



HAL
open science

Dimensionnement et typologie d'une flotte de véhicules tenant compte de l'impact environnemental et de la maintenance

Malek Ben Mechlia

► To cite this version:

Malek Ben Mechlia. Dimensionnement et typologie d'une flotte de véhicules tenant compte de l'impact environnemental et de la maintenance. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2021. Français. NNT: 2021LORR0344 . tel-03719650

HAL Id: tel-03719650

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03719650v1>

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Dimensionnement et typologie d'une flotte de véhicules tenant compte de l'impact environnemental et de la maintenance

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 8 Décembre 2021

Pour l'obtention du titre

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Mention : Automatique, Traitement de signal et des images, Génie Informatique

Par

Malek BEN MECHLIA

Membres du Jury :

- Directeur de thèse : M. Sofiene DELLAGI, Maître de Conférences – HDR, Université de Lorraine
- Co-Directeur de thèse : M. Jérémie SCHUTZ, Maître de Conférences, Université de Lorraine
- Président de jury : M. Anis CHELBI, Professeur, École nationale supérieure d'ingénieurs de Tunis
- Rapporteurs : M. Abderrahman EL MHAMDI, Professeur, Université Paris 8
Mme. Zineb SIMEU-ABAZI, Professeur, Université Grenoble Alpes
- Examineur : Mme. Amal GOUIAA-MTIBAA, Maître de Conférences, Université d'Orléans
- Membre Invité : M. Nidhal REZG, Professeur, Directeur de LGIPM, Université de Lorraine
-

« Dis-moi et j'oublie

Enseigne-moi et je me souviens

Fais-moi participer et j'apprends »

Benjamin Franklin

Dédicaces

À mon cher et adorable père

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon affection et mon profond respect.

Vous avez été pour moi la personne idéale et j'ai toujours voué une grande admiration pour votre force de caractère, votre sagesse et votre générosité qui font de vous un père exceptionnel.

Je ferai de mon mieux pour rester un sujet fidèle à vos yeux avec l'espoir de ne jamais vous décevoir.

Puisse Dieu vous garder et vous procurer santé, bonheur et longue vie.

À ma chère et admirable mère

Ma chère mère, aucun mot, aucune expression ne saura faire ressortir toute émotion avec laquelle je vous dédie ce modeste travail, résultat de vos sacrifices démesurés, de vos conseils judicieux, de vos prières, de votre bienveillance, de votre affection et de votre présence permanente.

Que Dieu, le grand puissant vous procure la sincérité et une longue vie saine paisible et heureuse.

À mon cher frère et adorable sœur

Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour dévoué et votre tendresse, pour donner du goût et du sens à ma vie. En témoignage de mon amour et de ma grande affection, je vous prie de trouver dans ce travail l'expression de mon estime et mon sincère attachement. Je prie Dieu, le tout puissant, pour qu'il vous donne bonheur et prospérité

À la Mémoire de mon grand-père

Votre départ m'est très pénible. J'espère avoir atteint le seuil de votre espérance. Que ce travail soit l'expression de ma profonde affection. Je vous remercie pour le soutien moral et l'encouragement que vous m'avez accordés. Que Dieu, garde votre âme dans sa miséricorde.

À la Mémoire de ma grand-mère

Votre départ m'est très pénible. Je suis incapable pour exprimer ma gratitude, ma reconnaissance de m'avoir aimé, protégé et aidé. Mon souhait est que votre âme soit mise au courant de mon succès. Que Dieu, garde votre âme dans sa miséricorde.

À mes amis

Je vous dédie
Ce travail en signe de reconnaissance, de respect et d'amour.
Je vous souhaite beaucoup de succès et bonheur.

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de l'équipe « MPM – Management de la Production et de la Maintenance » du Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance de Metz – UFR MIM.

Exprimer les remerciements reste une tâche assez difficile pour moi, que ce soit à l'oral ou à l'écrit. À défaut de télépathie, je tâcherai d'exprimer ma gratitude en quelques lignes à toutes les personnes qui ont, socialement ou professionnellement, donné à mes résultats une forme plus attrayante. On m'a appris que les remerciements les plus longs sont parfois les moins sincères. Je tâcherai donc d'être concis.

Tout d'abord je remercie le bon Dieu, le tout puissant pour m'avoir donné le courage et la détermination pour bien mener cette thèse.

Je commence par remercier le directeur du Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance (LGIPM) Pr. Nidhal REZG de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Je tiens à remercier conjointement et tout particulièrement mon affable directeur de thèse, Dr. Sofiene DELLAGI, Maître de Conférences / HDR à l'Université de Lorraine pour son encadrement et son soutien qui m'ont permis de mener à bien cette thèse. Je le remercie vivement pour son encouragement et ses conseils prodigieux, pour sa bonne humeur et les conditions favorables qu'il a toujours assurées ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée. Je tiens promptement à exprimer ma profonde reconnaissance envers lui.

Un remerciement très particulier est dédié à mon codirecteur de thèse Dr Jérémie SCHUTZ, Maître de Conférences à l'Université de Lorraine pour son aide inconditionnelle tout au long de ma thèse. C'est grâce à sa bonne humeur que j'ai pu surmonter les situations les plus difficiles. Être encadré par une personne si compétente en quête éternelle d'excellence est pour moi une chance inouïe.

J'adresse aussi mes remerciements à Pr. Anis Chelbi Professeur à l'École Nationale Supérieures d'Ingénieurs de Tunis pour ses conseils et suggestions durant le travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en évaluant mes travaux.

Je tiens aussi à remercier très vivement ma famille et principalement mon cher père Netij BEN MECHLIA pour son soutien, ses conseils et d'avoir été toujours à mes côtés.

Table des matières

Introduction générale.....	10
Chapitre 1 État de l’art et problématique de la thèse.....	14
1.1 Introduction	15
1.2 La maintenance.....	15
1.2.1 Maintenance - Généralités	15
1.2.2 Les types de maintenance.....	16
1.2.3 Les politiques de maintenance.....	22
1.2.4 L’optimisation de la maintenance	24
1.2.5 La dégradation	25
1.3 La logistique	26
1.3.1 La logistique : une revue littéraire, généralité	26
1.3.2 Le concept de la logistique	28
1.3.3 Le concept d’optimisation de la logistique.....	29
1.4 Le concept du couplage.....	31
1.4.1 Généralité	31
1.4.2 Le couplage « Maintenance / Logistique ».....	32
1.4.3 La consommation énergétique.....	34
1.4.4 Contrainte liée à la dégradation environnementale	35
1.5 Positionnement scientifique.....	38
1.6 Objectif général et problématique de la thèse	39
1.7 Conclusion.....	40
Chapitre 2 Dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie d’achat et de revente en fin de mission	42
2.1 Introduction	43
2.2 Description du problème et hypothèses de travail.....	44
2.2.1 Inspiration du problème.....	44
2.2.2 Description de la stratégie	45
2.2.3 Hypothèses de l’étude.....	45
2.2.4 Notations	46
2.3 Étude analytique.....	47
2.3.1 Coût d’acquisition d’un véhicule (C_{Ai})	48
2.3.2 Coût total moyen de maintenance par véhicule (C_{Mi}).....	49
2.3.3 Coût d’exploitation (C_{Oi})	51
2.3.4 Coût de l’impact sur l’environnement (C_{Ei})	53

2.3.5	Valeur de revente d'un véhicule (V_{Ri})	53
2.4	Études numériques	55
2.4.1	Procédure numérique.....	57
2.4.2	Paramètres d'entrées.....	58
2.4.3	Résultats obtenus	59
2.5	Conclusion.....	61
Chapitre 3 Dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie de 'Leasing'		63
3.1	Introduction et étude bibliographique sur le « Leasing »	64
3.2	Description du problème et hypothèse de travail	69
3.2.1	Inspiration du problème.....	69
3.2.2	Description de la stratégie	69
3.2.3	Hypothèses de l'étude.....	70
3.2.4	Notations	70
3.3	Étude analytique	72
3.3.1	Coût de location d'un véhicule (C_{Li}).....	74
3.3.2	Coût total moyen de maintenance par véhicule (C_{Mi}).....	74
3.3.3	Coût moyen d'exploitation (C_{Oi})	75
3.3.4	Coût de l'impact sur l'environnement (C_{Ei})	75
3.4	Études numériques	76
3.4.1	Paramètres d'entrées.....	77
3.4.2	Procédure numérique.....	78
3.4.3	Résultats obtenus	79
3.5	Conclusion	82
Chapitre 4 Dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie d'acquisition avec location en fin de mission avant la revente		84
4.1	Introduction	85
4.2	Description du problème et hypothèses de travail.....	86
4.2.1	Contexte général.....	86
4.2.2	Description de la stratégie	86
4.2.3	Hypothèses de l'étude.....	87
4.2.4	Notations	87
4.3	Étude analytique.....	88
4.3.1	Coût total moyen de maintenance par véhicule (C_{Mi}).....	90
4.3.2	Revenu de la location	92
4.4	Résolution numérique.....	93
4.4.1	Paramètres d'entrées.....	94

4.4.2	Procédure numérique.....	Erreur ! Signet non défini.
4.4.3	Résultats obtenus.....	Erreur ! Signet non défini.
4.4.4	Combinaisons entre les clients potentiels.....	98
4.5	Étude de sensibilité.....	99
4.6	Synthèse des résultats obtenus.....	101
4.7	Conclusion.....	102
	Épilogue – Impact du COVID 19.....	104
	Conclusion générale	110
	Résumé.....	114
	Abstract	115
	Bibliographie.....	116

Liste des Figures

Figure 1.1	Les différents types de maintenances selon [NF EN 13306 X 60-319].....	17
Figure 1.2	Quelques activités de la fonction maintenance.....	18
Figure 1.3	Évolution du taux de défaillance en fonction du type d'action de maintenance appliquée.....	22
Figure 1.4	Séquence d'événements pour la stratégie de maintenance de type âge.....	23
Figure 1.5	Séquence d'événements pour la stratégie de maintenance de type bloc.....	24
Figure 1.6	Équilibre entre la maintenance corrective et préventive.....	24
Figure 1.7	Schématisme d'un modèle à dégradation discrète.....	25
Figure 1.8	Schématisme d'un modèle à dégradation continue.....	26
Figure 2.1	Variation du nombre moyen de pannes.....	51
Figure 2.2	Flowchart de la procédure numérique développée.....	57
Figure 2.3	Résultats de la méta-heuristique utilisée.....	59
Figure 3.1	Flowchart de la procédure numérique développée.....	78
Figure 4.1	Flowchart de la procédure numérique développée.....	96
Figure A	Évolution du taux de défaillance des véhicules par type i en tenant compte de la période de confinement.....	105

