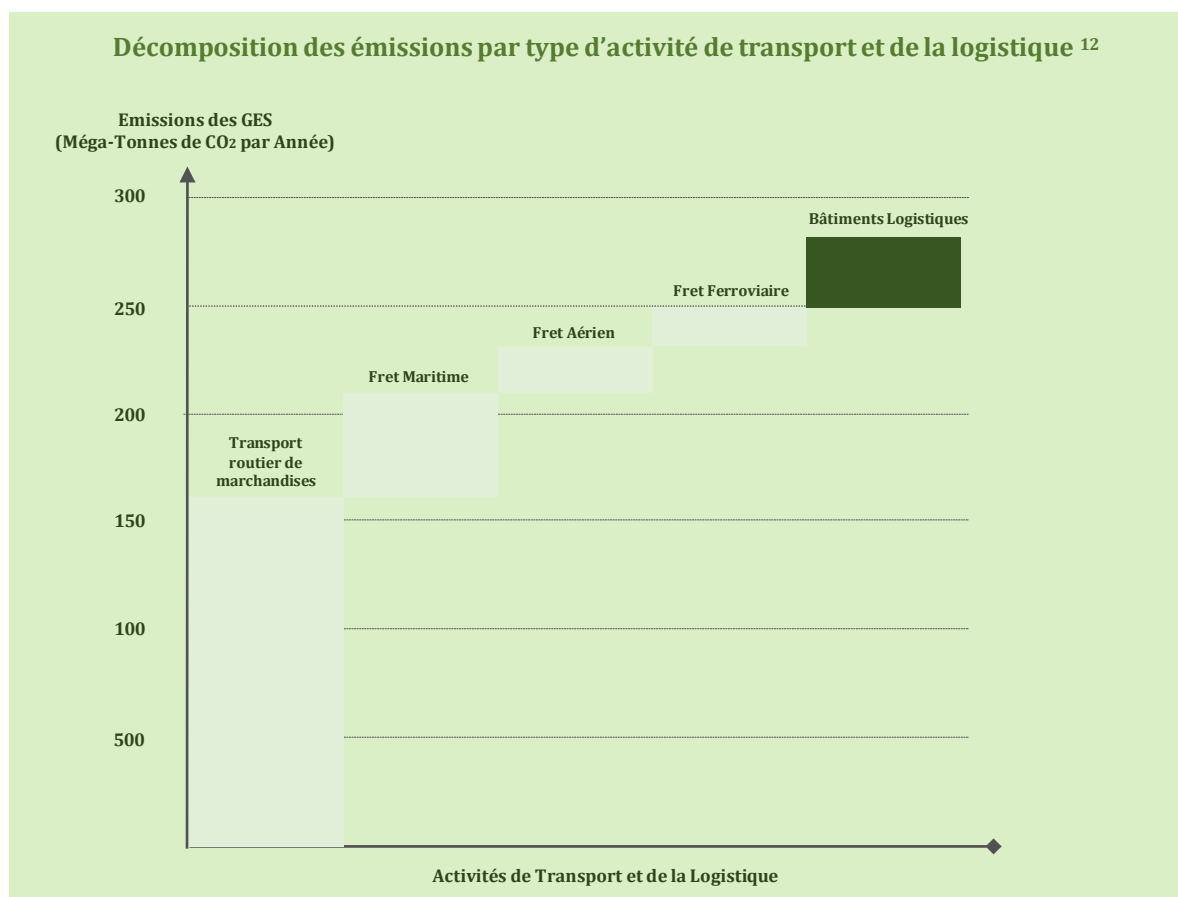


Selon une étude assez récente du World Economic Forum portant sur la décarbonisation de la supply-chain logistique, il a été annoncé que près de 2.800 méga-tonnes de CO₂ sont générées par le secteur de la logistique et du transport, soit 5,5% du total par rapport à l'ensemble des activités humaines dans notre planète.

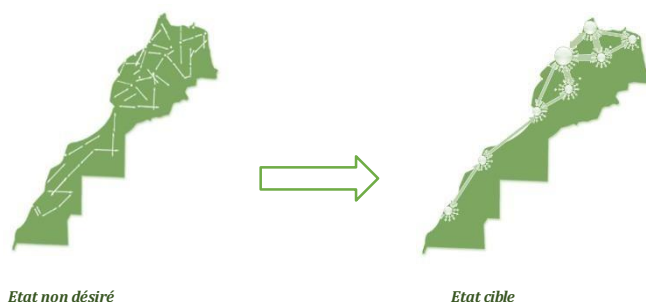
L'immobilier et les bâtiments logistiques affichent, dans ces secteurs, une part d'environ 11%.

¹¹ Source : professeur Alan Mckinnon, Logistics Research Centre, Heriot-Watt University, EDINBURGH, UK





Au Maroc, la stratégie nationale logistique a comme épine dorsale la mise en place d'un réseau de plateformes logistiques pour le groupage et le dégroupage de marchandises. Véritables centres logistiques multi-services à proximité des bassins de production et de consommation et des réseaux de transport, ces plateformes logistiques serviront de zones pour la canalisation et la concentration des flux de marchandises.



Source : Stratégie nationale de développement de la compétitivité logistique

¹² Source : http://www3.weforum.org/docs/WEF_LT_SupplyChainDecarbonization_Report_2009.pdf



Schéma national des zones logistiques

Le positionnement des zones logistiques dans les schémas logistiques a été déterminé en se basant sur des critères de localisation et de connectivité :

- La connexion autoroutière afin de faciliter l'accès aux poids lourds en provenance et à destination de ces zones ;
- La connexion ferroviaire revêt une importance particulière pour les plateformes de conteneurs, de céréales et de matériaux de construction ;
- La proximité et la facilité d'accès vers le centre-ville sont des critères à prendre en considération pour les plateformes de distribution, d'agro-commercialisation et de matériaux de construction afin qu'elles puissent desservir dans les meilleures conditions leurs bassins de consommation.

Plusieurs initiatives publiques et privées ont permis de développer une multitude de plateformes au niveau national. En effet, le Maroc qui ne comptait en 2010 que quelques dizaines d'hectares aménagés de plateformes logistiques modernes totalise aujourd'hui près de 600 ha aménagés à Casablanca, Tanger et dans plusieurs régions accueillant les plateformes industrielles intégrées.

Plusieurs zones logistiques ont ainsi vu le jour dans les différentes régions du Royaume :

- Casablanca : plusieurs zones développées par des opérateurs publics (Zenata/SNTL, Mita/ONCF) et privés ;
- Tanger : plusieurs zones sont opérationnelles autour de Tanger Med (Med Hub, Tétouan Park, Tanger Automotive City et au sein de TFZ) ainsi que des investissements privés ;
- Autres régions : une superficie globale de près de 200 ha est déjà aménagée pour les activités logistiques au sein des différentes PZI développées à Agadir, Kenitra, Meknès, Oujda.



Tétouan Park



Plateforme logistique à TFZ



Entrepôt frigorifique à Med



Zone logistique de Zenata



Soft Logistic à Ain Sebaa



Zone logistique à Med Hub

En outre, des projets de schémas régionaux de zones logistiques ont été élaborés prenant en compte le contexte économique de chaque région et des critères de localisation liés notamment à la proximité des pôles générateurs de flux, à la connectivité aux différents réseaux d'infrastructures et à la topographie des terrains. Dans ce cadre, 2.750 ha d'assiettes foncières sur les 3.300 ha prévus par le schéma national à horizon 2030 (soit environ 83%) ont été identifiés en concertation avec les acteurs locaux des différentes régions.

En accompagnement de cette planification régionale, la structuration des premiers projets de zones logistiques est bien avancée dans plusieurs régions du Royaume pour développer une offre diversifiée d'immobilier logistique.

Par ailleurs, et pour minimiser les effets des installations et plateformes logistiques planifiées, une attention particulière sera accordée, lors de leur conception, construction et exploitation, à l'adoption des meilleurs standards et normes environnementaux.

La préoccupation principale démarre dès la construction du bâtiment, où l'effort porte surtout sur l'économie d'énergie en renforçant l'isolation des bâtiments et en faisant appel aux énergies renouvelables (chauffage solaire de l'eau sanitaire, des matériaux recyclables, un éclairage à haut rendement,...).

Des approches du type bilan carbone permettent d'évaluer en partie l'impact environnemental d'un bâtiment logistique existant ou en projet. Des aspects, comme les déplacements de personnels, l'énergie, les déchets peuvent être pris en compte dans un bilan de ce type.

Pour la rénovation des bâtiments existants, d'autres bonnes pratiques se développent, par exemple, la récupération des eaux de pluie, l'éclairage naturel de l'entrepôt, l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits des entrepôts...

La Société Nationale du Transport et de la Logistique (SNTL) a d'ailleurs fait appel à cette bonne pratique en entreprenant un projet portant sur l'acquisition et l'installation de panneaux solaires photovoltaïques de 1,5 MW sur les entrepôts frigorifiques de la plateforme logistique Zenata.

Ce projet bénéficie de l'appui du Global Environmental Facility (GEF) et du Programme de Développement des Nations Unies (PNUD) et ce dans le cadre d'un projet plus global détaillé plus en avant dans ce rapport, consistant en l'intégration du changement climatique dans la stratégie nationale de développement de la compétitivité logistique.

Alternatives modales pour massifier durablement les flux

Dans le cadre de l'optimisation et rationalisation d'un certain nombre de supply chains notamment celles afférentes aux flux des hydrocarbures, de céréales et de conteneurs, la stratégie marocaine de développement de la compétitivité logistique a préconisé l'utilisation des modes de transport de masse pour la gestion des flux de marchandises tels que le transport ferroviaire et par pipeline qui sont des leviers importants de réduction des GES.

Le transport ferroviaire et le report modal

Du secteur des transports des marchandises, le fret ferroviaire reste un mode de transport écologique jouissant d'atouts indéniables pour la collectivité de par son caractère de transporteur de masse, son faible coût, sa sécurité et sa sûreté, son économie d'espace et d'énergie et son respect de l'environnement (il émet seulement entre 2% et 4% de carbone du secteur des transports).



Par ailleurs, le transport ferroviaire est une composante essentielle du report modal qui présente des avantages environnementaux, économiques, et sociaux pour les chaînes logistiques :

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- Réduction des nuisances dans les zones écologiques sensibles ;
- Réduction de la consommation d'énergies non renouvelables ;
- Economie sur les coûts de carburant ;
- Désengorgement des routes (produit dangereux).

De ce fait, la stratégie nationale logistique accorde une grande importance au développement et au renforcement de l'utilisation de transport ferroviaire à travers une panoplie de projets :

- Le développement des connexions ferroviaires entre les terminaux portuaires, les ports secs (Mita, Zenata) et les différentes plateformes logistiques ;
- Le développement de l'offre de transport ferroviaire adaptée à des flux massifs (ex. céréales, hydrocarbures, matériaux de construction, etc.) en ligne avec le schéma national des plateformes logistiques ;
- La promotion des solutions de transport multimodal regroupant le transport ferroviaire et routier notamment pour le transport massifié des matériaux de construction et céréales.

En plus du transport des flux de matières premières, des produits de première transformation et des flux massifs (phosphates, charbon, céréales, engrais, barytine, zinc, produits pétroliers, pâtes, ciments, clinker, bois, gravettes, sucre, conserves, conteneurs, acier, fer, ...), L'Office National des Chemins de Fer a développé ces dernières années de nouvelles prestations pour accompagner le développement des nouveaux investissements que connaît le Royaume notamment dans le secteur automobile.

A cet égard, l'ONCF assure déjà le transport des voitures entre les usines de Renault et le port de Tanger Med et il a signé un contrat de prestation ferroviaire relatif à l'implantation d'un complexe industriel de PSA Peugeot-Citroën au Maroc.



Par ailleurs, et afin de renforcer le recours à l'utilisation du transport ferroviaire et minimiser au maximum l'empreinte carbone, l'ONCF veille au développement et à la modernisation de son réseau ferroviaire en mettant en œuvre un écosystème logistique performant à travers :

- La prolongation de voies ferrées à l'intérieur des installations usines des clients ;
- La garantie du transport combiné « rail-route » pour desservir ses clients implantés dans des zones non alimentées par les rails ;
- Le développement des aires de stockage dédiées pour les opérations de chargement, de déchargement et de stockage des conteneurs facilitant le repérage des conteneurs sur site par système informatique ;
- Le transport des conteneurs sous douane ou hors douane par rail entre le terminal à conteneurs multimodal d'Ain Sbâa et les ports de Casablanca et de Tanger Med dans les meilleures conditions de sécurité et dans les plus brefs délais ;

- La mise en place des bureaux de douane dans l'enceinte du terminal à conteneurs multimodal pour effectuer les opérations de dédouanement à l'Import ou à l'Export en toute facilité.