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Les phases d'évolution de la chaîne logistique.....	29
Tableau 1.2	Tableau de synthèse des articles.....	37
Tableau 1.3	Positionnement scientifique.....	38
Tableau 2.1	La décote moyenne des véhicules neufs par an.....	54
Tableau 2.2	Paramètres d'entrées.....	58
Tableau 2.3	Paramètres de la distribution de Weibull.....	59
Tableau 2.4	Résultats obtenus.....	60
Tableau 3.1	Paramètres d'entrées.....	79
Tableau 3.2	Résultats obtenus.....	80
Tableau 3.3	Impact du coût unitaire du (CO_2) sur le modèle.....	81
Tableau 4.1	Données numériques.....	94
Tableau 4.2	Paramètres de la distribution de dégradation des véhicules « Weibull ».....	94
Tableau 4.3	Demande des clients.....	95
Tableau 4.4	Résultats des coûts obtenus.....	97
Tableau 4.5	Impact du (T_i) sur la (V_R) pour le cas : véhicule électrique.....	98
Tableau 4.6	Coûts obtenus en tenant compte de la diminution de (T_2).....	98
Tableau 4.7	Meilleures combinaisons possibles des clients pour chaque véhicule de type (i)	99
Tableau 4.8	Étude de sensibilité basée sur une variation du taux d'utilisation ($v_{(i,j)}$).....	100
Tableau 4.9	Coûts obtenus pour des combinaisons de véhicules à carburant en tenant compte des variations du taux d'utilisation.....	100
Tableau 4.10	Coûts obtenus pour des combinaisons de véhicules électriques en tenant compte des variations du taux d'utilisation.....	101
Tableau A	Résultats numériques en tenant compte du confinement.....	108

Introduction générale

Face à un développement rapide de la conjoncture économique actuelle, les entreprises se trouvent dans l'obligation d'adopter de nouvelles stratégies qui leur permettent de faire face aux différentes contraintes fluctuantes du monde économique. En effet, la globalisation des marchés concurrentiels et la mondialisation des échanges ont imposé de nouveaux défis à relever, et ce, dans le but de satisfaire impérativement les exigences des clients tout en assurant conjointement le meilleur service et la minimisation des coûts.

Dans cette perspective, les décideurs du secteur industriel disposent de diverses méthodes afin de prendre des décisions qui demeurent primordiales pour garantir, non seulement la longévité et la pérennité de l'entreprise, mais également l'amélioration des performances de la chaîne logistique associée.

De ce fait, la disponibilité des moyens de transport aux missions affectées est aujourd'hui une pratique omniprésente et de plus en plus répandue. Toutefois, développer de nouvelles stratégies se basant sur le concept de la conjonction entre les caractéristiques des moyens de transport (type, consommation) et les stratégies de maintenance associées à ces derniers selon leurs éventuelles dégradations, demeure une pratique très intéressante pour assurer l'accord « gagnant-gagnant » entre le prestataire et le demandeur de service.

Dans ce cadre, plusieurs travaux sont actuellement développés autour de la thématique de l'intégration, de la maintenance et de la logistique. Plus précisément, ces travaux se concentrent sur les activités de transport, depuis qu'il a été prouvé l'efficacité et la pertinence d'une telle approche, non seulement sur la performance globale du réseau logistique, mais aussi sur l'optimisation de la réponse à certaines contraintes critiques tels que le coût, la disponibilité des moyens du transport et l'impact sur l'environnement.

En revanche, force est de constater que certaines contraintes, telles que le type du moyen de transport, influent crucialement sur le coût total de fonctionnement. Il s'avère ainsi nécessaire d'examiner de nouvelles pistes de recherche, afin d'étudier l'impact de ce phénomène, non seulement sur l'intégration de la maintenance à la logistique, mais aussi sur le choix du moyen ou type de transport en intégrant l'impact environnemental de ces derniers.

En d'autres termes, le bon choix d'un moyen ou d'un mode de transport, joue également un rôle prépondérant dans l'optimisation conjointe des objectifs déjà fixés, ce qui constitue un enjeu stratégique pour combler de nombreuses lacunes logistiques touchant principalement l'optimisation d'un parc de véhicules.

Généralement, les différents travaux de recherche qui traitent du couplage « maintenance / logistique » présentent différentes stratégies de maintenance pour un parc de véhicules existant. À cet égard, nous avons développé de nouvelles stratégies où nous nous intéressons simultanément au dimensionnement économique d'un parc de véhicules hétérogènes et à l'établissement du plan de maintenance optimal adapté au parc établi tout en tenant compte des contraintes environnementales liées principalement à la typologie des véhicules.

En effet, ce travail est une continuité d'un travail de recherche basé sur la notion d'intégration de la maintenance à la logistique, et ce, afin de mettre en évidence le critère de choix d'un moyen de transport idéal. Nous avons ainsi choisi de modéliser l'impact environnemental sous forme de pénalités où ces dernières seraient imputées à la suite du non-respect de l'environnement exigé par la législation.

Dans cette perspective, nous nous sommes focalisés, dans cette thèse, à développer des modèles analytiques qui seraient en mesure d'aider à trouver la balance optimale entre le nombre optimal de véhicules à acquérir pour effectuer des missions et les différents coûts prévus tout en respectant les objectifs fixés. L'originalité de cette étude réside donc dans la détermination simultanée du dimensionnement du parc de véhicules à exploiter, leurs durées d'utilisation, ainsi que le plan de maintenance des véhicules.

Ainsi, ce travail vise le dimensionnement d'une flotte de véhicules pour assurer une mission logistique tout en mettant en évidence la relation fondamentale entre le nombre de véhicules à exploiter et la typologie (ou la technologie envisagée) en respectant plusieurs contraintes opérationnelles. Notre démarche consiste, alors, à définir analytiquement des fonctions objectives basées sur des paramètres liés à l'acquisition, la maintenance, la consommation, l'exploitation et l'impact sur l'environnement. Différentes stratégies concernant la revente des véhicules pourront être envisagées : revente immédiate à la fin des missions, mise en place d'une location des véhicules avant leurs reventes. De même, l'hypothèse d'acquisition des véhicules pourra être relaxée afin d'envisager d'autres options telles que la location longue durée « leasing ». La décision stratégique étudiée dans cette thèse consiste à trouver un enjeu économique entre les différentes stratégies de dimensionnement d'un parc de véhicules. Il est clair que le nombre de véhicules par type, liés à leurs taux d'utilisation, et l'impact de cette utilisation sur l'environnement, la périodicité des actions de maintenance, ainsi que les différents coûts relatifs au fonctionnement seront les facteurs fondamentaux de notre étude. Formellement, la mise en équation de cette problématique nous mène à développer de nouvelles stratégies dans le but de dimensionner un parc de véhicules. Ces stratégies seront présentées et modélisées analytiquement au cours des différents chapitres de ce manuscrit.

Ce travail sera scindé de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation de l'état de l'art, avec une première partie où les notions fondamentales relatives à la maintenance seront rappelées. Par la suite, un état de l'art relatif au domaine de la logistique, ainsi qu'une présentation des travaux de recherche qui brosse un portrait détaillé des problèmes de transport seront présentés. Ces deux parties permettront de se focaliser sur l'approche d'intégration de la maintenance à la logistique. Par la suite, les travaux présentés dans ce chapitre seront dédiés à l'étude de la consommation énergétique selon le type de véhicule dans le but d'étudier l'influence d'une telle notion sur la stratégie adoptée. Dans une dernière partie, nous présenterons une description de notre terrain d'étude ainsi que la problématique posée par notre travail de recherche.

Au sein du deuxième chapitre, nous développerons un modèle analytique qui permettra de dimensionner un parc de véhicules en tenant compte de diverses contraintes opérationnelles, telles que l'exploitation, la fiabilité, l'impact sur l'environnement et la durée de possession pour chaque véhicule. En effet, l'étude proposée dans cette thèse est un cas typique d'une entreprise de logistique ayant pour but d'acquérir plusieurs véhicules de typologies différentes, afin de satisfaire des missions de transport sur un horizon de temps fini. À ce titre, ce chapitre sera axé sur une stratégie d'achat et de revente en fin de mission. Dans cette stratégie, nous nous baserons sur deux types de véhicules (à carburant et électrique) qui se différencieront notamment au niveau de la fiabilité, de la consommation, du coût d'acquisition et des impacts sur l'environnement. Pour cette stratégie, il conviendra de déterminer simultanément le nombre optimal de véhicules de chaque type d'énergie à acquérir ainsi que leurs durées d'utilisation, la périodicité des actions de maintenance ainsi que leur taux d'utilisation. Formellement, ces paramètres représenteront nos variables de décision pour ce chapitre. De plus, nous intégrerons dans la fonction objective les coûts de revente de chaque type de véhicule, calculés à partir du coût d'acquisition et en fonction de la dépréciation basée sur l'âge et le type de chaque de véhicule. À part les variables de décisions citées, les durées de conservation concernant chaque type de véhicule se rajouteront comme variables de décision supplémentaires. On note que pour cette stratégie, nous nous baserons sur un exemple concret de deux marques de véhicules utilitaires (Renault et Nissan) et pour chacune d'entre elles, deux types d'énergie (électrique et à carburant). Un exemple numérique, se basant sur des méthodes et des techniques d'optimisation, sera présenté afin de déterminer le dimensionnement optimal. Pour mémoire, depuis le début de l'année 2020, une pandémie mondiale, provoquée par le virus de la COVID-19, a impacté négativement l'activité économique dans le monde entier. L'instauration de nombreuses mesures sanitaires telles que les confinements, l'isolement de pays et la minimisation des déplacements entre régions ont eu des conséquences indéniables sur les programmes de maintenance, impactant ainsi certains domaines de la logistique. L'impossibilité de mener correctement les activités de maintenance préventive planifiées pendant le confinement fait évoluer défavorablement le taux de défaillance des véhicules acquis. À cet égard, nous proposerons une extension de notre travail pour laquelle l'horizon dédié à la réalisation de la mission comportera une période (de confinement) durant laquelle aucune action préventive ne pourra être réalisée. À l'issue de cette période de confinement, une nouvelle périodicité des actions de maintenance préventive sera déterminée.

Dans le troisième chapitre, la problématique restera assez similaire avec celle abordée au cours du deuxième chapitre, à la différence que la stratégie d'achat et de revente des véhicules sera remplacée par une stratégie de location longue durée. Concrètement, le coût d'investissement des véhicules et leurs valeurs de revente seront considérés en tant que coût de location permettant ainsi de dimensionner le parc de véhicules selon une stratégie de « *leasing* ». De ce fait, nous éliminerons dans cette stratégie la dépréciation de la valeur de véhicule en fin de mission. Nonobstant, nous ajouterons de nouvelles contraintes pour être au plus proche de la réalité telles qu'une durée minimum de service des véhicules à louer (seuil fixé dans le contrat de « *leasing* »). Les variables de décision caractérisant cette stratégie sont donc le nombre optimal de véhicules de chaque type d'énergie à louer en fonction du nombre de mois d'utilisation et la périodicité des actions de maintenance. Comme la stratégie étudiée dans le chapitre précédent, celle-ci va être étudiée sur un horizon fini et à cet égard, un modèle

analytique va être défini. Une procédure numérique sera présentée afin de déterminer le dimensionnement en utilisant ce concept de « *leasing* » et ainsi étudier l'impact de certaines contraintes opérationnelles sur la solution optimale.

Dans le quatrième chapitre, notre étude concernera toujours le dimensionnement d'un parc de véhicules, mais en considérant, cette fois, le concept d'acquisition avec mise à disposition auprès de clients potentiels (location), en fin de mission, avant la revente. Ce chapitre pourra être considéré comme une suite du travail de la première stratégie proposée. En effet, à l'issue de la mission réalisée avec un parc de véhicules optimisé (nombre et typologie optimaux), il est possible de mettre ces véhicules à disposition de plusieurs locataires. Chaque locataire, également appelé client, peut indiquer le nombre de véhicules requis ainsi que la période de location souhaitée. Ainsi, un modèle analytique est développé dans le but de déterminer la stratégie la plus économique entre la revente des véhicules après la réalisation de la mission ou la mise à disposition de certains véhicules à des clients avant de revendre ces derniers. Bien évidemment, l'impact de la dégradation des véhicules, le coût de maintenance correspondant ainsi que la diminution de la valeur de revente liée à la période de location seront pris en considération dans la décision définitive. Ce modèle nécessitera des outils d'aide à la décision pour sélectionner les clients à privilégier.

Enfin, une conclusion générale et des perspectives seront présentées à la fin de ce manuscrit.

Les travaux présentés dans cette thèse ont fait l'objet de trois conférences internationales (ECMR 2018, MOSIM 2020 et IEOM 2022 (accepted)) et une revue scientifique (M. Ben Mechlia et al. (2021)) acceptée dans le journal (MDPI - Sustainability).

Chapitre 1

État de l'art et problématique de la thèse

Résumé

Dans ce chapitre, une introduction et un état de l'art sur les différents types et politiques de maintenances seront présentés. Une étude bibliographique est effectuée afin de situer les différents articles et travaux de cette thèse par rapport à la littérature. Cette étude bibliographique nous permettra de mettre en évidence les lacunes encore présentes dans la relation entre la maintenance et la logistique. Nous présenterons, par la suite, les principaux travaux qui se sont intéressés à la logistique et nous nous focaliserons en particulier sur les problèmes liés au transport et aux tournées de véhicules. Nous présenterons également dans ce chapitre les travaux qui abordent la notion du couplage, et en particulier, le couplage maintenance / logistique. De plus, nous nous intéresserons aux aspects écologiques et environnementaux qui seront pris en considération dans la problématique proposée de cette thèse. Enfin, ce chapitre s'achèvera par une présentation de la problématique et les objectifs de nos travaux de thèse.

1.1 Introduction

Malgré un couplage entre les domaines de la gestion et de l'organisation logistique, les entreprises de ce domaine rencontrent encore des difficultés à atteindre leurs objectifs et buts économiques. Ces entreprises cherchent à réduire les coûts, à augmenter la disponibilité de leurs moyens de transport, à optimiser leurs plans opérationnels et à satisfaire la clientèle. Certaines de ces entreprises ne cessent de développer de nouvelles méthodes et stratégies pour faire face aux défis économiques.

Ainsi, l'exploitation des moyens de transport selon leurs disponibilités, avec une réduction de coût de services, reste un des problèmes qui attirent l'attention de plusieurs chercheurs. Nous pouvons citer, par exemple [Benoist et al., 2010], [Rezg et al. 2014], [Dhahri et al. 2015], [Ndhaief et al. 2017], [Jbili et al. 2018]. Ces auteurs ont contribué, dans la plupart de leurs travaux, à la proposition d'un plan économique conjoint entre la logistique de transport et la maintenance des moyens de transport. En effet, un parc de véhicules est généralement sujet à des coûts variables dépendants de l'état et du nombre des véhicules, des plans de maintenance et de livraison. Le vieillissement, et par conséquent les pannes des véhicules, les durées aléatoires de maintenance, les coûts d'exploitation ainsi que l'impact sur l'environnement sont des exemples de ces coûts variables observés dans les indicateurs d'un parc automobile.

Ce premier chapitre présentera, dans un premier temps, un état de l'art de la littérature scientifique traitant des thématiques de la maintenance, et plus précisément, de ses différents types et stratégies. Par la suite, nous nous focaliserons sur les récents travaux de recherches portant sur le couplage maintenance / logistique de transport. On abordera également les travaux traitant de l'impact de la sollicitation de différents types de moyens de transport sur l'environnement. Enfin, une synthèse bibliographique nous permettra de nous positionner par rapport aux travaux existants afin de présenter l'objectif général et la problématique de la thèse dans la dernière phase de ce chapitre.

1.2 La maintenance

1.2.1 Maintenance - Généralités

La première définition normative de la maintenance a été définie par l'AFNOR en 1994 [norme NFX 60-010] comme étant un « ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». Elle a été remplacée par une nouvelle définition, en 2010, par la norme Française [NF EN 13306] comme étant un « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle

de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » [EN NF 13306 – X60-319,2001].

Dans cette définition présentée par la Norme Française ; nous trouvons trois notions clés : « maintenir », « rétablir » et « un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». La première notion « maintenir » fait référence à la notion de surveillance et le suivi, et par conséquent, à la notion de la maintenance préventive. La deuxième notion « Rétablir » fait référence à une activité corrective pour réagir juste après l'occurrence d'une panne. La troisième notion fait référence à l'état du bien après avoir effectué une action de maintenance (préventive ou corrective). Pour garder un équipement en état de fonctionnement et garantir notamment un taux élevé de sa disponibilité, réaliser des actions de maintenance constitue une étape indispensable pour garantir une fiabilité et une durée de vie importante de l'équipement. En effet, selon [EN NF FD – X60-000,2002] « La maintenance du bien, d'une fonction technique remplie par ce bien à assurer ou d'un système productif dans sa globalité (à l'exclusion de la maintenance des logiciels informatiques) ».

1.2.2 Les types de maintenance

La littérature liée à la maintenance est riche et les premiers travaux se sont focalisés sur les activités de maintenance réparties suivant deux catégories : la maintenance préventive et la maintenance corrective.

➤ La maintenance préventive

La maintenance préventive est définie par la norme [NF EN 13306] comme des actions de maintenance exécutées à intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. À partir de cette définition générale, on distingue quatre variantes de maintenance préventive : systématique, programmée, conditionnelle et prévisionnelle.

- Maintenance préventive systématique : définie selon la norme [NF EN 13306] par une maintenance préventive exécutée à intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unité d'usage, mais sans contrôle préalable de l'état du bien. Ce type de maintenance est très pratiqué dans le monde industriel.
- Maintenance préventive programmée : maintenance préventive exécutée selon un calendrier préétabli ou selon un nombre défini d'unités d'usage
- Maintenance préventive conditionnelle : définit selon la norme [NF EN 13306] par maintenance préventive qui comprend une combinaison de surveillance en fonctionnement et/ou d'inspection et/ou d'essai, d'analyse et les actions de maintenance qui en découlent.

Cette maintenance est considérée comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite. Elle est basée sur une surveillance et un suivi des paramètres significatifs du fonctionnement du bien afin de qualifier d'une façon précise l'état du bien afin d'optimiser les actions de maintenance et intervenir uniquement lorsque cela s'avère nécessaire. La surveillance en fonctionnement et/ou d'inspection et/ou d'essai peut être programmée, sur demande ou continue.

- Maintenance préventive prévisionnelle : définie selon la norme précitée par maintenance conditionnelle exécutée à la suite d'une prévision obtenue grâce à une analyse répétée ou à des caractéristiques connues et une évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien.

➤ **La maintenance corrective**

Selon la norme [NF EN 13306], la maintenance corrective est une action de maintenance exécutée juste après la détection d'une panne dont l'objectif consiste à remettre un équipement dans son état fonctionnel afin d'accomplir sa mission. De plus, il existe deux variantes de maintenance corrective :

- Maintenance corrective différée : c'est l'action de maintenance corrective qui n'est pas exécutée dès la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données. Une action de maintenance corrective différée peut être programmée.
- Maintenance corrective immédiate ou d'urgence : maintenance corrective qui est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables.

La figure suivante résume les différentes catégories mentionnées précédemment.

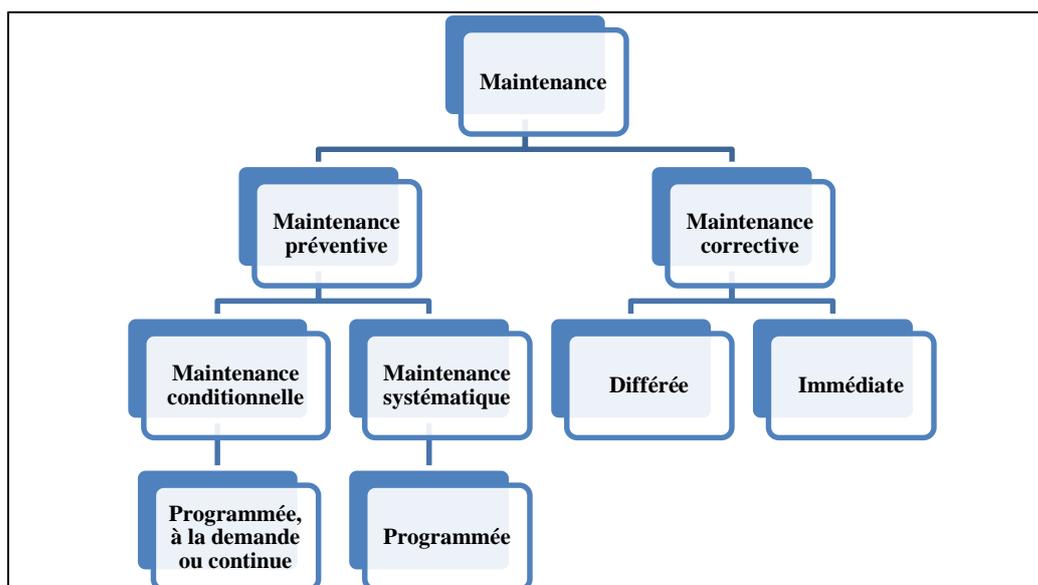


Figure 1.1 - Les différents types de maintenances selon [NF EN 13306 X 60-319]

En définissant les différents types de maintenance, la fonction maintenance requiert à la fois des activités de management et de gestion d'une part, des activités techniques et des compétences métiers d'autre part. Les activités techniques contiennent, à titre d'exemple, des actions de dépannage, diagnostic, réparation et prévention. Les activités de management et de gestion s'articulent principalement autour de la gestion des ressources, de budget, des interventions, d'information et de la documentation.