Le transport par pipelines

Les émissions de CO₂ émises par le secteur des transports peuvent considérablement diminuer grâce à l'utilisation des moyens de transport massifiés dont notamment le transport par pipeline¹³.

Les produits généralement visés par le transport par pipelines sont le pétrole et autres hydrocarbures liquides, le gaz naturel et autres gaz combustibles, ainsi certains produits chimiques. Par exemple, dans le cas d'importation des hydrocarbures par voie maritime, les produits pétroliers sont d'abord stockés au départ du pipeline dans un terminal de stockage situé à proximité du port avant d'être acheminés aux dépôts de stockage à proximité des stations et des points de vente. Le débit est assuré par une station de pompage située au départ du pipeline, complétée si nécessaire par des stations de pompage intermédiaires pour compenser les pertes de charge et faire face aux éventuelles dénivellations.

Le transport par pipelines présente de multiples avantages concourant à la protection de l'environnement :

- Un mode de transport massifié permettant d'éviter l'acheminement terrestre d'un volume important de carburants ou d'autres matières comme le phosphate ;
- Un mode de transport écologique n'émettant pas des externalités négatives sur l'environnement ;
- Un mode de transport sécurisé, insensible aux intempéries et aux conditions climatiques et atmosphériques ;
- Un mode de transport économique sur les moyennes et longues distances ;



Le Maroc dispose d'une capacité totale de stockage avoisinant les 1,8 millions de m³ pour le stockage des hydrocarbures, concentrée à 65% au nord du Maroc entre Tanger, Mohammedia et Casablanca (hors les capacités de stockage de la Samir). Cette

¹³ Un pipeline est constitué d'un ensemble de canalisations souvent enterrées dans le sol à une faible profondeur, et de stations de pompes pour faire circuler des produits liquides ou gazeux. Le pipeline est un mode de transport non pollueur contribuant à la réduction de l'empreinte environnementale.

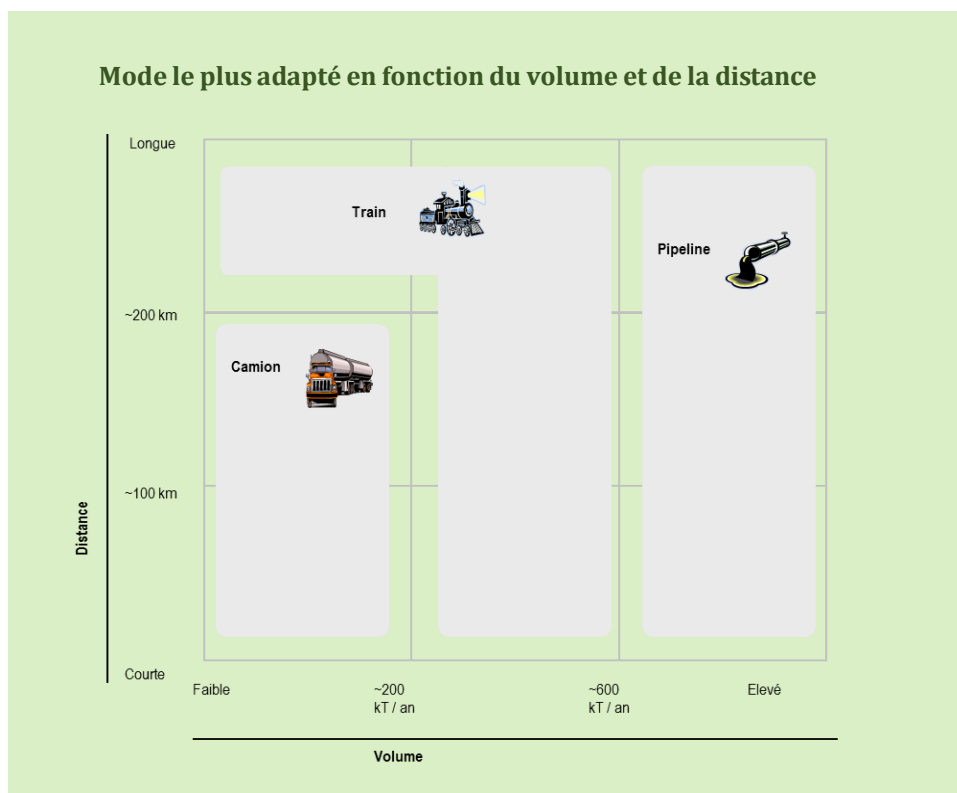


configuration ne permet pas d'assurer une distribution primaire optimale des flux du fait que les capacités de stockage sont concentrées sur le littoral provoquant une démassification précoce des flux et une couverture non équilibrée de l'ensemble des bassins de consommation, notamment les régions non côtières.

Sur l'amont de la chaîne, la distribution primaire de produits raffinés est effectuée par cabotage et pipeline au vu de l'installation de la quasi-totalité des capacités de stockage sur le littoral. Sur l'aval de la chaîne, la distribution secondaire des produits raffinés est dominée par le transport routier qui traite la quasi-totalité des flux entre les installations de stockage et les 2.400 stations-service du pays.

Le premier pipeline mis en place au Maroc concerne celui de Sidi Kacem, un réseau connecté directement au port et au complexe pétrochimique de Mohammedia. Ce mode de transport devrait se renforcer dans le futur pour relier les ports pétroliers du Royaume avec les régions non côtières du Royaume afin de bénéficier des avantages du pipeline sur les plans économiques et environnementales et réduire les émissions de gaz à effet de serre générées par le transport routier.

Afin d'accompagner la croissance de la consommation et de sécuriser l'approvisionnement de l'ensemble du territoire, près de 2,3 millions de m³ de capacités de stockage devraient être installées à horizon 2020, notamment au niveau des régions intérieures comme Fès, Meknès et Marrakech. Ces nouvelles unités de stockage, au vu des volumes traités et des distances à parcourir, pourraient justifier d'un raccordement par pipeline.



Face aux enjeux de libéralisation du marché et conformément à la loi sur la liberté des prix et de la concurrence, les opérateurs pétroliers fixent désormais leur propre marge sur les prix à la pompe. Ce nouveau contexte impose donc aux entreprises distributrices

des produits pétroliers au Maroc d'investir dans des capacités de stockage à Tanger Med, Jorf Lasfar et également dans les régions intérieures.

L'objectif étant de réaliser des économies tant sur les achats à l'international en massifiant les flux dans les points d'entrées que sur le transport massifié en développant des pipelines reliant les terminaux pétroliers à proximité des ports jusqu'aux dépôts de stockage à proximité des bassins de consommation.

Le déploiement d'un réseau primaire compétitif de pipelines comme solution de massification et de développement durable des flux d'hydrocarbures permettrait de réduire fortement l'empreinte environnementale.

Un des grands projets innovant au Maroc en matière d'utilisation de pipeline, concerne le Slurry Pipeline de l'OCP (Office Chérifien des Phosphates), une prouesse technologique construite entre le bassin minier de Khouribga et la plateforme industrielle de Jorf Lasfar sur 187 km pour acheminer la pulpe de phosphate. Il s'agit du système le plus performant au monde selon les experts qui ont participé au 3^{ème} symposium international de l'innovation et technologie de l'industrie de phosphate (Symphos).



Slurry Pipeline de l'OCP

Cette infrastructure, dotée d'une capacité de 38 millions de tonnes par an, révolutionne le transport des phosphates au Maroc. Le Slurry Pipeline de l'OCP permettra **à terme une réduction des coûts logistiques de 90 % et des émissions CO2 de 30% avec un volume de 930 000 tonnes de réduction des émissions CO2, ainsi qu'une économie d'eau estimée à 3 millions de m3 par an.**

Moins coûteux, plus écologique et davantage respectueux de la nature, ce mode de transport améliore considérablement la compétitivité volume/coût de production et réduit efficacement l'empreinte écologique. A la pointe de la technologie minière, le Slurry Pipeline confère au Groupe OCP une plus grande flexibilité vis-à-vis des marchés internationaux et confirme son leadership mondial et son engagement pour une agriculture durable.

Solutions logistiques pour une supply chain import/export durable

Les échanges internationaux constituent un véhicule de développement économique. Leur croissance entraîne un recours accru aux services logistiques et de transport exigeant une demande énergétique importante et par conséquent, des émissions de CO₂ et des gaz à effet de serre.

L'organisation des mouvements de marchandises à l'international pourrait constituer un levier important pour la réduction de l'empreinte carbone de la chaîne logistique import/export.



Dans ce cadre, la stratégie logistique marocaine a accordé une attention particulière à l'optimisation des flux import-export à travers une batterie de mesures :

- ✦ **L'agrégation et la massification des flux logistiques import/export**, à travers la création des structures agrégatives (consortiums d'exportation, JV, GIE, ...) permettant le groupage de marchandises entre les acteurs et la mutualisation des ressources pour l'organisation d'opérations logistiques d'exportation/importation. Cette agrégation permet une consolidation des stocks sur un même lieu, une amélioration du taux d'occupation des plateformes et une réduction du gaspillage d'énergie (eau, électricité, carburant, ...).

Ces acteurs bénéficient d'installations développées ces dernières années au sein/à proximité des ports et aéroports pour opérer cette agrégation. Les exemples phares de ces installations sont les plateformes Med hub ou encore la zone dédiée exclusivement à l'export au port de Tanger Med, port certifié ISO 14001 du système de management environnemental et le premier port africain qui a obtenu le label « EcoPort », délivré par l'Organisation Européenne des ports maritimes, en adoptant un programme approprié visant à :

- Prévenir la pollution de l'air, la terre et l'eau ;
- Améliorer la valorisation des déchets ;
- Optimiser l'utilisation des ressources naturelles.

D'autres installations respectant l'environnement sont prévues dans le cadre du projet de port Nador West Med.

PORT TANGER MED - UNE DEMARCHE ENGAGEE ET VOLONTARISTE POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE¹⁴

Engagements

Le port Tanger Med est engagé dans une démarche volontariste en faveur du développement durable en adoptant une approche écologiquement responsable pour la préservation et la protection de l'environnement. La démarche ainsi mise en place a pour but de :

- Maîtriser les impacts environnementaux, en particulier ceux considérés comme significatifs ;
- Optimiser et réduire la consommation des ressources naturelles tout en encourageant l'utilisation des énergies provenant de sources propres et renouvelables ;
- Respecter les obligations de conformité environnementale y compris celles légales et réglementaires applicables et veiller à leur respect par les clients et partenaires ;
- Développer les projets écologiques sur l'ensemble de son périmètre.



Certifications

La démarche de responsabilité environnementale et sociétale constitue la clé du développement durable à long terme. Cette démarche a permis au port Tanger Med d'être :

- Certifié ISO 14 001 pour l'activité « Accueil des navires et services associés » ;
- Premier port africain à avoir obtenu le label « ECOPORT » et la certification « PERS » ;
- Inscrit dans une démarche de Responsabilité Sociétale des Entreprises permettant d'améliorer en continu ses pratiques RSE.

Préservation de La biodiversité

Le port Tanger Med développe chaque projet dans le respect de la biodiversité locale, avec l'objectif de maintenir l'équilibre écologique des territoires :

- Préservation et protection de l'environnement ;
- Aménagement des espaces verts, plantations et reboisements ;
- Développement de l'éco-tourisme dans la région de la zone portuaire ;
- Programme plage propre Dalia et obtention du label « Pavillon bleu ».

Efficacité énergétique

Démarche qui porte sur des projets d'innovation visant à rationaliser la consommation énergétique et des ressources naturelles ; en favorisant la production et l'utilisation des énergies renouvelables, en optimisant ses propres consommations d'énergie, d'eau et de matières premières pour l'ensemble des activités, et en incitant ses clients à faire de même :

- Favorisation de l'utilisation des équipements lumineux limitant les dépenses énergétiques (Généralisation de l'éclairage LED sur tout le complexe portuaire, installation de capteurs intelligents d'éclairage...) ;
- Production à partir des énergies renouvelables, l'équivalent de la consommation électrique dédiée à l'éclairage par l'installation de panneaux solaires PV ;
- Architecture innovante des bâtiments qui permet un éclairage naturel et une isolation thermique ;
- Maîtrise et suivi annuel des consommations énergétiques.