Pour bien comprendre la fonction maintenance, la figure suivante (Figure 1.2) résume les différents types d'activités.

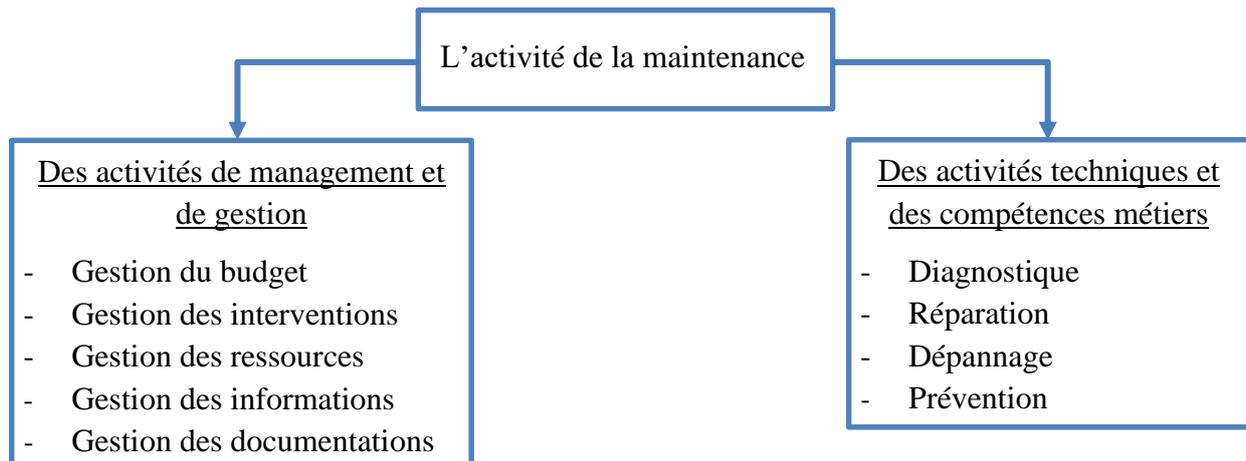


Figure 1.2 - Quelques activités de la fonction maintenance

La troisième notion très importante évoquée par la définition donnée par la norme AFNOR est « l'état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Cette notion fait référence à l'état de l'équipement à la suite d'une action de maintenance corrective ou préventive. En effet, l'état de l'équipement après une action de maintenance détermine le type de l'action effectuée. Dans la littérature, trois types d'action de maintenance ont été distingués : la maintenance parfaite, minimale et imparfaite.

- Maintenance parfaite :

Après une action de maintenance parfaite, l'équipement est restauré dans un état similaire à un état neuf comme cela est régulièrement utilisé dans la littérature par l'acronyme (A.G.A.N.) « *As Good As New* ». Dans ce cas, la fonction du taux de défaillance ainsi que la distribution des durées de vie sont les mêmes que celles d'une nouvelle unité. Par exemple, la révision complète d'un moteur ayant un piston cassé peut-être considérée comme une réparation parfaite.

- Maintenance minimale :

Cette action de maintenance a pour but de restaurer l'équipement dans un état utilisable et plus précisément dans l'état qui précède la défaillance. Cet état est connu par son acronyme (A.B.A.O.) qui signifie « *As Bad As Old* ». La particularité de ce type de maintenance réside, qu'après chaque action de maintenance minimale, le taux de défaillance reste invariable. De ce fait, ce type de maintenance minimale n'est utilisé que pour modéliser des actions de maintenance corrective. Par exemple, selon [Pham et Wang, 1996] le changement d'une courroie de ventilateur brisée d'un moteur ou le changement d'un pneu à plat d'un véhicule peuvent être considérées comme des actions de maintenance minimale vu que le nombre moyen de pannes de l'équipement reste invariable.

- Maintenance imparfaite :

Ce type d'action de maintenance ne restaure pas l'équipement à l'état neuf, mais à un état entre « *As Good As New* » et « *As Bad As Old* ». Prenons comme exemple la mise au point d'un moteur d'une voiture juste après une révision complète de ce dernier. Cette tâche est considérée comme une action de maintenance imparfaite vu qu'elle améliore sa performance. De plus, selon [Brown et Proshan, 1983], il existe plusieurs causes qui représentent l'apparition d'une action de maintenance imparfaite : la réparation partielle ou totale d'une pièce défectueuse, et aussi le choix du moment de l'intervention.

Dans le même cadre, plusieurs chercheurs ont étudié la maintenance imparfaite tout en utilisant différentes méthodes de modélisation. Les méthodes présentées dans la littérature peuvent être classées en trois catégories : les méthodes basées sur une réduction arithmétique d'âge, les méthodes basées sur une réduction du taux de défaillance et les modèles hybrides qui représentent une combinaison entre les deux méthodes citées.

Selon différentes autres recherches réalisées pour ces maintenances de type imparfaites, nous pouvons citer aussi les travaux de [Nakagawa, 1979, a, b]. En effet, l'auteur a considéré dans son travail qu'à la suite d'une action de maintenance, l'équipement peut être restauré à l'état parfait avec une probabilité p et à l'état minimal avec la probabilité complémentaire ($q = 1 - p$). Si ($p = 0$), l'action effectuée coïncide avec une action minimale et si ($p = 1$), l'action effectuée coïncide avec une maintenance préventive parfaite. Dans ce cas, les actions de maintenance préventive parfaite et minimale peuvent être considérées comme des cas particuliers de la maintenance préventive imparfaite. En se référant à ce modèle de maintenance préventive imparfaite, [Nakagawa, 1979, c] a proposé une stratégie de maintenance préventive

optimale qui minimise le coût total de maintenance pour un « *one unit* » système de production pour les deux politiques de type bloc et âge.

De leur côté [Brown and Proshan, 1983] ont considéré le même modèle que celui défini par [Nakagawa, 1979], mais cette fois-ci en se focalisant sur les actions de maintenance corrective. En effet, une action de maintenance corrective est effectuée chaque fois que l'équipement tombe en panne. Cette action de maintenance corrective peut être parfaite avec une probabilité p ou de type minimal avec la probabilité complémentaire ($q = 1 - p$) tout en négligeant les durées des actions de maintenance corrective. Les auteurs ont obtenu un résultat probant : si F représente la fonction de distribution de l'équipement et r son taux de défaillance alors cette fonction de distribution correspondante à la durée entre deux actions de maintenance corrective parfaites s'exprime par : $F_p = 1 - (1 - F)^p$ et le taux de défaillance associé : $r_p = pr$ (où p représente la probabilité que la maintenance corrective soit parfaite).

Dans le même cadre, [Wang et Pham, 1996] ont réussi à partir des derniers résultats obtenus à modéliser des politiques de maintenance optimales pour un système de production. Une extension de cette méthode a été proposée par [Block et al. 1985] sous l'intitulé de « $(p(t), q(t))$ Rule ». En effet, les auteurs considèrent que l'action de maintenance corrective est parfaite avec une probabilité $p(t)$ et minimale avec une probabilité complémentaire $q(t) = 1 - p(t)$.

En outre, [Brown et Proshan, 1983] et [Block et al. 1985] supposent, dans leurs modèles proposés, la négligeabilité de la durée des actions de maintenance corrective. Cette hypothèse a été optimisée, quelque année plus tard, par [Iyer, 1992] qui a étudié la « $(p(t), q(t))$ Rule » en tenant compte des durées des actions de maintenance corrective.

Par ailleurs, [Nagakawa, 1988a] a développé une approche qui repose sur la modification du taux de défaillance. Cette approche se caractérise par le fait qu'après chaque action de maintenance préventive imparfaite, une augmentation de l'intensité de la fonction de taux de défaillance est considérée. Plus précisément, le taux de défaillance est ramené à la valeur zéro comme si l'équipement est restauré à l'état neuf à cet instant précis, mais l'évolution de la variation de taux de défaillance n'est plus identique. Autrement dit, le nombre moyen de pannes durant $]T, 2T]$ est supérieur à celui durant $[0, T]$, où T est l'instant auquel l'action de maintenance préventive est effectuée. Précisément :

$$\lambda_1(t = 0) = \lambda_2(t = T) = \lambda_3(t = 2T) = 0$$

$$\lambda_1(t) < \lambda_2(t) < \lambda_3(t); \forall t > 0$$

Avec :

- $\lambda_1(t)$: nombre moyen de panne durant $[0, T]$
- $\lambda_2(t)$: nombre moyen de panne durant $]T, 2T]$
- $\lambda_3(t)$: nombre moyen de panne durant $]2T, 3T]$

Dans la même thématique, [Chan et Shaw, 1993] ont étudié une autre approche de modification de taux de défaillance. Ce dernier travail se caractérise par une réduction du taux de défaillance après chaque action de maintenance préventive.

En outre, cette réduction de l'intensité de défaillance dépend de l'âge de l'équipement concerné ainsi que du nombre des actions de maintenance. De plus, deux types de réduction du taux de défaillance ont été présentés :

- ✓ L'intensité de défaillance sera réduite d'une quantité constante après chaque action de maintenance.
- ✓ L'intensité de défaillance sera réduite d'une quantité proportionnelle à sa valeur juste avant la défaillance.

De son côté, [Malik, 1979] a proposé la notion de maintenance imparfaite basée sur l'âge virtuel. En fait, cette notion consiste à supposer qu'après la $i^{\text{ème}}$ action de maintenance, l'équipement fonctionne comme un équipement neuf qui aurait vécu un âge A_i sans être tombé en panne. Cet âge A_i est appelé l'âge effectif.

En se basant sur cette réflexion, [Kijima, 1988] a présenté deux catégories de modèles d'âge virtuel, connus dans la littérature sous le nom de modèles de Kijima type I et type II.

- ❖ Modèle Kijima de type I [Kijima, 1988] : l'effet de la $i^{\text{ème}}$ maintenance consiste à réduire l'âge virtuel de l'équipement avant la défaillance ($A_{i-1} + X_i$) d'une quantité proportionnelle à la durée écoulée depuis la dernière maintenance ($B_i \cdot X_i$, avec $B_i \in [0,1]$). Analytiquement, l'âge du système est donné par :

$$A_i = A_{i-1} + (1 - B_i) \cdot X_i ; \forall i \geq 1$$

Où :

- X_i : Durée entre la $(i - 1)^{\text{ème}}$ maintenance et la $i^{\text{ème}}$ maintenance.
- B_i : Facteur de réduction de la durée X_i .
- ❖ Modèle Kijima de type II [Kijima, 1989] : l'effet de la $i^{\text{ème}}$ maintenance consiste à réduire l'âge virtuel global de l'équipement d'une quantité qui lui est proportionnelle (B_i , avec $B_i \in [0,1]$). Analytiquement, l'âge du système est donné par :

$$A_i = (1 - B_i) \cdot (A_{i-1} + X_i) ; \forall i \geq 1$$

Pour ces deux types de modèle, B_i représente l'efficacité de l'action de maintenance. Si tous les ($B_i = 1$), les actions de maintenance effectuées sont parfaites (*As Good As New*). Au contraire, si tous les ($B_i = 0$), les actions de maintenance effectuées sont minimales (*As Bad As Old*).

Par ailleurs, [Doyen and Gaudoin, 2004] ont proposé une classe de modèle dont le principe est que la réduction de l'âge dépend de l'effet des m dernières maintenances. Ce modèle dit à réduction arithmétique de l'âge de mémoire m (ARA_m) où m correspond au nombre maximal d'instantants de défaillance précédents qui peuvent influencer l'intensité de défaillance.

La figure suivante résume l'évolution du taux de défaillance en fonction du type de l'action de maintenance appliquée.

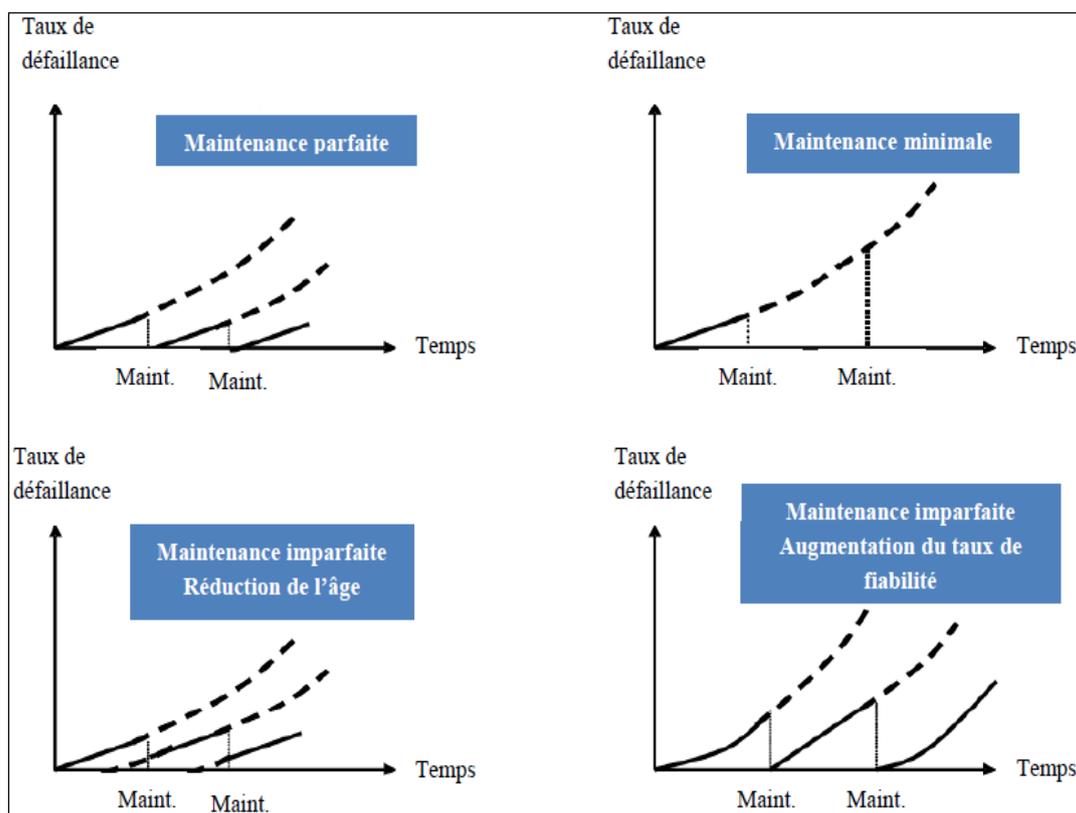


Figure 1.3 - Évolution du taux de défaillance en fonction du type d'action de maintenance appliquée

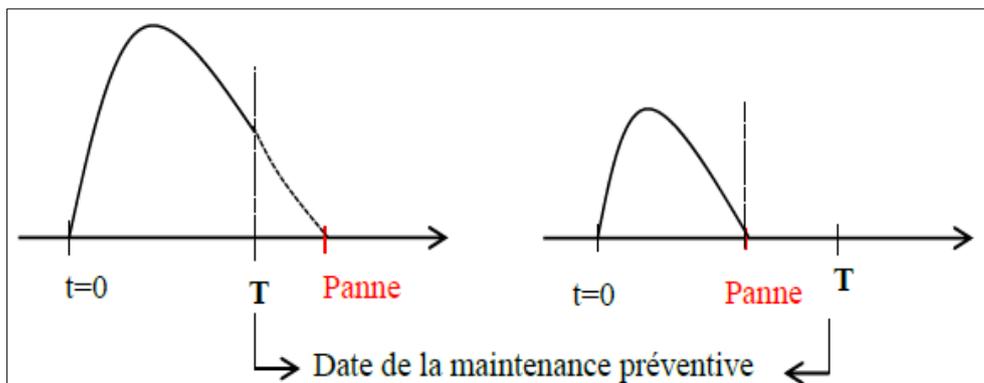
1.2.3 Les politiques de maintenance

Il faut reconnaître que les travaux liés aux politiques de maintenance ont débuté avec [Barlow and Hunter, 1960] qui étaient les premiers à s'intéresser à la distinction des différentes politiques de maintenance. [Mkabe and Morimura, 1963] ont introduit d'autres politiques à celle proposées par Barlow et Hunter. Par exemple, ils ont abordé la notion de politique de maintenance basée sur un nombre maximal de réparations effectuées où leur objectif consistait

à déterminer le nombre de défaillance, noté k , avant un remplacement. En effet, après les $(k - 1)$ premières défaillances, une action de réparation minimale est effectuée puis, après la $k^{\text{ème}}$ défaillance, une action de remplacement a lieu. Dans le même cadre, une extension du même travail a été proposé par [Morimura, 1969] où l'auteur introduit une nouvelle variable de décision T (temps de référence) en plus de la variable de décision k . Selon cette nouvelle politique, les $(k - 1)$ premières défaillances seront corrigées avec une action de réparation minimale. Si la $k^{\text{ème}}$ défaillance a eu lieu après le temps de bon fonctionnement cumulé T , une action de réparation sera effectuée. Mais si la $k^{\text{ème}}$ défaillance a eu lieu avant T , elle sera corrigée avec une action de réparation minimale et une action de remplacement sera effectuée après la $(k + 1)^{\text{ème}}$ panne.

Au fil des années, les chercheurs ont défini comme objectifs à atteindre, la réduction des coûts des actions de maintenance corrective. En effet, [Barlow and Proschan, 1963] ont proposé une politique basée sur l'âge, qui consiste à effectuer un remplacement correctif en cas de défaillance de l'équipement ou effectuer un remplacement préventif seulement si ce dernier atteint un âge T sans défaillance.

La figure ci-dessous représente une séquence d'évènements pour la stratégie de maintenance de type âge où un instant de panne est généré suivant une fonction aléatoire.



Remplacement dans le cas d'une maintenance préventive '**Panne > T**'

Remplacement en cas de panne '**Panne < T**'

Figure 1.4 - Séquence d'évènements pour la stratégie de maintenance de type âge

[Nakagawa, 1979] a proposé une autre politique de remplacement, connue sous le nom de « type bloc » et qui consiste à exécuter des remplacements périodiques planifiés suivant des intervalles de temps prédéterminés. L'existence d'une panne entre les périodes de maintenance exige une intervention avec une maintenance corrective. La politique de maintenance de type bloc, est indépendante de l'âge et de l'état de l'équipement. Plus précisément, la défaillance d'un équipement engendre sa réparation, sans pour autant entraîner une modification au niveau

du plan de maintenance préventive. Le déroulement de la stratégie de maintenance de type bloc est illustré par la figure ci-dessous :

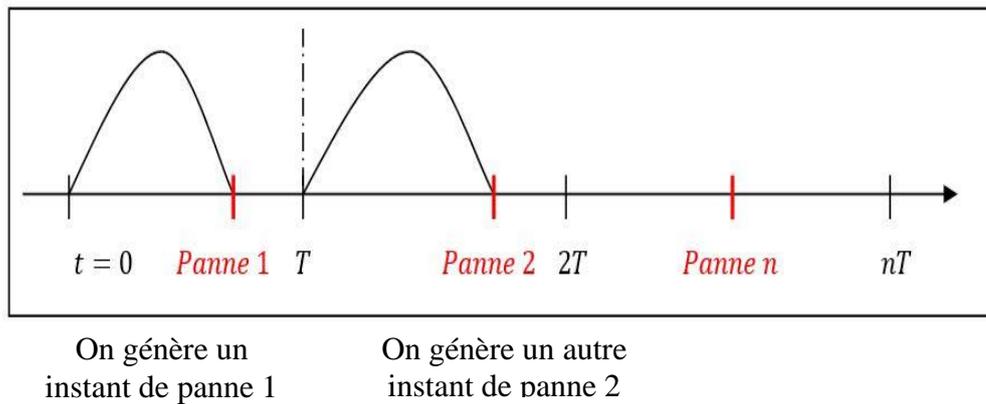


Figure 1.5 - Séquence d'événements pour la stratégie de maintenance de type bloc

Dans la même thématique, [Shaked and Li, 2003] ont intégré les deux politiques de maintenance (âge, bloc) dans le cadre de réparations imparfaites.

1.2.4 L'optimisation de la maintenance

L'optimisation de la maintenance a pour but de trouver la balance optimale entre la maintenance corrective et la maintenance préventive tout en respectant les objectifs fixés (maximisation de la disponibilité des équipements, minimisation des coûts des maintenance, satisfaction des clients, etc.).

La figure 1.6 illustre les effets de la fréquence des actions des maintenances correctives et préventives sur leurs coûts ainsi que le coût total. En réalité, l'augmentation du nombre des actions de maintenance préventive permet de diminuer les effets indésirables engendrés par les pannes, mais peut générer une augmentation du coût total du système. Sur cette base, il est donc nécessaire de bien choisir les instants des actions préventives afin de trouver un équilibre optimal qui permet d'obtenir un coût minimal d'exploitation.