Gestion éco-responsable

Le port Tanger Med développe, propose et applique des méthodes visant à favoriser la gestion et la valorisation des déchets résultant de ses activités propres ou de celles de ses clients, en cohérence avec la faisabilité technique et économique de ses opérations :

- Gestion et revalorisation des tris ;
- Incitation des clients à limiter leurs consommations, à gérer les déchets et à favoriser le tri et la revalorisation ;
- Réduction des émissions CO2 ;
- Réalisation d'un bilan carbone ;
- Gestion et traitement des eaux (STEP, Station Marpol...).

Prévention et sensibilisation

- Formation et sensibilisation en continu des collaborateurs ;
- Organisation et participation aux événements liés à l'environnement ;
- Implication des prestataires et partenaires dans la démarche environnementale ;
- Réalisation d'audit énergétique.

¹⁴ Source : Agence Spéciale Tanger Méditerranée

POLITIQUE DE L'ANP EN MATIERE DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE DES PORTS¹⁵

Situés à l'interface de routes maritimes et de réseaux de transports multimodaux, les ports marocains sont au cœur de la chaîne logistique d'approvisionnement de notre pays. Ils ont aussi vocation à accueillir diverses activités essentielles dans le secteur logistique ou contribuant au développement économique, dans différents secteurs, industriels, énergétiques, etc.

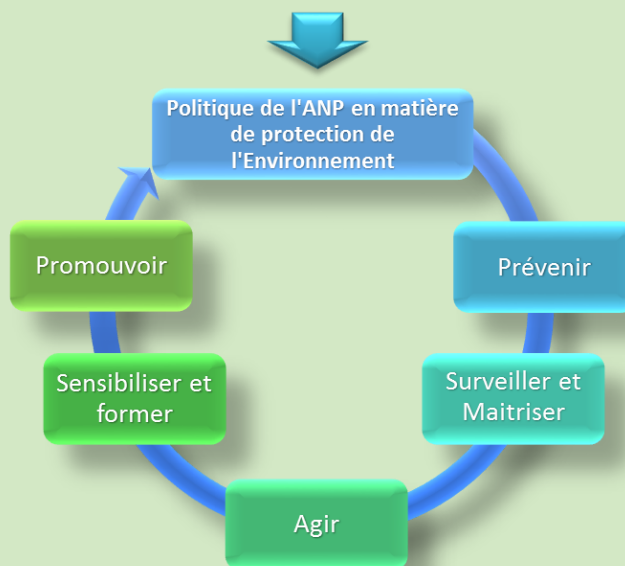
A ce titre ils doivent concilier ambition logistique, industrielle et aménagement, dans un souci d'excellence environnementale.



Les ports marocains ne cessent d'innover pour mettre en place des solutions logistiques durables. Pour cela, les ports ont vocation à se positionner comme des acteurs piliers permettant une forte valeur ajoutée dans la mise en place de chaînes logistiques intégrées, respectueuses de l'environnement, économiquement compétitives et pérennes, afin d'attirer et fidéliser les opérateurs et les clients.

Les plates-formes portuaires sont, de par leur position géographique, de véritables pierres angulaires du développement industriel du pays. Pour cela, l'ANP a mis en place une stratégie visant la maîtrise de la gestion des espaces et de leurs capacités d'accueil, tout en veillant à la préservation de leur domaine naturel.

Pour mettre en œuvre cette ambition, l'ANP s'inscrit dans une politique environnementale globale et cohérente qui permettra à ses ports d'adopter une démarche RSE, de développement durable conciliant les exigences de développement économique, les besoins sociaux et les impératifs de protection de l'environnement.



¹⁵ Source : Agence Nationale des Ports

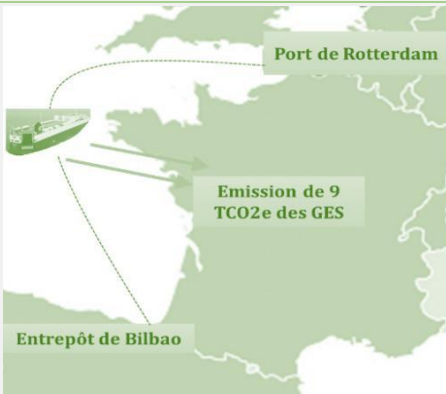
- Le développement des « autoroutes de l'export ». Couloirs intermodaux entre le Maroc et ses partenaires commerciaux, ces « autoroutes » seraient instaurées en adoptant et en mettant en place un ensemble de mesures d'optimisation, de fiabilisation et de régularité des flux d'une chaîne logistique import-export spécifique de bout en bout depuis le producteur jusqu'au client dans le pays destinataire.

En plus des gains économiques censés être générés par ce concept en termes de réduction des délais et coûts logistiques et d'amélioration de la qualité des services et opérations aux frontières, il contribuerait aussi à la réduction des impacts sur l'environnement.

Ces impacts positifs sont amplifiés dans la mesure où ces autoroutes de l'export, inspirées du concept des « autoroutes de la mer »¹⁶, tendent à dévier au maximum les flux du mode routier au mode maritime.

En effet, selon une récente étude¹⁷, pour le transport de 1 tonne métrique de marchandises sur 1 km, le mode ferroviaire et le mode routier émettraient respectivement 22% et 450% de GES de plus que le mode maritime.

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) en France a publié en 2015 des fiches montrant l'impact des autoroutes de la mer sur la réduction des émissions des gaz à effet de serre (voir tableau ci-dessous).

Objectif :	Quantifier l'impact de l'usage d'une modalité de transport alternatif au transport routier pendant 9 mois.	
Contexte :	Transporter des marchandises d'une usine du Nord Pas de Calais vers un dépôt proche de Bilbao (plate-forme logistique, qui alimentera ensuite les différents points de vente en Espagne).	
Scénario 1 : Expédition des marchandises par camion à destination de Bilbao		Scénario 2 : Expédition des camions chargés sur un bateau (Ro-Ro ou Ro-Pax) au port de Rotterdam, à destination de Bilbao
		
Résultats : Emission totale de 35 tonnes CO ₂ des GES pour le fret routier des marchandises		Résultats : Emission totale de 9 tonnes CO ₂ des GES pour le fret maritime des marchandises
Impact GES net : le fret maritime permet de réduire l'émission des gaz à effet de serre par 26 tonnes CO ₂ . Soit une réduction de 74% des émissions de GES.		

¹⁶ Une autoroute de la mer est un principe de la Politique commune des transports de l'Union européenne mettant en avant l'importance du transport maritime qui se distinguent du cabotage ou des liaisons maritimes classiques par la recherche de la performance d'un bout à l'autre de la chaîne de transport en offrant la possibilité d'un important report modal. IL s'agit de proposer, entre deux ports, un service fréquent, régulier et cadencé (horaires fixes), à la fois rapide et fiable pour un prix attractif par rapport à son équivalent sur route. – Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer en France-

¹⁷ Environmental and Social Impacts of Marine Transport in the Great Lakes-St. Lawrence Seaway System- january 2013

- La dématérialisation des procédures et le développement des solutions informatisées pour les opérations de transit aux frontières qui ont pour objectifs notamment la réduction de l'utilisation des supports papiers et la fluidification et l'amélioration de la traçabilité des mouvements de marchandises dans les ports et aéroports marocains.

Dans ce cadre, la communauté portuaire du Maroc a mis en place le guichet unique Portnet dans l'objectif de la dématérialisation et la fluidification des procédures du commerce extérieur grâce à l'anticipation de l'information et de l'action ainsi à la mise en réseau des partenaires. Cette solution contribue à la planification et l'optimisation du contrôle et des inspections et par conséquent, la décongestion des ports et la réduction des temps d'attentes et des délais du passage portuaire.

Gains écologiques de la dématérialisation des procédures du commerce extérieur à travers le Guichet Unique PORTNET¹⁸

La mise en place du guichet unique électronique Portnet a permis la simplification et la dématérialisation des documents d'un nombre important de procédures de commerce extérieur au Maroc. Cette dématérialisation, synonyme de réduction des flux papier, permet non seulement de rationaliser les ressources naturelles telles que le bois mais apporte d'importants gains dans la chaîne de valeur relatifs à leur gestion : transport, impression, archivage, distribution, copies,...



La dématérialisation à travers PORTNET des titres d'importation, des licences d'exportation, de la gestion d'escale et du contrôle douanier et des fiches de suivi des marchandises importées implique à elle seule d'importants gains écologiques.

En effet, la démarche de la dématérialisation des procédures de commerce extérieur permettra au Maroc d'économiser l'équivalent de la consommation annuelle de 7 735 foyers en termes d'eau douce, 42 053 foyers en termes d'électricité et 15 727 foyers en termes de déchets.

Cette dématérialisation permettra également d'épargner 800 000 arbres par an (la taille de la forêt de Grunewald), d'économiser l'équivalent de la consommation annuelle du carburant de 17 000 voitures.



¹⁸ Source : Portnet SA.

LCL INITIATIVE de l'AFFM¹⁹

Dans le cadre de l'initiative du secteur logistique en matière de développement durable, Moroccan Green Logistics, à l'occasion de la tenue au Maroc de la COP22, l'Association des Freight Forwarders du Maroc (AFFM) consciente de la nécessité de préserver notre environnement et notre planète s'engage d'une manière volontariste à adhérer à la charte d'engagement en faveur d'une logistique verte initiée par l'Agence Marocaine du Développement de la Logistique (AMD L).



Pour formaliser son engagement en faveur d'une logistique durable, l'Association des Freight Forwarders du Maroc (AFFM) propose une initiative sous la dénomination « LCL Initiative By AFFM ».

L'activité des Freight Forwarders, est par essence orientée vers le développement de la logistique durable notamment à travers l'offre de services du groupage : LCL (Less than Container Load) qui a un impact positif sur la diminution de l'empreinte carbone du transport grâce à une organisation optimale de la chaîne logistique du commerce extérieur, à la massification des marchandises, l'optimisation de leurs flux en termes de coût et délais et une plus grande fluidité des opérations de transit.

Les Freight Forwarders qui ont toujours été au service du développement de la logistique et du commerce international, ont l'ambition aujourd'hui à travers LCL INITIATIVE (Less Carbon Loaded Initiative) de rendre un plus grand service à notre planète et ceci à travers l'encouragement d'une logistique verte adoptant les bonnes pratiques écologiques.

LCL INITIATIVE consistera dans ce cadre en :

- Encouragement des Freight Forwarders à l'adoption et à la formation aux bonnes pratiques en termes de logistique durable ;
- Création d'un Cluster Multimodal qui aura pour mission de porter le développement de projets R&D pour diminuer l'impact carbone par le transport multimodal ;
- L'engagement des Freight Forwarders à la promotion des circuits logistiques ayant le plus faible impact carbone ;

Cette initiative fera l'objet d'une large diffusion auprès de la communauté des Freight Forwarders au niveau national et international, ainsi que ses différents partenaires. Des plans d'action annuels seront arrêtés et mis en oeuvre par une commission Ad Hoc qui sera créée au sein de l'Association des Freight Forwarders du Maroc (AFFM).

¹⁹ Source : Association des Freight Forwarders du Maroc

STRATEGIE LOGISTIQUE MAROCAINE, SOUTENUE PAR LE GLOBAL ENVIRONMENTAL FACILITY



Projet d'intégration du changement climatique dans la stratégie logistique marocaine²³



Etant donné ses importants potentiels et possibilités en matière de réduction des GES, la stratégie logistique marocaine bénéficie déjà d'un appui du Global Environmental Facility (GEF) et du Programme de Développement des Nations Unies. En effet, le GEF contribue au financement et à l'implémentation au Maroc d'un projet relatif à l'intégration du changement climatique dans la stratégie nationale de développement de la compétitivité logistique et dans la mise en œuvre des plateformes logistiques.

L'objectif de ce projet est de réduire les émissions des GES dans le secteur de la logistique au Maroc en développant le concept de la logistique à faible carbone tout en mettant l'accent d'abord sur le schéma régional de développement des zones logistiques du Grand Casablanca.



Il s'agit de développer un modèle pilote basé sur un ensemble de mesures d'atténuation à répliquer sur les autres zones logistiques dans une optique de contribuer à l'objectif global de réduction de 35% des émissions de CO2 liées au transport routier de marchandises.

Ce projet, vient appuyer le travail démarré au Maroc en matière de réduction des émissions liées au secteur du fret et les diverses initiatives mises en place à date dans ce cadre. En effet, ce projet permettra d'examiner les différents instruments de politique, de mesures et options envisageables pour la contribution à la réduction des émissions, en prenant en considération les particularités du secteur.

Ce projet vise à atteindre trois résultats :

Résultat 1 : Les institutions, les politiques publiques et les réglementations sont renforcées pour le développement à faible carbone du secteur du transport au Maroc

Il s'agit d'appuyer les différentes institutions concernées, notamment le Ministère de l'Équipement, du Transport et de la Logistique, pour traduire la cible ambitieuse de réduction des GES en une panoplie d'instruments politiques et mesures réalisables au niveau national. Pour ce fait, divers produits seront développés, dont chacun est traduit par plusieurs activités. Le premier produit de ce résultat vise le renforcement institutionnel et le développement des capacités institutionnelles à travers l'organisation de formations ciblées et l'élaboration d'un Kit d'outils et de guides de formation relatives au développement à bas carbone.

Ayant pour principal objectif d'introduire la dimension du Changement Climatique dans cette dernière, le projet passera pour ce faire par l'évaluation de divers instruments politiques, de dispositifs techniques et des mesures d'atténuation des GES dans le secteur du fret. La mise en place d'un cadre réglementaire et fiscal adéquat est indispensable pour

²³ Données du Document Projet -GEF-PNUD sur l'intégration du changement climatique dans la stratégie nationale de développement de la compétitivité logistique et dans la mise en œuvre des plateformes logistiques



promouvoir et mettre en place les mesures politiques spécifiques et les mesures d'atténuation dans le secteur du fret. Ainsi, une assistance technique assurera l'accompagnement des institutions concernées. L'arrêté du Ministre de l'Équipement et des Transports n°2713-10 du 17 moharrem 1432 (23 décembre 2010) relatif à la conduite professionnelle serait également revu dans ce cadre et amendé pour inclure la formation en éco-conduite. Les mesures à implémenter par la suite feront objet d'un contrôle basé sur un ensemble d'indicateurs conçu pour le suivi des réductions des émissions et des co-bénéfices atteints.

Résultat 1	Produits	Activités
Les institutions, les politiques publiques et les réglementations sont renforcées pour le développement à faible carbone du secteur du transport au Maroc	1.1 Le renforcement institutionnel et le développement des capacités du Ministère de l'Équipement, du Transport et de la Logistique (METL) et l'Agence Marocaine de Développement de la Logistique (AMDL)	1.1.1. Développement d'un ensemble de directives et d'outils de formation pour assurer une bonne gestion du développement à faible carbone au METL et à l'AMDL ; 1.1.2. Formation technique sur la gestion de données GES, MRV²⁴ et conception et mise en œuvre de NAMA²⁵ spécifique au secteur du fret ; 1.1.3. Voyages d'études pour les fonctionnaires gouvernementaux et des représentants du secteur privé dans les pays ayant une expérience pertinente en matière de développement à faible carbone du secteur du fret.
	1.2 Dimension de l'atténuation du changement climatique de la Stratégie Nationale de la Logistique précisée et mise en œuvre pour l'élaboration d'un cadre réglementaire à faible carbone pour le secteur de la logistique	1.2.1 Evaluation de faisabilité technique, réglementaire et économique d'une gamme de dispositifs politiques et des mesures d'atténuation des GES dans le secteur du fret ; 1.2.2 Assistance juridique à l'élaboration d'un cadre réglementaire pour promouvoir des mesures politiques spécifiques et des mesures d'atténuation dans le secteur du fret dont la mise en place d'un inventaire obligatoire des émissions de GES et des systèmes MRV, la mise en œuvre obligatoire de la Norme Euro 4, la promotion de mesures d'incitation fiscale pour l'efficacité énergétique, shift modal du route vers le rail et le renouvellement de la flotte ; 1.2.3 Révision de l'arrêté du ministre de l'Équipement et des Transports n°2713-10 du 17 moharrem 1432 (23 décembre 2010) relatif à la conduite professionnelle et son amendement pour intégrer la formation en éco-conduite ; 1.2.4 Conception d'un système d'incitation financière pour le renouvellement de la flotte afin d'introduire progressivement les normes Euro 4. Ceci comprend une étude de faisabilité et des consultations avec les principales parties prenantes ; 1.2.5 Conception et mise en œuvre d'un système de contrôle à base d'indicateurs de la Stratégie Nationale de la Logistique pour suivre les émissions de GES, la finance climatique mais également les co-bénéfices (notamment la croissance économique du secteur, le taux de transition de l'informel vers le formel, les entreprises de transport nouvellement créées, le taux d'occupation des plateformes logistiques, etc.).
	1.3 Un profil de la flotte de la route et des facteurs d'émission spécifiques au pays sont développés pour les modes de transport marocains (routiers et ferroviaires), et utilisés pour le	1.3.1 Enquêtes statistiques de toutes les sources pertinentes publiques et privées concernées, telles que les entreprises formelles, CVT ²⁶ , systèmes de paiement des vignettes, centres de pesage, etc., afin de dresser un profil réaliste des flottes routière et ferroviaire détaillant les données clés telles que le nombre de véhicules, le type, l'âge, le PTC, le type et la pression des pneus, le type et l'efficacité du combustible, la propriété, le kilométrage, les poids chargés, le type de charges ;

24 Système de Mesure, de Reporting et de Vérification

25 Mesures d'Atténuation Appropriées au Niveau National

26 CVT: Centres de Visites Techniques.

Résultat 1	Produits	Activités
	développement des scénarios	1.3.2 Développement d'un système centralisé pour assurer une collecte de données permanente et une mise à jour du profil de la flotte routière et du profil ferroviaire ; 1.3.3 Etablissement d'une convention de recherche entre le METL et une école nationale d'ingénieurs pour assurer le développement des facteurs d'émission spécifiques au secteur du fret marocain ; 1.3.4 Développement d'un ensemble de méthodes pour calculer les émissions des GES du secteur du fret.
	1.4 Un comité interministériel est mis en place pour promouvoir les politiques d'atténuation des émissions dans le secteur du transport	1.4.1 Développement d'un ensemble de lignes directrices pour établir les critères nationaux d'éligibilité, de conception et de qualité des NAMAs transport ; 1.4.2 Renforcement des capacités du comité à travers des formations sur les NAMAs et le développement d'un manuel de procédures d'évaluation des NAMAs ; 1.4.3 Assistance au comité pour l'évaluation des NAMAs transport.
	1.5 La mise en œuvre de partage de connaissances et de communication autour des activités liées aux solutions d'atténuation des GES dans le secteur des transports	1.5.1 Développement d'un plan de communication et de partage des connaissances ; 1.5.2 Création d'un site Web du projet pour communiquer sur les activités, les meilleures pratiques et résultats du projet ; 1.5.3 Organisation et participation à des conférences nationales et internationales sur le développement à faible carbone dans le secteur du fret.

Résultat 2 : Le réseau des zones logistiques du Grand Casablanca est développé en tant que projet-modèle de mesure d'atténuation appropriée au niveau national ("NAMA").

Le premier produit à atteindre dans le cadre de ce résultat est la réalisation de l'inventaire des GES et son système MRV associé au développement de zones logistiques dans le Grand Casablanca, conçus et mis en œuvre pour des fins de "NAMA".

Il s'agit pour ce faire de réaliser plusieurs activités principalement la réalisation d'un benchmark sur les expériences internationales relatives aux NAMAs dans le secteur du fret dans les zones urbaines, la conception et la mise en œuvre d'un inventaire des émissions de GES et des systèmes MRV... Le benchmark à réaliser devra aboutir à l'élaboration des termes de référence spécifiques à la préparation du document de conception de la NAMA du Grand Casablanca.

Cette NAMA sera conçue pour la mise en œuvre immédiate de 5 composantes prioritaires. En effet, la réduction des émissions pour le schéma régional logistique du GC démarrera par la mise en place de cinq mesures sélectionnées dans ce projet.

Il s'agit de 1) la formation en éco-conduite, 2) la sensibilisation des opérateurs sur un ensemble de mesures visant la réduction de la consommation de carburant, 3) le shift-modal (route vers le rail), 4) l'installation de Photovoltaïques d'une capacité de 1,5 MW et 5) le soutien au renouvellement de la flotte, notamment pour rendre opérationnel l'introduction de la Norme Euro 4 désormais obligatoire au Maroc depuis janvier 2015 même sur les véhicules montés localement.

Résultat 2	Produits	Activités
Le réseau des ZLMF du Grand Casablanca (GC) est développé en tant que projet-modèle de mesure d'atténuation appropriée au niveau national ("NAMA").	2.1. Inventaire des GES et systèmes MRV conçus et mis en œuvre pour des fins de "NAMA"	2.1.1 Benchmark sur les expériences internationales relatives aux systèmes de NAMAs et MRV dans le secteur du transport/secteur du fret dans les zones urbaines (cette étude devrait aboutir à l'élaboration des termes de référence spécifiques à la NAMA du GC) ; 2.1.2 Enquêtes de base sur l'utilisation des plateformes logistiques, collecte de données sur les volumes, les marchandises, les émissions, etc.; 2.1.3 Conception et mise en œuvre d'un inventaire des émissions de GES et des systèmes MRV, y compris les plateformes informatiques associées, destinées à être utilisées par les parties prenantes et les utilisateurs potentiels dans les 8 futurs sites du schéma régional logistique du GC.
	2.2 Une NAMA conçue pour la mise en œuvre immédiate de 5 composantes prioritaires (formation en éco-conduite, sensibilisation des opérateurs, shift modal, conformité des véhicules à la norme Euro 4 et installation sur le toit des PV de 1,5 MW)	2.2.1 Etablissement d'une liste de formateurs bénéficiaires de la formation de formateurs à l'éco-conduite ; 2.2.2 Conception d'un programme de Formation des Formateurs sur l'éco-conduite ; 2.2.3 Enquête pour la détermination du tonnage susceptible d'être transféré de la route vers le rail ; 2.2.4 Développement d'une NAMA pour le schéma régional logistique du GC basée sur au moins les modules d'atténuation suivants : l'éco-conduite, infrastructure fixe, efficacité énergétique/énergie renouvelable, renouvellement du parc automobile et le shift modal de la route vers le rail.
	2.3 Une ligne de base normalisée pour le shift-modal (de la route vers le rail) est développée en tant qu'outil d'atténuation pour favoriser la réplication	2.3.1 Développement d'une méthodologie de référence normalisée pour évaluer les émissions de GES de la route vers le rail (shift modal) et sa soumission à la CCNUCC pour approbation ; 2.3.2 Essai d'application et calibrage de l'outil d'atténuation sur le site logistique de Zenata et d'autres projets pertinents de shift modal.
	2.4 Une stratégie de réplication sur les autres plateformes logistiques est développée, en s'appuyant sur le modèle du Grand Casablanca	2.4.1 Evaluation du potentiel d'atténuation des émissions des GES à développer dans chaque schéma logistique régional sur la base des plans d'action de l'AMD L et des politiques d'atténuation développées mais aussi des actions du Produit 1.2 ; 2.4.2 Capitaliser l'expérience du schéma logistique du Grand Casablanca en tant que modèle à répliquer dans les autres schémas logistiques régionaux (en coordination avec les résultats 2 et 3) ; 2.4.3 Développement des autres schémas régionaux comme un « noyau NAMA » avec un cadre MRV associé.
	2.5 Un cadre novateur de "NAMAs imbriquées" est développé pour coupler la NAMA du schéma régional logistique du GC à la NAMA de la nouvelle Eco-Cité de Zenata ("NAMA ville"), une initiative pour favoriser les synergies d'atténuation dans le cadre d'un inventaire solide et cohérent des GES et d'un cadre MRV	2.5.1 Evaluation des chevauchements et synergies des mesures d'atténuation entre la NAMA du schéma régional logistique du GC et la « NAMA ville » ; 2.5.2 Conception d'un cadre "NAMAs imbriquées" en tant que base pour le développement et le comptage des mesures d'atténuation aux sites logistiques du GC et la nouvelle Eco-Cité de Zenata sans qu'il n'y ait une duplication ou un chevauchement ; 2.5.3 Mise en place d'un ensemble de lignes directrices pour promouvoir la réplication du cadre "NAMAs imbriquées" à d'autres NAMAs potentiellement imbriquées soit pour des raisons géographiques ou sectorielles.