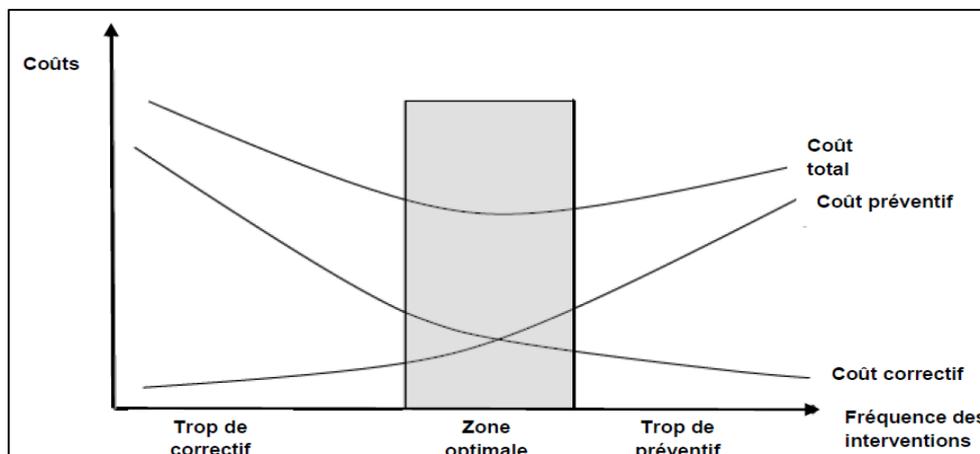


Figure 1.6 - Équilibre entre la maintenance corrective et préventive

1.2.5 La dégradation

Au fil du temps, tout équipement ou moyen de transport se dégrade selon l'usage et/ou l'âge. D'après l'AFNOR [AFNOR, 2010], la dégradation constitue un changement néfaste de l'état physique avec le temps, avec l'utilisation ou en raison d'une cause externe. Et si aucune action de maintenance n'est exécutée, le processus de dégradation de l'équipement mène à une dépréciation importante de sa valeur réelle et à une défaillance totale. Le cumul de défaillances entraîne une décroissance de la disponibilité du moyen, qui engendre une insatisfaction des clients et par conséquent des pertes économiques considérables. Cette partie est consacrée à la définition de la dégradation ainsi qu'à la présentation des différents modèles de dégradations.

Généralement les modèles de dégradation sont présentés de façon mathématique selon des lois de probabilité encore appelées lois de dégradation. Selon [Deloux, 2008], les modèles de dégradation peuvent être classés suivant deux catégories :

- Modèle à dégradation discrète : ces modèles permettent de modéliser des dégradations de type « chocs ». On peut alors considérer que l'équipement passe d'un état de dégradation à un autre par un incrément de type sauts. Dans le cas d'absence d'actions de maintenance, le processus évolue de l'état actuel vers un autre état présentant une dégradation plus avancée jusqu'à l'atteinte d'un état de défaillance total.

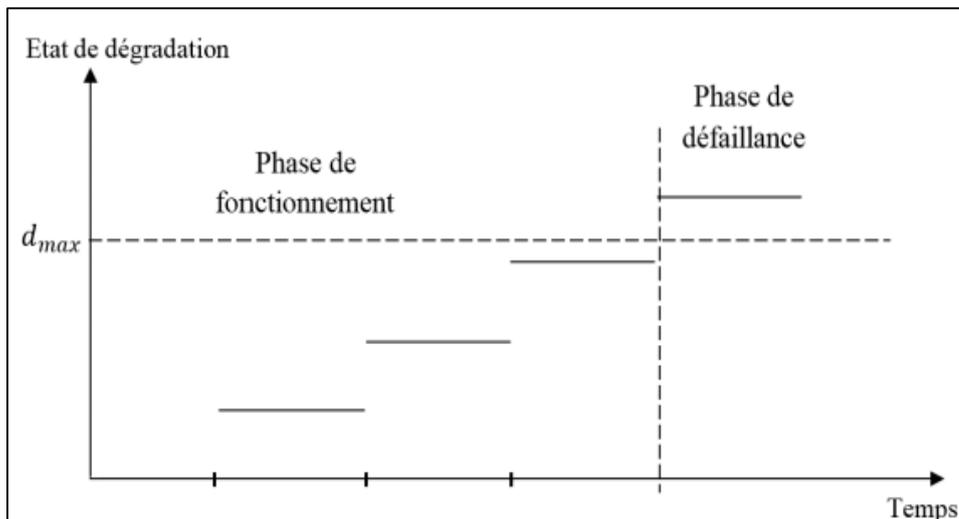


Figure 1.7 - Schématisation d'un modèle à dégradation discrète

- Modèle à dégradation continue : En ce qui concerne la dégradation continue, la connaissance de la loi des incréments de dégradation entre deux instants consécutifs permet de prédire le niveau de dégradation en fonction du temps [Park, 1988]. À travers ce modèle, on peut estimer, à chaque instant, le niveau de dégradation de l'équipement. La figure suivante donne une illustration de la dégradation continue en fonction du temps.

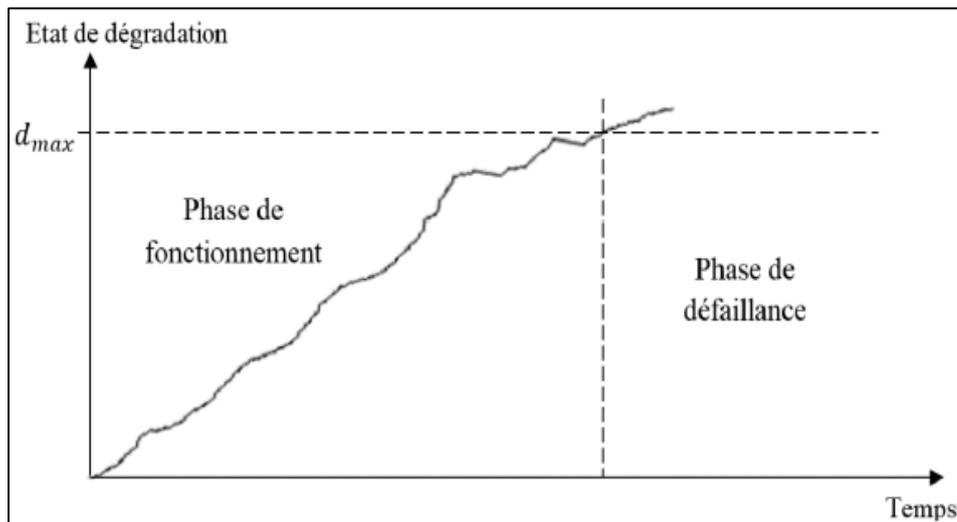


Figure 1.8 - Schématisation d'un modèle à dégradation continue

La dégradation induit souvent une augmentation au niveau du nombre moyen des pannes ainsi qu'une diminution de la performance de l'équipement, pouvant donner lieu à une défaillance totale. En effet, maîtriser toute ces informations, permet effectivement de minimiser les risques, d'assurer la stabilité des équipements et d'optimiser les différents coûts. Tous ces termes cités sont les principaux objectifs de la maintenance.

1.3 La logistique

1.3.1 La logistique : une revue littéraire, généralité

La norme [NF X50-600, 2006] définit la logistique comme étant « une fonction dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés, aux meilleures conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé ». Les besoins sont de nature interne (approvisionnement) ou externe (satisfaction des clients). Au cours des dernières années, les problèmes de logistique ont reçu une énorme attention, plusieurs recherches ont été développées dans la littérature. Tout d'abord, commençons par citer [Ballou, 1992] qui a présenté les caractéristiques, les avantages et les inconvénients des différents modes de transport (routier, aérien, ferroviaire, maritime, intermodal). En 2017, une étude comparative a été réalisée par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer de France [MEEM, 2017] entre différents modes de transport (routier, ferroviaire et maritime) en tenant compte des coûts, de l'impact environnemental, de la consommation d'énergie et des distances parcourues par chaque type ou mode de transport. Les résultats montrent que la longueur des routes est passée de 962 000 km à 1 078 000 km, soit une augmentation de 12% en vingt ans ainsi qu'une augmentation de 5 millions de véhicules depuis 2000, dont 1 million de véhicules de distribution. Concernant les camions, la flotte est restée plutôt stable au cours des années.

Cependant, la longueur totale des lignes ferroviaires exploitées a diminué globalement de 9% au cours de la même période. D'autre part, chaque déplacement d'un moyen de transport engendre un coût logistique. Ce dernier est généralement calculé en fonction du type de moyen de transport ainsi que de la quantité transportée, de la distance parcourue et des frais de pénalité occasionnés par les retards. Autrement dit, le coût de transport reflète essentiellement ce que l'entreprise dépense pour transporter les matières premières et les produits vendus ou achetés. Dans la constitution de ce coût logistique, le type de transporteur utilisé peut influencer significativement le coût de transport. En effet, l'entreprise peut choisir d'utiliser sa propre flotte de véhicules pour effectuer le transport, laquelle représente une combinaison de frais fixes (les coûts de véhicules, la maintenance, l'amortissement) et variables (l'usure des pièces, le coût de la consommation énergétique qui est fonction de la durée et de la distance parcourue). D'un autre côté, l'entreprise peut louer un ou plusieurs véhicules pour effectuer le transport, et dans ce cas, le coût de transport est basé sur les tarifs de location. Cette réflexion nous a amenés à nous poser la question suivante : Quel moyen de transport est-il préférable d'utiliser pour transporter et assurer les missions affectées ?

[Tyworth et al., 1987] ont travaillé sur l'estimation des tarifications du transport en fonction de la distance et du poids, tout en spécifiant les impacts de la distance et du poids des marchandises sur les tarifs de transport dans différents contextes. Les auteurs sont arrivés aux mêmes conclusions que [Meyer et al., 1959], pour qui, le choix du moyen de transport dépend principalement des coûts de transport. Par ailleurs, [Turki and Rezg, 2016] ont intégré, dans leur travail, le véhicule électrique comme critère de choix. En effet, ils ont proposé deux cas pour le transport des produits de l'entrepôt au client. Dans le premier cas, le transport est effectué par un véhicule électrique et dans le second cas par un véhicule à carburant. Ils ont présenté un modèle basé sur les frais de transport, de maintenance et du coût de pénalité environnementale, qui leur permet de choisir le type du véhicule. Deux algorithmes de simulation, basés sur des événements discrets, ont été utilisés pour chaque type de véhicule afin de comparer les coûts totaux et prendre une décision.

Parmi les différents moyens de transport, les véhicules routiers sont les plus utilisés et occupent donc une place dominante du fait de leur flexibilité. Il nous paraît indispensable de nous intéresser aux travaux de recherche qui considèrent ce type de transport comme étant l'un des problèmes inévitables dans la chaîne logistique. Sur la base de cette logique, [Benoist et al., 2010] ont traité le problème de l'acheminement des véhicules combiné à la gestion des stocks dans le but de minimiser les coûts logistiques. En effet, les auteurs ont prouvé que ce modèle intégré pouvait réduire les coûts de 20% par rapport aux résultats obtenus de la part d'experts

du domaine de la logistique. En gardant la même thématique, un des fameux problèmes de transport connu sous l'appellation anglaise « Vehicule Routing Problem (VRP) » est un problème qui souligne un enjeu logistique considérable pour l'optimisation de la logistique de distribution et de collecte. Avec l'essor du transport routier et de la distribution, ce problème était abordé dans le but d'optimiser deux critères importants :

- Les coûts logistiques via les distances parcourues et le temps de conduite
- L'impact environnemental (carburant, réduction de l'émission de CO_2)

Le problème de tournées de véhicule est une extension du problème du voyageur de commerce (TSP : Travelling Salesman Problem). Il consiste toutefois à chercher les tournées ou les itinéraires optimaux pour plusieurs véhicules sous une contrainte de capacité dans le but de satisfaire les demandes connues des clients. Il s'agit donc de trouver un ensemble de tournées livrant tous les clients avec un coût minimal.