Résultat 3 : La mesure d'atténuation ("NAMA") est rendue opérationnelle à travers des investissements de mise à niveau des zones logistiques prévues par le schéma régional logistique du Grand Casablanca

Le 3ème résultat escompté par ce projet est l'opérationnalisation de certaines composantes de la NAMA du Grand Casablanca. Un certain nombre de mesures de réduction des émissions ont été prévues dont :

- Eco-conduite : le projet GEF contribuera dans ce cadre à la mise en œuvre d'un programme de formation à l'éco-conduite pour les formateurs des auto-écoles offrant des sessions pour l'obtention du permis de conduire de catégorie C relatif au poids lourd dédié au transport de marchandises. Le projet cible la formation de 100



formateurs en la matière. L'appui du GEF prendra la forme d'un financement partiel du coût dédié aux formations. L'investissement du GEF pour soutenir cette activité est estimé à 60 000 \$USD ;

- Installation photovoltaïque de 1,5 MW : Suite à l'étude de faisabilité technico-économique réalisée par la Société Nationale des Transports et de la Logistique (SNTL) concernant la mise en place de panneaux photovoltaïques (PV) sur la toiture d'une capacité de 1,5 MW, le projet GEF viendra appuyer la SNTL par un financement partiel pour l'acquisition des matériaux nécessaires à l'installation. Dans le même cadre, le projet et L'Agence Nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (ADEREE) apporteront une assistance technique à la SNTL en matière de droit de connexion au réseau électrique et le « net-metering ». L'investissement du FEM pour soutenir l'installation des PV est estimé à 500 000 \$USD ;



- Sensibilisation des opérateurs : il s'agit de mettre en œuvre une large campagne de sensibilisation des opérateurs du transport routier de marchandises inscrits au niveau du registre du METL pour les inciter à mettre en œuvre un ensemble de mesures, à savoir : l'éco-conduite, l'acquisition de nouveaux véhicules en bénéficiant des mesures initiées par l'Etat pour promouvoir la norme Euro 4, et l'entretien régulier des véhicules. L'effort de sensibilisation apportera les précisions nécessaires aux opérateurs sur les bienfaits de ces mesures mais également de leur répercussion sur la facture énergétique, ainsi que sur celle du carburant. Il importe de signaler que la promotion de ces mesures est en parfaite concordance avec l'étude lancée par le METL relative au calcul et l'actualisation des coûts de référence du transport routier de marchandises. Ces activités de sensibilisation seront mises en œuvre en partenariat avec la Fédération du Transport (FT) de la Confédération Générale des Entreprises du Maroc (CGEM) en ciblant la région de Grand Casablanca ainsi que d'autres régions du Royaume. L'investissement du GEF pour soutenir l'installation des PV est estimé à 100 000 \$USD.

Une partie de ce résultat vise également le soutien au renouvellement de la flotte : Il s'agit d'apporter un soutien à l'initiative entamée en 2008 par le METL qui visait l'amélioration de l'efficacité des véhicules à travers des subventions destinées aux conducteurs des vieux véhicules et allant jusqu'à la moitié du coût du véhicule acheté.



L'appui du projet dans ce cadre sera d'examiner les options d'ouverture d'une ligne de crédits dédiés à ces opérateurs pour encourager le renouvellement des véhicules et lever les barrières d'ordre financier. Le projet apportera également un soutien technique et administratif aux propriétaires des vieux véhicules de transport de marchandises pour bénéficier du programme de renouvellement de la flotte.

Résultat 3	Produits	Activités
La mesure d'atténuation ("NAMA") est rendue opérationnelle à travers des investissements de mise à niveau des zones logistiques prévues par le schéma régional logistique du GC	3.1 Financement partiel du GEF pour 3 interventions d'atténuation énoncées dans le schéma régional logistique du GC (formation à l'éco-conduite, sensibilisation des opérateurs, et installation sur les toits de panneaux PV de 1.5 MW), avec un appui à la conformité des véhicules à la norme Euro 4.	3.1.1 Soutien financier pour la mise en œuvre de la formation des formateurs à l'éco-conduite ; 3.1.2 Réalisation d'une campagne de sensibilisation des opérateurs du transport de marchandises au niveau du Grand Casablanca et d'autres régions du Maroc ; 3.1.3 Assistance technique à la SNTL sur le branchement au réseau, le comptage net (net metering) et sur l'approvisionnement des panneaux PV ; 3.1.4 Financement partiel d'une installation solaire photovoltaïque de 1.5MW sur le toit ; 3.1.5 Soutien technique et administratif aux propriétaires de vieux véhicules de transport de marchandises pour bénéficier du programme de renouvellement de la flotte.

Impacts attendus du projet²⁷



Les bénéfices directs du projet relatifs aux réductions des gaz à effet de serre (GES) calculées consisteront en :

- Les impacts relatifs à la réduction des émissions directes des GES : *La formation à l'éco-conduite des chauffeurs de camions qui serait associée au schéma régional logistique du GC.* Les expériences antérieures acquises par le METL et la SNTL en matière de formation à l'éco-conduite ont engendré une réduction de 10% des émissions. Tenant compte des différentes hypothèses de calcul, les réductions sont estimées à 87 321 tCO₂.
- *L'installation de 1,5 MW de PV sur le toit des entrepôts.* En considérant une électricité annuelle générée de 3 700 MWh, un facteur d'émission de 0,59 tCO₂/MWh relatif au réseau électrique national, et une durée de vie de 15 ans pour les panneaux solaires, le total des réductions des émissions directes seront de l'ordre de 32 745 tCO₂. Il est prévu que, en tant que première grande installation de toit photovoltaïque dans le secteur de la logistique, cet investissement aura des effets importants de réplication. De plus, il convient de noter que cette mesure ne concerne pas spécifiquement le secteur du fret. En effet, l'installation des panneaux solaires aura pour objectif de réduire les émissions au niveau du site de Zenata, et permettra ainsi de réduire indirectement les émissions du projet.
- *Le renouvellement de la flotte grâce à la création d'une ligne de crédit, en collaboration avec le Fonds National des Transports.* En se basant sur l'approche considérée par l'équipe de préparation du projet, et en supposant que 5 000 camions bénéficient du projet de renouvellement durant la période du projet (2016-2019),

²⁷ Selon le Document Projet -GEF-PNUD- sur l'intégration du changement climatique dans la stratégie nationale de développement de la compétitivité logistique et dans la mise en œuvre des plateformes logistiques



et que les nouveaux véhicules sont 5% plus efficaces que les anciens, la réduction totale des émissions atteindra environ 18 322 tCO₂.

- *Le "shift modal" de la route vers le rail.* Des réductions supplémentaires des émissions sont très attendues de cette mesure. En effet, compte tenu de l'approche « t.km » et en supposant que 5 % des tonnes.km transportés passera de la route vers le mode de transport ferroviaire à la fin du projet (2019), les réductions des émissions du transfert modal sont estimées à être de l'ordre de 872 756 tCO₂ représentant environ 9% des émissions totales relatives à l'année de référence 2009. En parallèle aux autres mesures, le shift modal semble concerner la majeure partie des réductions estimées dans le secteur.
- *L'amélioration de la maintenance et du contrôle technique des véhicules de marchandises qui serait déployée davantage grâce aux efforts de sensibilisation des opérateurs du secteur.* L'Union Européenne (UE), grâce à son expérience en matière de contrôle technique des véhicules routiers, suggère l'atteinte d'environ 5-10% de réduction des émissions. Cette mesure vise principalement le secteur formel en atteignant 20% de la flotte du projet en 2019. Le potentiel de réduction des émissions reste conservatif et est estimé à atteindre 491 373 tCO₂.

Les réductions des émissions indirectes qui découleront de la mise en œuvre du projet ont été calculées suivant deux approches ascendante et descendante :

- **L'approche « ascendante » :**

Selon cette approche, le calcul des réductions d'émissions indirectes relatif à chaque mesure (PV, éco-conduite, renouvellement de la flotte, amélioration de la maintenance, shift-modal) se base sur les réductions d'émissions directes calculées précédemment, avec l'application d'un facteur de réplication (FR) relatif aux impacts indirects qu'aura le projet 10 ans après sa clôture (période allant de 2020 à 2029). L'approche « ascendante » donne lieu à **un total de 3 364 318 tCO₂ de réductions**.

- **L'approche « descendante » :**

Le calcul des réductions des émissions indirectes via cette approche a également été effectué pour chaque mesure considérée. L'approche « descendante » prend en compte les potentiels économique et technique relatifs au projet durant les 10 années après sa mise en œuvre, multiplié par un facteur de causalité (FC) estimé par le GEF, spécifique à chaque action et indiquant dans quelle mesure l'intervention du GEF peut prétendre une causalité pour la réduction. Cette approche donne lieu à des résultats plus importants que l'approche précédente. **Le potentiel total des 10 années de réduction d'émissions, estimé par cette approche est de 11 115 550 tCO₂.**

CONCLUSION

De façon générale, une bonne gestion de la chaîne logistique induit par essence une réduction des GES. La massification des flux, l'optimisation des moyens et des ressources et la rationalisation des infrastructures et leur exploitation, bases intuitives d'un bon management de la supply chain, sont d'importants leviers pour la limitation des nuisances environnementales.

Même si l'on peut considérer que la logistique est une affaire qui concerne plus le monde de l'entreprise, ce constat est aussi valable à l'échelle d'un pays dans la mesure où à travers des politiques et stratégies volontaristes nationales on peut instaurer une cohérence logistique territoriale et forger un modèle de bonnes pratiques.

Le Maroc qui compte parmi les rares pays ayant fait le choix de définir et mettre en œuvre une vision et une stratégie nationale intégrée propre au secteur logistique est largement engagé dans les efforts mondiaux pour la réduction des GES résultant des activités logistiques.

La minimisation des effets de la logistique dans le monde sur le changement climatique est un chantier colossal qui nécessite le concours de tous. Il exige de s'inscrire dans une approche collaborative et partenariale entre public et privé, pays avancés et pays en voie de développement. Des cadres de coopération internationale comme la COP et le Global Environmental Facility ne peuvent que stimuler l'action collective vers une logistique verte et durable.

Dans ce sens, les acteurs de la supply chain au Maroc et dans le monde sont appelés à jouer leur rôle pour accomplir les changements qui permettent de remporter les challenges et relever les défis liés au changement climatique pour une planète durable pour les générations futures.





المملكة المغربية
ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⵏ ⵍⴰⵎⴰⵔ
Royaume du Maroc

Annexe 5

RECUEIL DES STATISTIQUES DES ACCIDENTS CORPORELS DE LA CIRCULATION ROUTIÈRE 2022



وزارة التجهيز والماء
ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⵏ ⵉⵙⵓⵔ ⵏ ⵍⴰⵎⴰⵔ
MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT ET DE L'EAU
DIRECTION GÉNÉRALE DES ROUTES

SOMMAIRE

I - GENERALITES	6
• Accidents corporels 2022	7
• Victimes	9
• Evolution des accidents et victimes de 2013 à 2022	11
II - REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES ACCIDENTS	13
• Carte des accidents par régions	14
• Carte des tués par régions	15
• Répartition des accidents et victimes par provinces en et hors agglomérations	16
• Répartition des victimes par catégories d'usagers et par provinces	18
• Répartition des accidents et victimes par provinces et agglomérations	20
• Répartition des accidents et victimes par régions économiques	36
III - VEHICULES ET USAGERS IMPLIQUES PAR CATEGORIE	37
• Répartition des véhicules impliqués par catégories	38
• Répartition des véhicules impliqués selon leur âge	39
• Répartition des véhicules impliqués selon leur type et leur usage	40
• Tués et blessés par catégories d'usagers en 2021 et 2022	41
• Répartition des victimes impliqués par catégories d'usagers :	42
- Hors agglomération	43
- En agglomération	44
- En et hors agglomération	45
• Répartition des accidents, véhicules impliqués et victimes selon le type de collision	46
• Répartition des accidents, véhicules impliqués et victimes selon le point de choc initial	47
• Répartition des accidents, véhicules impliqués et victimes selon la manoeuvre principale avant l'accident	48



IV - ACCIDENTS ET VICTIMES PAR PERIODE	49
• Victimes pour 100 accidents en 2022 et 2021	50
• Répartition des accidents et victimes par mois et trimestres en 2022	51
• Répartition des accidents et victimes par mois en 2022	52
• Taux de mortalité et de gravité par type de jour en 2022 et 2021	54
• Répartition des accidents et victimes par jour en 2022	55
• Répartition des accidents et victimes selon les jours fériés	56
• Répartition des accidents et victimes par heure	57
V - VICTIMES PAR GROUPE D'ÂGE ET PAR SEXE	59
• Histogramme des piétons victimes par sexe	60
• Piétons	61
• Passagers :	
- Cyclistes	62
- Motocyclistes	63
- Automobilistes	64
- Camions	65
- Autobus	66
- Autocars	67
- Animal monté - charettes	68
• Conducteurs :	
- Cyclistes	69
- Motocyclistes	70
- Automobilistes	71
- Camions	72



- Autobus	73
- Autocars	74
- Cavaliers et conducteurs de charettes	75
- Fauteuil pour handicapé	76
♦ Usagers de la route victimes par sexe et tranche d'âge	77
♦ Répartition des victimes selon la profession	78

VI - CONDUCTEURS IMPLIQUES ET NATURE DES FAUTES ET DES DEFATS MECANIKES 79

♦ Répartition des conducteurs impliqués selon la nature de leur véhicule et l'ancienneté du permis	80
♦ Répartition des fautes relatives aux conducteurs selon leur nature	81
♦ Répartition des conducteurs impliqués suivant leur résidence et leur nationalité par mois	82
♦ Répartition des conducteurs victimes suivant le respect ou non du port des moyens de sécurité	83
♦ Répartition des fautes et défauts mécaniques	84
♦ Répartition des conducteurs impliqués victimes selon le trajet effectué	85
♦ Répartition des conducteurs impliqués victimes selon la profession	86

VII - INFRASTRUCTURE ET CONDITIONS ATMOSPHERIQUES 87

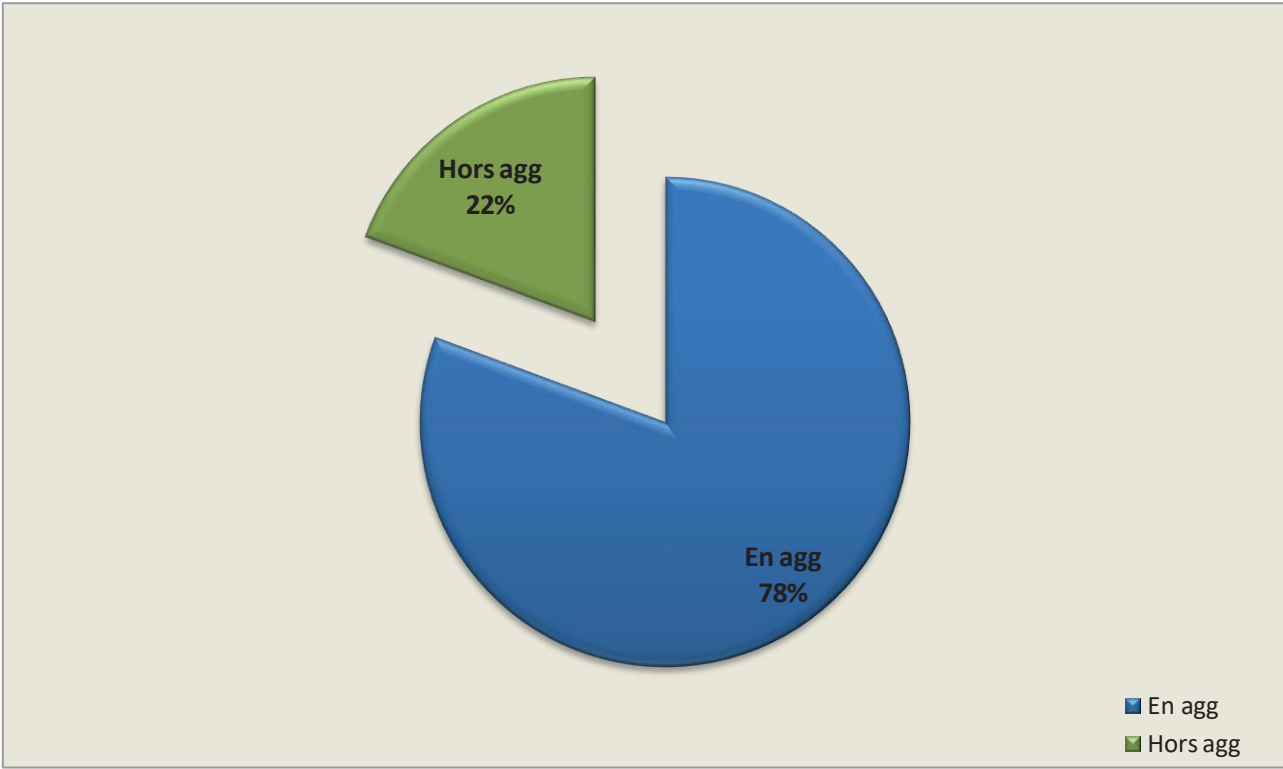
♦ Accidents et victimes selon le réseau routier et autoroutier	88
♦ Accidents et victimes par type de réseau routier en rase campagne	110
♦ Répartition des accidents suivant l'état de la route, les intempéries en intersection et hors intersection	111
♦ Répartition des accidents selon le type et la largeur de la chaussée	112
♦ Répartition des accidents et victimes par type d'intersection	113
♦ Répartition des accidents selon l'environnement, l'existence ou non de la signalisation et les caractéristiques géométriques	114
♦ Répartition des accidents et victimes selon l'obstacle heurté	116
♦ Répartition des conducteurs impliqués selon leurs nationalité et le type de véhicule	117



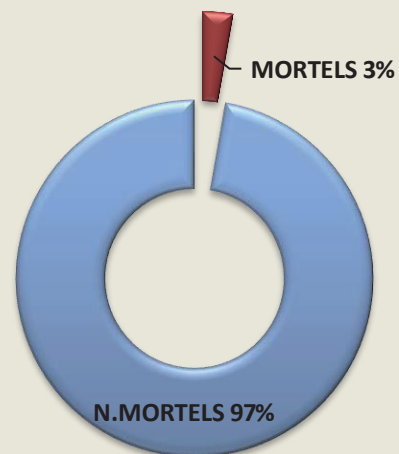
GENERALITES

ACCIDENTS CORPORELS 2022

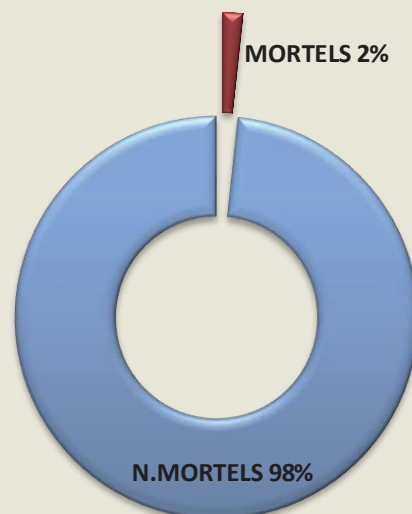
	ACCIDENTS		
	MORTELS	N. MORTELS	TOTAL
EN AGGLOMERATION	1535	90100	91 635
HORS AGGLOMERATION	1603	20387	21 990
TOTAL	3 138	110 487	113 625



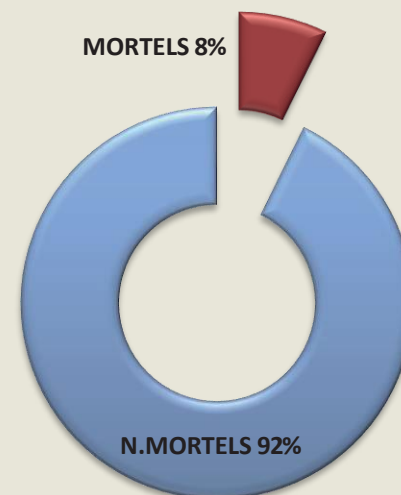
REPARTITION DES ACCIDENTS EN ET HORS AGGLOMERATION SELON LE TYPE



REPARTITION DES ACCIDENTS EN AGGLOMERATION SELON LE TYPE



REPARTITION DES ACCIDENTS HORS AGGLOMERATION SELON LE TYPE

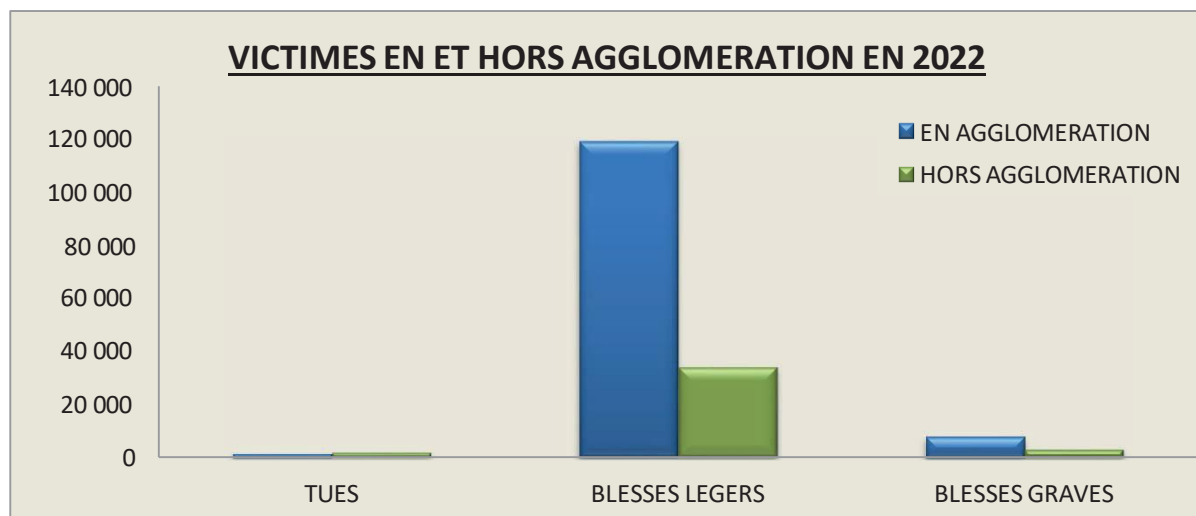


VICTIMES

VICTIMES 2022				
	TUES	BLESSES LEGRS	BLESSES GRAVES	TOTAL
EN AGGLOMERATION	1 629	119 133	7 990	128 752
HORS AGGLOMERATION	1 870	34 046	2 939	38 855
TOTAL	3 499	153 179	10 929	167 607

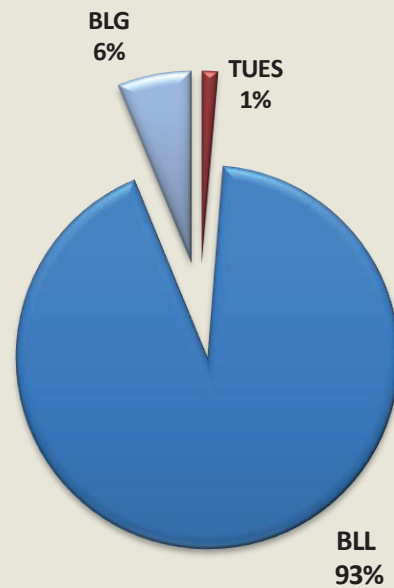
VICTIMES 2021				
	TUES	BLESSES LEGRS	BLESSES GRAVES	TOTAL
EN AGGLOMERATION	1 634	117 225	7 353	126 212
HORS AGGLOMERATION	2 051	37 186	3 390	42 627
TOTAL	3 685	154 411	10 743	168 839

VICTIMES 2020				
	TUES	BLESSES LEGRS	BLESSES GRAVES	TOTAL
EN AGGLOMERATION	1 281	86 008	5 552	92 841
HORS AGGLOMERATION	1 724	26 114	2 669	30 507
TOTAL	3 005	112 122	8 221	123 348