1.3.2 Le concept de la logistique

Depuis sa création en 1836, le terme « logistique » ne cesse d'évoluer. En effet, le concept de la logistique s'est développé initialement dans le domaine militaire. À la base, la logistique était une combinaison entre la gestion d'armes, les stocks de marchandises et la gestion de leur transport. Dans ce contexte, l'institution militaire a consacré cette notion pour définir l'activité qui intègre deux facteurs primordiaux dans la gestion des flux : le temps et l'espace [Charkaoui, 2016]. Cette notion de la logistique a évolué pour se retrouver couramment utilisée dans le secteur industriel où elle contribue à construire une phase opérationnelle ayant pour objectif de lier les différentes activités de l'entreprise.

Il est à noter que la logistique s'ouvre sur les diverses fonctions de l'entreprise et recouvre un réseau d'entités dont l'implication fournit une valeur ajoutée. Selon [Christopher, 1992], une chaîne logistique correspond à un « réseau des organisations qui sont impliquées grâce à des liens en amont et en aval dans les différents processus et activités qui produisent la valeur sous forme de produits et services fournis au consommateur final »

En s'appuyant sur le travail de [Belin-Munier, 2015], nous avons pu cerner les trois principales phases de développement de la logistique et nous les avons résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1.1 - Les phases d'évolution de la chaîne logistique

Phase	Particularité
Apparition	Dans cette première phase, le concept de la logistique était restreint à des tâches secondaires (manutention, entreposage, problème de transport et de distribution, etc.). L'adoption de la démarche d'optimisations disjointes a fait de la logistique un simple terrain de recherche pour l'optimisation des flux physiques (gestion de stocks...)
Intégration	La démarche logistique est entraînée dans les différentes disciplines de gestions. L'adoption de la vision/approche globale a permis à la logistique de toucher les différents processus et fonctions de l'entreprise (intégration interne ou inter-fonctionnelle) : coopérer avec la fonction logistique dans le but de trouver des compromis mutuellement acceptables entre les différents acteurs du réseau logistique y compris les fournisseurs et les clients finaux. - Acquisition d'une dimension stratégique. - Rôle de coordination et de partage d'informations et de décisions.
Pilotage	Le réseau logistique s'est ramifié pour devenir une fonction transversale étroitement liée aux autres fonctions de l'entreprise. Pilotage des flux trans-fonctionnels et trans-organisationnels physiques, des flux informationnels et financiers tout en assurant les meilleures conditions de coût et de qualité de service [Cozé-Bardin, 2009].

Vu que les approches d'optimisation disjointes ont échoué à intégrer les différents facteurs de performance (en termes de service client, de qualité, de stocks, et de coût), créant ainsi des impasses logistiques, l'approche globale ou d'intégration était la solution adéquate pour dégager des compromis stratégiques entre les différents acteurs de la chaîne logistique [Colin, 2005].

1.3.3 Le concept d'optimisation de la logistique

Dans le cadre d'une optimisation globale de la logistique, l'entreprise devra, à tout moment, prendre des décisions qui peuvent changer les tactiques et/ou les stratégies. Néanmoins, les réseaux logistiques actuels sont plus complexes et exigeants que jamais, surtout avec les intérêts des différents partenaires ou clients. De ce fait, l'entreprise doit veiller à bien se positionner pour saisir toutes les opportunités, permettant de garantir la continuité de l'activité et d'accélérer la démarche d'optimisation. En outre les enjeux de l'optimisation de la logistique, peuvent être réalisés sur deux plans importants :

✓ **Sur le plan opérationnel :**

Il s'agit de planifier les plans de transport sur l'horizon du temps associé et d'y intégrer le plan de maintenance des moyens de transport. En effet, la politique de transport consiste à choisir les alternatives de livraison (livraison individuelle ou groupée), définir les moyens de transport adéquats pour respecter les délais de livraison en garantissant la meilleure qualité attendue.

✓ **Sur le plan stratégique :**

L'enjeu sur le long terme est de réussir à associer la maîtrise des coûts globaux en tenant compte des différentes contraintes opérationnelles. Dans ce cadre, il s'agit de proposer une stratégie optimale de conception d'un parc d'appui logistique tout en intégrant les différents types des moyens de transport ainsi que leurs coûts associés. Tout ceci doit être réalisé dans le respect de la logique, de la synchronisation de toutes les entités d'un parc d'appui logistique. Pour cela, des modèles d'optimisation ont été conçus afin d'établir une modélisation parfaite qui décrit les aspects existants avec une représentation simplifiée. À ce titre, [Taylor, 2013] présente trois modélisations différentes en relation avec la conception logistique :

- Le modèle **conceptuel** :

Le modèle conceptuel définit un ensemble de paramètres et d'entités permettant de donner une description simple de la conception et d'analyser son comportement dynamique à travers des moyens, qui sont fortement liés aux expériences du concepteur. Ce modèle est représenté généralement sous forme de diagrammes ou graphes. Bien que ce modèle puisse paraître simple à réaliser, il est particulièrement difficile à déployer dans des organisations très complexes.

- Le modèle **mathématique** :

Le modèle mathématique constitue un modèle analytique fondé sur un ensemble d'équations qui respecte diverses contraintes de distance, de délais, d'autonomie, etc. Ce modèle est souvent utilisé pour résoudre les problèmes d'optimisations des coûts. Il convient de générer les modèles mathématiques qui formulent le critère d'optimisation souhaité. En effet, ce dernier critère se base sur les techniques de recherche opérationnelle.

- Le modèle de **simulation** :

Le modèle de simulation est un ensemble de tests qui intègre des données d'entrées et décrit fidèlement le comportement du système, dans le but de prévoir sa réponse face à des perturbations stochastiques. D'après [Law and Kelton, 1982], la simulation repose sur l'exploitation d'un ensemble de modèles et de méthodes permettant d'approcher, d'imiter et de simuler le comportement d'un système physique réel. Ce genre de modèle est principalement utilisé dans les problèmes complexes où la résolution analytique est très difficile à développer.

Habituellement, ce genre de problème comporte plusieurs variables de décisions et/ou plusieurs variables d'entrées stochastiques.

1.4 Le concept du couplage

1.4.1 Généralité

Le mot couplage dans le domaine industriel, représente l'interaction simultanée de deux aspects industriels dans un même problème. À titre d'exemple, le couplage « maintenance / production » également connu, dans la littérature, sous le nom de maintenance intégrée à la production, a fait l'objet de très nombreux travaux. En effet, [Schouten and Vanneste, 1995] sont considérés parmi les premiers à avoir abordé cette approche de la maintenance intégrée. Ces auteurs ont étudié un système de production formé par deux machines séparées par une unité de stockage. En tenant compte de la capacité de stockage et de l'âge de la machine, ils ont établi un plan de maintenances économique par le biais d'un développement et l'optimisation d'un modèle mathématique. Dans le même cadre, [Rezg et al., 2005] ont développé un modèle analytique qui détermine simultanément l'âge optimal de l'action de maintenance préventive ainsi que le niveau de stock optimal qui minimise le coût total moyen par unité de temps pour un système de production soumis à des pannes aléatoires et fonctionnant selon la configuration « juste à temps ». Vu la complexité du modèle mathématique, les auteurs ont développé une approche hybride basée sur la simulation et la conception expérimentale pour évaluer le même objectif. Par ailleurs, [Dellagi et al., 2007] ont travaillé sur le couplage (maintenance/production) sous contrainte de sous-traitance. Ils ont considéré un système composé d'une machine principale qui fait appel à une machine sous-traitante pour compléter la production afin de satisfaire la demande. Leur travail consiste à établir une nouvelle politique de maintenance intégrée à la production tenant compte de la dégradation de la machine principale ainsi que de l'état du sous-traitant. Plus précisément, une stratégie basée sur le décalage de la date de maintenance préventive sous certaines conditions basées sur l'état du sous-traitant a été élaborée. Un modèle analytique a été développé afin de prouver le gain économique réalisé à travers cette politique. D'autre part, [Gouiaa-Mtibaa, et al., 2017] ont développé, en considérant des horizons de temps finis ou infinis de nouvelles politiques de maintenance intégrées à la qualité en tenant compte de l'effet de la dégradation progressive du système de production, de l'impact de cette dernière sur la qualité des produits finis ainsi que de l'effet économique d'un soutien de corrections présentées par les actions de retouches. Les auteurs ont développé des modèles analytiques afin d'illustrer leurs stratégies proposées. Dans leurs travaux, différentes politiques de maintenance (parfaite, imparfaite) ont été testées.

Dans un autre contexte d'intégration, [Benoist et al., 2010] ont traité le problème de l'acheminement des véhicules combiné à la gestion des stocks afin de minimiser les coûts logistiques. Ils ont démontré que leur modèle pouvait réduire les coûts de 20% par rapport à ce qui était fait par des experts dans le domaine de la logistique.

1.4.2 Le couplage « Maintenance / Logistique »

La maintenance intégrée à la logistique ou le couplage « maintenance / logistique » est généralement restreint au domaine du transport, particulièrement sur la relation directe avec les moyens logistiques employés. Les travaux de recherche existants sur cette thématique peuvent être classés en deux catégories : les recherches sur la maintenance des moyens de transport et les recherches traitant des centres des services de transport. Citons, par exemple, les travaux de [Gang Quan et al., 2006] dans lesquels les auteurs ont établi un plan optimal de maintenance préventive pour un centre de service d'aviation en optimisant une fonction économique multi objectifs en tenant en compte de la contrainte de disponibilité de la main-d'œuvre. Par ailleurs, [Friesz et Fernandez, 1979] ont développé un plan de maintenance optimal pour des moyens de transport, en vue de satisfaire la demande. En se basant sur le fait que le taux de dégradation de l'équipement de transport dépend du taux d'utilisation, de certains facteurs naturels et des investissements dépensés pour la réparation, la demande de ce moyen de transport est étroitement liée à sa qualité. Ils ont formulé le problème d'optimisation en fonction de deux variables d'état : la qualité de la route et la fréquence d'utilisation de cette route, le but étant d'établir un plan de maintenance optimal dans ces conditions. Vu l'importance de la satisfaction des clients, [Ndhaief et al. 2017] ont considéré dans leur travail, un centre de distribution urbain (CDU), qui doit satisfaire la demande quotidienne de leurs clients dans une zone urbaine donnée et sur une période de temps finie. Une approche collaborative avec un sous-traitant est proposée pour faire face aux situations où le centre ne peut pas satisfaire la demande totale pendant une période donnée en raison d'un manque de capacité qui peut être causé par la réparation des véhicules ou l'arrivée de la date de la maintenance préventive. Le choix du sous-traitant dépend de la capacité, de la distance et de l'impact environnemental. Les auteurs ont développé un modèle analytique et une procédure de résolution séquentielle afin de déterminer le plan de distribution des produits les plus économiques et le calendrier des maintenances préventives pour les véhicules. Les auteurs ont également intégré dans leur modèle un coût de pénalité en cas de retard de livraison. De leurs côtés, [Rezg et al. 2014] ont considéré un type de véhicule requis pour effectuer un ensemble de circuits pendant une période donnée. Les différents circuits à réaliser sont caractérisés par le temps nécessaire pour effectuer un parcours ainsi que les types de routes, qui ont un impact sur le processus de dégradation des véhicules. Les auteurs

ont développé un modèle mathématique qui permet de trouver la périodicité optimale de la maintenance préventive pour un véhicule. Trois niveaux de fonctionnement ont été envisagés afin d'illustrer l'influence de la route sur la fiabilité et la maintenance du véhicule. D'autre part, [Troudi et al. 2015] ont établi séquentiellement la distance optimale à parcourir ainsi que le nombre optimal des actions des maintenances préventives à effectuer sur le véhicule en tenant compte de deux facteurs importants : le type de route et les conditions climatiques. Ils ont ainsi modélisé analytiquement l'influence de ces deux facteurs sur le taux de défaillance du véhicule pour optimiser simultanément les coûts de transport et les coûts de la maintenance pour un problème de tournées de véhicules.