VICTIMES D'ACCIDENTS DE LA CIRCULATION EN 2022

VICTIMES EN AGGLOMERATION



VICTIMES HORS AGGLOMERATION

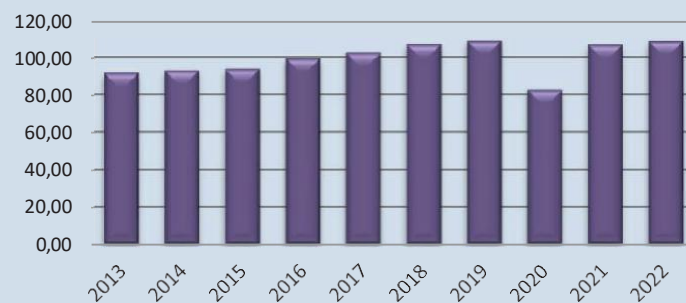


EVOLUTION DES ACCIDENTS ET VICTIMES DE 2013 A 2022

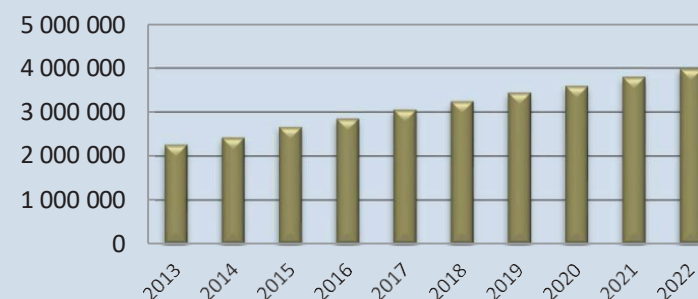
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ACCIDENTS HORS AGGLOMERATION	18341	17149	21027	21638	24069	25114	22026	17921	24548	21990
ACCIDENTS EN AGGLOMERATION	49585	51130	56976	59042	65306	69830	79618	66664	90078	91635
TOTAL ACCIDENTS	67926	68279	78003	80680	89375	94944	101644	84585	114626	113625
ACCIDENTS MORTELS	3265	3021	3365	3317	3274	3292	3247	2728	3318	3138
TUES	3832	3489	3776	3785	3726	3736	3622	3005	3685	3499
BLESSES	102040	101242	115042	119162	130011	137998	149342	120343	165154	164108

EVOLUTION DU PARC, DE LA CIRCULATION , DES ACCIDENTS ET DES TUES DE 2013 A 2022
Circulation (en millions.véhicule KM/Jours)

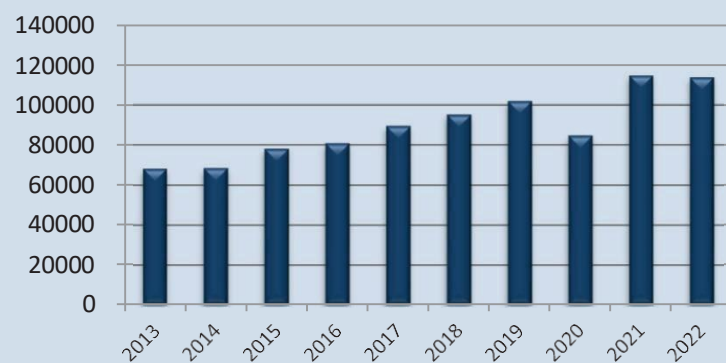
Circulation



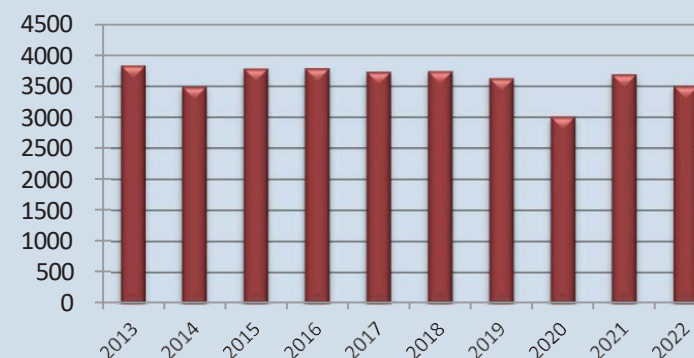
Parc auto



Accidents



Tués

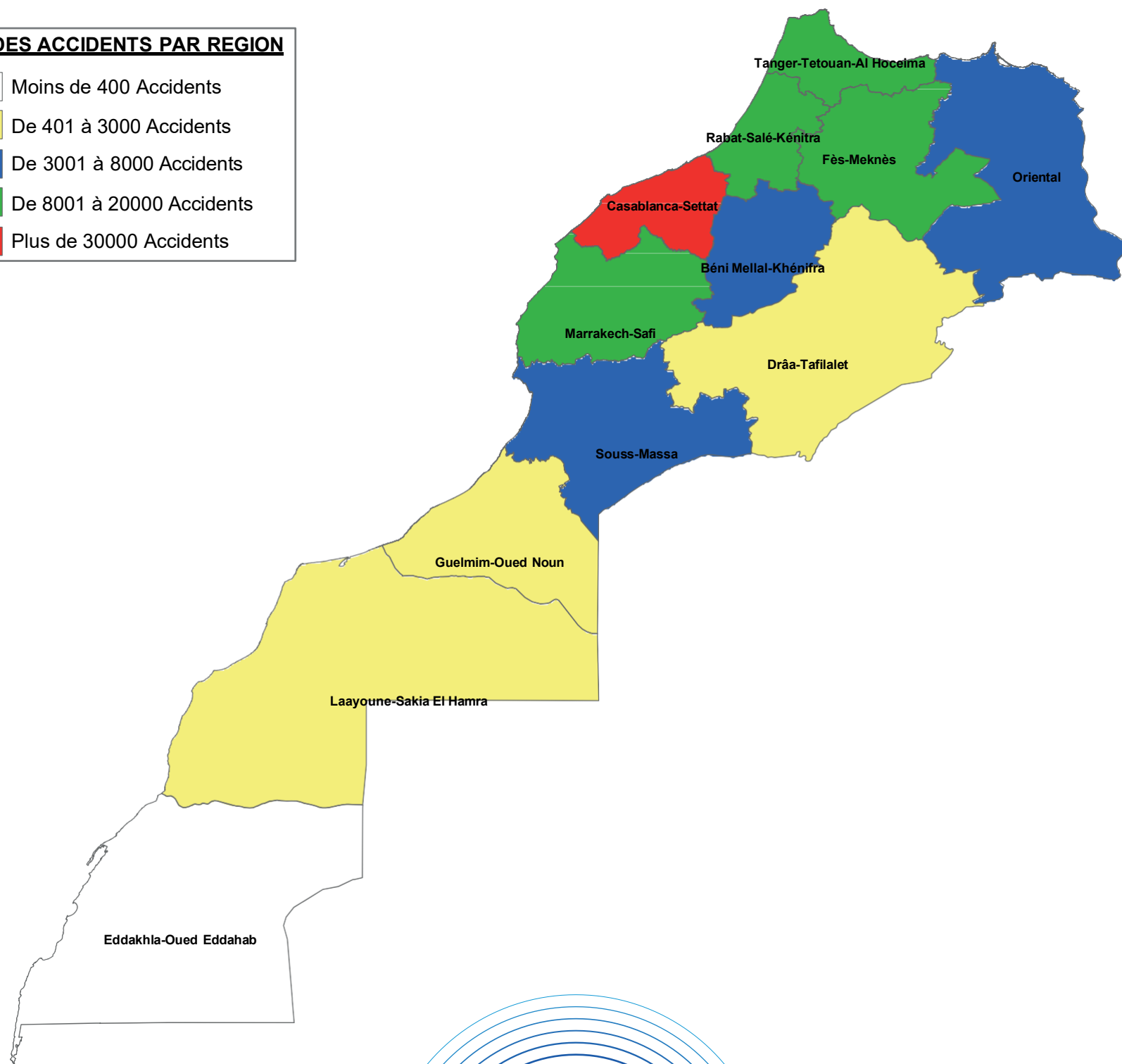




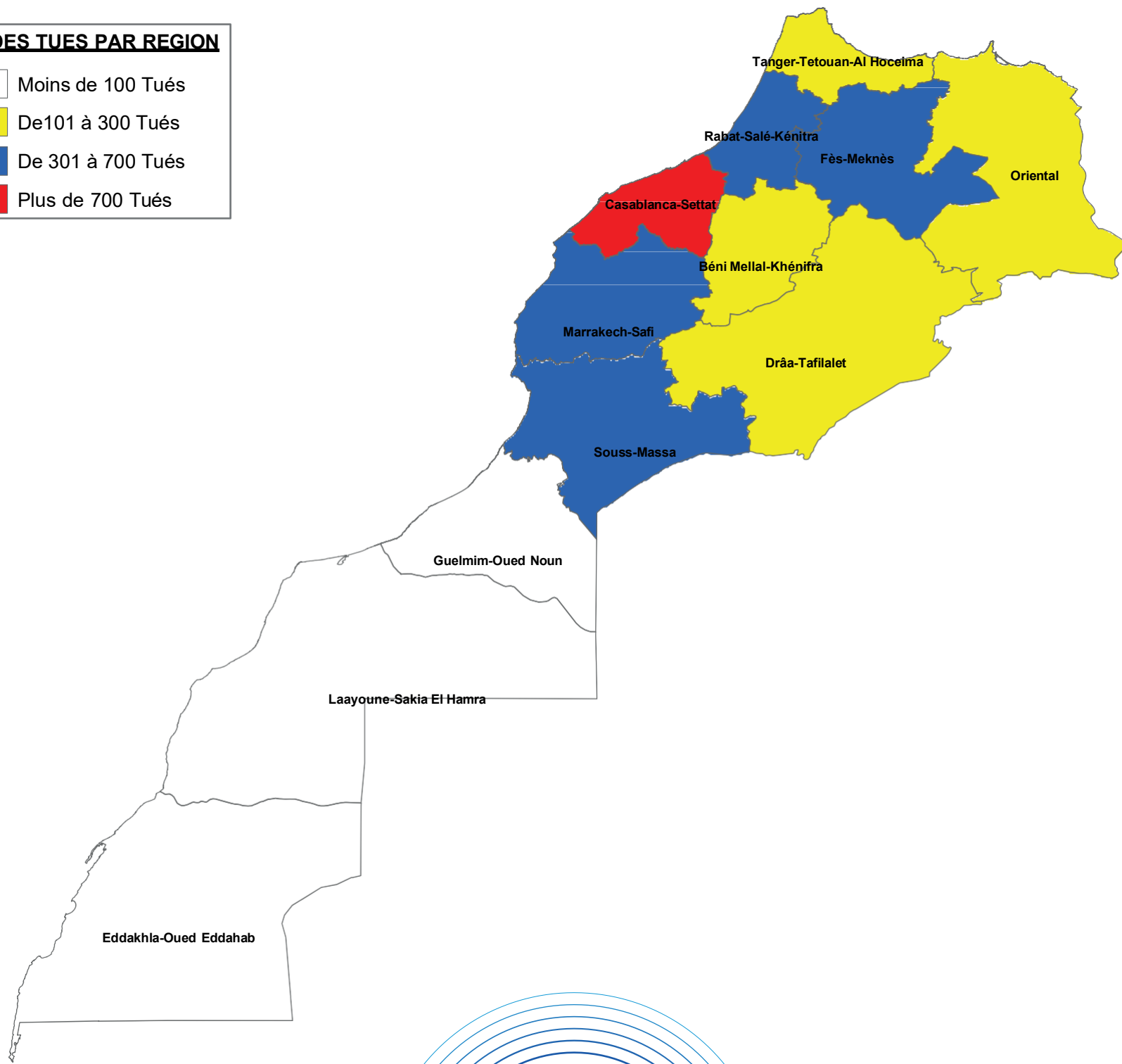
REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES ACCIDENTS

CARTE DES ACCIDENTS PAR REGION

-  Moins de 400 Accidents
-  De 401 à 3000 Accidents
-  De 3001 à 8000 Accidents
-  De 8001 à 20000 Accidents
-  Plus de 30000 Accidents



CARTE DES TUES PAR REGION



REPARTITION DES ACCIDENTS ET VICTIMES PAR PROVINCES EN ET HORS AGGLOMERATION

PROVINCE	HORS AGGLOMERATION						EN AGGLOMERATION						TOTAL					
	ACCIDENTS			TUES	BLES LEG	BLES GRAV	ACCIDENTS			TUES	BLES LEG	BLES GRAV	ACCIDENTS			TUES	BLES LEG	BLES GRAV
	N.MOR	MORT	TOTAL				N.MOR	MORT	TOTAL				N.MOR	MORT	TOTAL			
PROVINCE DE AGADIR IDA OUTANANE	191	14	205	15	290	17	2362	63	2425	68	2815	123	2553	77	2630	83	3105	140
PROVINCE DE AL HAOUZ	514	35	549	36	693	117	225	12	237	13	313	24	739	47	786	49	1006	141
PROVINCE DE ALHOCEIMA	158	9	167	10	241	33	343	10	353	10	409	52	501	19	520	20	650	85
PROVINCE DE ASSA ZAG	10	2	12	2	13	2	11	1	12	1	10	2	21	3	24	3	23	4
PROVINCE DE AZILAL	292	21	313	25	471	39	375	16	391	16	463	72	667	37	704	41	934	111
PROVINCE DE BEN SLIMANE	457	25	482	27	721	43	590	7	597	7	711	55	1047	32	1079	34	1432	98
PROVINCE DE BENI MELLAL	479	25	504	27	802	39	1378	40	1418	44	1860	56	1857	65	1922	71	2662	95
PROVINCE DE BERKANE	177	19	196	21	276	26	765	18	783	19	949	73	942	37	979	40	1225	99
PROVINCE DE BERRECHID	748	66	814	73	1307	78	1069	20	1089	22	1513	59	1817	86	1903	95	2820	137
PROVINCE DE BOUJDOUR	37	2	39	5	59	12	80	4	84	4	79	24	117	6	123	9	138	36
PROVINCE DE BOULEMANE	92	5	97	5	170	17	142	4	146	4	152	14	234	9	243	9	322	31
PROVINCE DE CHEFCHAOUEN	137	6	143	6	232	20	120	6	126	6	151	32	257	12	269	12	383	52
PROVINCE DE CHICHAOUA	240	35	275	39	406	47	261	13	274	16	308	56	501	48	549	55	714	103
PROVINCE DE CHTOUKA INEZGANE	406	45	451	54	571	66	313	21	334	27	420	67	719	66	785	81	991	133
PROVINCE DE DRIOUCH	85	6	91	6	111	18	67	5	72	5	79	9	152	11	163	11	190	27
PROVINCE DE EL KALAA DES SRAGHNA	480	59	539	68	699	130	1237	24	1261	25	1510	235	1717	83	1800	93	2209	365
PROVINCE DE EL-JADIDA	1276	109	1385	125	2310	158	3877	46	3923	48	6448	151	5153	155	5308	173	8758	309
PROVINCE DE ERRACHIDIA	252	22	274	25	384	55	353	18	371	19	405	65	605	40	645	44	789	120
PROVINCE DE ESSAOUIRA	209	27	236	34	343	51	395	10	405	13	473	25	604	37	641	47	816	76
PROVINCE DE FAHS ANJRA	64	6	70	7	115	9	26	2	28	2	36	4	90	8	98	9	151	13
PROVINCE DE FES	159	13	172	15	255	21	4086	63	4149	63	5642	247	4245	76	4321	78	5897	268
PROVINCE DE FIGUIG	53	12	65	12	101	16	73	2	75	2	71	25	126	14	140	14	172	41
PROVINCE DE FKI H BEN SALAH	475	48	523	52	767	67	1206	21	1227	22	1581	111	1681	69	1750	74	2348	178
PROVINCE DE FNIDEQ	8	0	8	0	17	1	708	8	716	10	935	45	716	8	724	10	952	46
PROVINCE DE GUELIMIM	85	11	96	17	164	26	346	6	352	6	419	30	431	17	448	23	583	56
PROVINCE DE GUERCIF	125	11	136	14	229	22	361	5	366	6	440	32	486	16	502	20	669	54
PROVINCE DE IFRANE	106	3	109	3	185	17	143	3	146	3	182	21	249	6	255	6	367	38
PROVINCE DE INEZGANE	227	8	235	8	299	8	1627	34	1661	36	1725	311	1854	42	1896	44	2024	319
PROVINCE DE JERADA	48	5	53	6	88	12	58	3	61	3	63	19	106	8	114	9	151	31
PROVINCE DE KENITRA	826	80	906	94	1535	85	2723	52	2775	57	3883	164	3549	132	3681	151	5418	249
PROVINCE DE KHEMISSET	561	39	600	54	1060	60	1029	16	1045	18	1314	70	1590	55	1645	72	2374	130
PROVINCE DE KHENIFRA	190	13	203	16	324	24	389	7	396	9	469	65	579	20	599	25	793	89
PROVINCE DE KHOURIBGA	236	22	258	50	452	53	1398	32	1430	32	2012	146	1634	54	1688	82	2464	199
PROVINCE DE LAAYOUNE	30	1	31	1	49	10	743	19	762	19	938	83	773	20	793	20	987	93
PROVINCE DE LARACHE	225	18	243	19	419	33	781	27	808	29	1037	123	1006	45	1051	48	1456	156
PROVINCE DE MARRAKECH	1021	48	1069	49	1385	169	5964	103	6067	105	7213	904	6985	151	7136	154	8598	1073
PROVINCE DE MEDIOUNA	301	9	310	10	447	20	833	14	847	15	1094	38	1134	23	1157	25	1541	58
PROVINCE DE MEKNES	602	51	653	56	1064	70	2400	48	2448	51	3093	296	3002	99	3101	107	4157	366

REPARTITION DES ACCIDENTS ET VICTIMES PAR PROVINCES EN ET HORS AGGLOMERATION

PROVINCE	HORS AGGLOMERATION						EN AGGLOMERATION						TOTAL					
	ACCIDENTS			TUES	BLES LEG	BLES GRAV	ACCIDENTS			TUES	BLES LEG	BLES GRAV	ACCIDENTS			TUES	BLES LEG	BLES GRAV
	N.MOR	MORT	TOTAL				N.MOR	MORT	TOTAL				N.MOR	MORT	TOTAL			
PROVINCE DE MIDELT	174	17	191	19	321	25	265	7	272	7	287	49	439	24	463	26	608	74
PROVINCE DE MOHAMMADIA	727	39	766	43	1110	42	1354	9	1363	10	1776	82	2081	48	2129	53	2886	124
PROVINCE DE MOULEY YAAKOUB	234	17	251	17	400	32	105	0	105	0	155	6	339	17	356	17	555	38
PROVINCE DE NADOR	212	24	236	29	344	23	608	22	630	22	645	98	820	46	866	51	989	121
PROVINCE DE NOUACER	982	29	1011	29	1411	74	481	10	491	10	687	32	1463	39	1502	39	2098	106
PROVINCE DE OUARZAZATE	216	20	236	28	370	49	362	13	375	13	432	48	578	33	611	41	802	97
PROVINCE DE OUAZZANE	122	6	128	6	248	22	168	3	171	3	227	17	290	9	299	9	475	39
PROVINCE DE OUED EDDAHAB	37	4	41	4	71	14	282	12	294	20	305	35	319	16	335	24	376	49
PROVINCE DE OUDJA	118	12	130	12	153	17	1240	33	1273	33	1329	277	1358	45	1403	45	1482	294
PROVINCE DE RHAMNA	186	24	210	28	338	40	19	3	22	3	22	7	205	27	232	31	360	47
PROVINCE DE SAFI	491	44	535	50	823	74	2539	42	2581	43	3689	227	3030	86	3116	93	4512	301
PROVINCE DE SALE	165	9	174	9	294	14	4363	32	4395	35	5824	31	4528	41	4569	44	6118	45
PROVINCE DE SEFROU	197	9	206	11	359	39	400	10	410	11	514	21	597	19	616	22	873	60
PROVINCE DE SETTAT	513	43	556	52	949	66	807	13	820	14	1245	26	1320	56	1376	66	2194	92
PROVINCE DE SIDI BENNOUR	425	34	459	36	786	56	452	13	465	13	591	15	877	47	924	49	1377	71
PROVINCE DE SIDI IFNI	79	5	84	5	114	15	60	0	60	0	75	13	139	5	144	5	189	28
PROVINCE DE SIDI KACEM	384	31	415	34	784	55	362	4	366	4	516	55	746	35	781	38	1300	110
PROVINCE DE SIDI SLIMANE	256	23	279	28	562	36	589	15	604	15	810	71	845	38	883	43	1372	107
PROVINCE DE SMARA	12	1	13	7	24	7	100	0	100	0	103	27	112	1	113	7	127	34
PROVINCE DE TAN TAN	47	9	56	15	63	11	242	4	246	4	287	26	289	13	302	19	350	37
PROVINCE DE TANGER	258	26	284	27	431	36	3583	80	3663	86	4911	401	3841	106	3947	113	5342	437
PROVINCE DE TAOUNATE	270	19	289	23	424	71	181	7	188	8	247	33	451	26	477	31	671	104
PROVINCE DE TAOURIRT	71	10	81	13	135	15	343	9	352	9	411	60	414	19	433	22	546	75
PROVINCE DE TARFAYA	59	8	67	13	108	24	8	0	8	0	25	2	67	8	75	13	133	26
PROVINCE DE TAROUDANT	370	49	419	49	572	53	576	31	607	32	701	88	946	80	1026	81	1273	141
PROVINCE DE TATA	59	6	65	10	102	30	40	4	44	4	40	19	99	10	109	14	142	49
PROVINCE DE TAZA	261	20	281	32	571	41	834	13	847	13	1361	27	1095	33	1128	45	1932	68
PROVINCE DE TEMARA	643	15	658	16	969	73	1490	13	1503	13	1925	24	2133	28	2161	29	2894	97
PROVINCE DE TETOUAN	260	13	273	15	556	38	1141	25	1166	27	1497	72	1401	38	1439	42	2053	110
PROVINCE DE TINGHIR	136	17	153	20	208	45	124	8	132	8	146	31	260	25	285	28	354	76
PROVINCE DE TIZNIT	101	9	110	11	189	23	213	8	221	8	204	59	314	17	331	19	393	82
PROVINCE DE YOUSOUFIA	187	17	204	24	305	23	20	3	23	3	31	3	207	20	227	27	336	26
PROVINCE DE ZAGORA	168	20	188	24	247	38	193	7	200	8	217	48	361	27	388	32	464	86
WILAYA DE GRAND CASABLANCA	262	22	284	23	427	20	22619	224	22843	232	29596	1800	22881	246	23127	255	30023	1820
WILAYA DE RABAT-SALE	123	22	145	22	224	7	5080	55	5135	63	7087	232	5203	77	5280	85	7311	239
TOTAL	20387	1603	21990	1870	34046	2939	90100	1535	91635	1629	119133	7990	110487	3138	113625	3499	153179	10929

Résumé

Le secteur de la logistique routière, au cœur de la Supply Chain, traverse de profondes transformations dans un contexte mondial dominé par l'urgence climatique, la transition numérique et la quête d'une durabilité renforcée. Le Maroc, en tant que hub logistique émergent en Afrique, fait face à trois défis majeurs : réduire les émissions de CO₂ liées au transport routier, sécuriser les flux logistiques, et digitaliser les opérations afin d'en améliorer l'efficacité.

Cette thèse propose une réponse innovante à ces enjeux à travers la conception de la plateforme NW Logistics Tracker. Basée sur l'intelligence artificielle, cette solution intègre des capteurs embarqués, le traitement d'images, des algorithmes d'optimisation et des tableaux de bord intelligents. Elle permet de suivre les indicateurs logistiques, de détecter les infractions routières, et de minimiser l'impact environnemental du transport.

L'approche adoptée repose sur deux fondements : l'étude des technologies d'IA appliquées à la logistique, et la méthodologie DMAIC issue du Lean Six Sigma pour structurer la conception, l'implémentation et l'évaluation du système. Les résultats attendus mettent en lumière la contribution de l'IA à la décarbonation, à la sécurité routière, à la responsabilisation des chauffeurs et à la digitalisation durable de la logistique au Maroc.

Mots-clefs (5) : Intelligence Artificielle, Supply Chain, Logistique Intelligente, Vision par ordinateur, Détection des infractions routières

Abstract

The road logistics sector, at the core of the Supply Chain, is undergoing profound transformations in a global context shaped by climate urgency, digital transition, and the pursuit of enhanced sustainability. As an emerging logistics hub in Africa, Morocco faces three major challenges : reducing CO₂ emissions from road transport, securing logistics flows, and digitizing operations to improve efficiency.

This thesis proposes an innovative response to these challenges through the development of the NW Logistics Tracker platform. Powered by artificial intelligence, this solution integrates embedded sensors, image processing, optimization algorithms, and intelligent dashboards. It enables the monitoring of logistics indicators, the detection of road violations, and the reduction of the environmental impact of transportation.

The adopted approach is based on two pillars: the study of AI technologies applied to logistics, and the DMAIC methodology from Lean Six Sigma to structure the system's design, implementation, and field evaluation. The expected outcomes highlight the contribution of AI to decarbonization, road safety, driver accountability, and the sustainable digital transformation of logistics in Morocco.

Keywords (5) : Artificial Intelligence, Supply Chain, intelligent Logistics, Computer Vision, Road Violation Detection