D'un autre côté, [Dhahri et al. 2015] ont travaillé sur un problème de routage de véhicule avec des fenêtres de temps tout en y intégrant la réalisation de maintenances préventives. Les auteurs ont développé un modèle d'ordonnement pour les situations où une action de maintenance préventive est effectuée sur les véhicules à un moment donné sur leur chemin entre le point de départ (défini par le dépôt) et le point final (défini par le client). Ils ont proposé un modèle mathématique et ont utilisé une méta-heuristique de recherche de voisinage variable pour trouver une planification optimale qui minimise l'écart par rapport à la planification initiale (sans maintenance) en termes de distance totale parcourue et de nombre de véhicules. Dans le même contexte, [Jbili et al. 2018] ont proposé une stratégie intégrée de tournée et de maintenance des véhicules en tenant compte des situations de transport transcontinental où les véhicules lourds parcourent de longues distances entre les villes, dans un environnement difficile, favorisant une probabilité non négligeable de défaillance des composants critiques. Ils ont déterminé simultanément la séquence de livraison optimale et la séquence optimale des actions des maintenances préventives (c'est-à-dire les villes des clients dans lesquelles la maintenance préventive doit être effectuée) qui minimisent le coût total moyen, en tenant compte des coûts des pénalités en cas d'arrivée tardive et des coûts de transport et de maintenance. Un algorithme génétique est proposé pour résoudre les instances du problème tout en impliquant un nombre important de clients à livrer.

En parcourant la littérature sur le sujet, nous avons pu constater que la grande majorité des travaux considère des stratégies de maintenance des moyens de transport basées uniquement sur les caractéristiques fiabilistes des moyens de transport et des coûts de maintenance, indépendamment des contraintes énergétiques et environnementales liées aux missions.

1.4.3 La consommation énergétique

La consommation énergétique se définit comme la quantité d'énergie utilisée pour un équipement ou un moyen de transport. Par exemple, la consommation énergétique d'un véhicule à carburant est le volume de carburant utilisé lors d'un trajet rapporté à la distance parcourue. L'unité utilisée pour cette consommation est le « litres pour cent kilomètres ». Vu l'importance de cette problématique, [Mori et al, 2011] ont travaillé sur la minimisation de la consommation énergétique pour les machines-outils et ont ainsi développé une nouvelle méthode de contrôle pour réduire la consommation d'énergie en synchronisant l'accélération de la broche avec le système d'alimentation. De son côté, [Kamel, 2001] a travaillé sur l'optimisation de la consommation énergétique dans une station de dessalement. L'auteur a prouvé que le volet énergétique revêt une importance cruciale dans la mesure où le coût de l'énergie électrique contribue jusqu'à la hauteur de 50% du coût d'exploitation du mètre cube d'eau dessalé. On peut également parler de consommation d'énergie pour chaque équipement utilisant une source d'énergie. Cette consommation est variable en fonction des paramètres, mais dépend toujours du rendement de l'équipement concerné. Dans ce contexte, [Rios-Torres et al. 2018] ont travaillé sur la consommation de carburant pour trois styles de conduites différents (normal, calme et nerveux) pour des véhicules électriques et hybrides. Ce travail visait à estimer la consommation de carburant des véhicules mentionnés en utilisant des cycles de conduite personnalisés extraits de données réelles. Ils ont extrait les cycles de conduite des véhicules à partir d'une enquête américaine à grande échelle qui contient des enregistrements de conduite réels basés sur le GPS. Ces cycles de conduite ont été attribués à l'une des trois catégories puis ont été utilisés avec une simulation conducteur-véhicule qui capture les décisions du conducteur (vitesse du véhicule pendant un trajet), la dynamique du véhicule et le groupe motopropulseur pour estimer la consommation de carburant des véhicules. Les résultats montrent que le style de conduite a un impact direct sur la consommation du carburant. En effet, la consommation de carburant des véhicules conventionnels peut être réduite de 13% en conduite urbaine calme, mais augmenter de près de 34% lors d'une conduite nerveuse sur autoroute par rapport aux cycles de conduite standard. En intégrant l'aspect de maintenance, nous trouvons le travail de [Vujanović et al. 2018] qui ont développé une méthodologie pour la gestion intégrée de la maintenance des flottes de véhicules dans le but d'augmenter l'efficacité des véhicules (en termes de consommation de carburant), tout en améliorant la gestion de la maintenance. Leur approche est basée sur une évaluation multicritère et une amélioration du système de gestion de la maintenance de la flotte. Trois ensembles de critères sont proposés, liés respectivement au processus de transport, au processus de maintenance et au contrôle technique des véhicules.

1.4.4 Contrainte liée à la dégradation environnementale

Le contexte mondial actuel est marqué par le respect environnemental. En effet, de nos jours l'impact négatif sur l'environnement devient excessif. De ce fait, les études sur la minimisation de la dégradation environnementale et en particulier les questions de mise en place de stratégies et de politiques pour minimiser ces impacts représentent de nouveaux axes et cadres de recherche très intéressants. Les objectifs consistent à tracer une démarche itérative qui permette à la fois de trouver une rentabilité économique sous exigences de respect de l'environnement. Dans ce cadre, de nombreux efforts sont déployés par les entreprises afin de réduire les émissions de gaz générées par leurs équipements ainsi que leurs moyens de transport. Nous pouvons citer, par exemple, le travail de [Chouikhi et al., 2012] qui ont proposé un modèle analytique pour évaluer la dégradation excessive de l'environnement causée par un équipement de production. Ce modèle a pour objectif de déterminer les dates d'inspections optimales de l'équipement qui minimisent le coût total moyen par unité de temps durant un horizon de temps fini. En effet, des inspections et des mesures bien planifiées permettent de suivre et contrôler le processus de dégradation de l'équipement et de recueillir des données cruciales de fiabilité. En raison de la dégradation de l'équipement, le fonctionnement du système peut avoir un impact sur l'environnement. Cet effet devient de plus en plus important à mesure que l'équipement se dégrade. Ainsi, une action de maintenance est réalisée dès lors que l'inspection révèle que le niveau de la dégradation dépasse une valeur spécifiée, et ce, dans le but de respecter l'environnement. Parmi les travaux les plus récents qui ont traité le problème environnemental, nous pouvons citer ceux de [Wang et al., 2018]. Les auteurs ont abordé le sujet des émissions de carbone dans les zones portuaires. Ils se sont intéressés à la relation entre le service effectué lors du chargement / déchargement du navire et les émissions de carbone. Ils ont estimé que les émissions de carbone provenaient principalement de la zone terrestre du port (les grues de quai et les camions de chantier) et de la zone aquatique (le navire). Les auteurs ont développé deux fonctions objectives à minimiser : l'émission totale de carbone et le temps d'attente moyen au port pour chaque navire. [Sawadogo et al., 2010] se sont concentrés sur l'intégration des impacts environnementaux et sociétaux dans un réseau de transport intermodal. L'objectif de leur travail était de déterminer la voie la plus efficace pour minimiser les coûts de transport, le temps de transport et les différents impacts environnementaux et sociétaux. Les critères retenus pour la prise de décision étaient multiples : coût de transport, temps de transport, pollution de l'air, consommation d'énergie, nuisances sonores, dommages dus aux transbordements et risques d'accidents. Ils ont présenté chaque critère à l'aide d'un modèle mathématique. L'intérêt de ce travail était de révéler le lien entre les impacts environnementaux engendrés par les moyens de transport et leurs coûts estimés.

Une des options de plus en plus fréquemment adoptées par les entreprises pour réduire les effets sur l'environnement, causés par leurs véhicules de transport, consiste en l'utilisation de la technologie hybrides et / ou électriques. Dans ce cadre, [Donateo et al., 2014] ont travaillé sur l'estimation de l'impact environnemental d'une citadine électrique pendant six mois d'essais dans une ville italienne. Ils ont présenté une méthodologie basée sur trois étapes : la première étape est la mesure de la consommation électrique à bord du véhicule. Pour y parvenir, ils ont réalisé 42 tests qui diffèrent selon le type d'itinéraire, les conditions de circulation, et l'utilisation des auxiliaires (éclairage, chauffage, climatisation, chauffage de lunette arrière). La deuxième étape correspond au bilan de la consommation électrique lors de chaque recharge électrique. Ce bilan est caractérisé par la puissance utile ainsi que le temps nécessaire pour chaque recharge. Ces informations ont été obtenues grâce à la capacité de la station de recharge à mesurer et à stocker les données d'utilisation. Enfin, la troisième étape est l'évaluation des niveaux d'émission, (c'est-à-dire l'émission atmosphérique associée à la production d'un kWh d'électricité) à différentes périodes et tranches horaires en fonction des niveaux de charge correspondants. Les résultats obtenus ont été comparés aux limites fixées par la législation européenne sur les véhicules classiques. Ils ont clairement montré un réel avantage via l'utilisation de véhicules électriques comparée à l'utilisation de véhicules conventionnels dans des conditions de circulation urbaine. Dans le même contexte, [Prud'homme and Koning, 2012] ont trouvé d'autres résultats après avoir développé un modèle qui estime les coûts spécifiques d'un véhicule électrique, par rapport à un véhicule à carburant. Ils ont considéré, dans leur travail, les paramètres suivants : le coût d'achat, l'efficacité électrique, le coût de la batterie, le prix de l'électricité, la teneur en CO_2 de l'électricité - pour les véhicules électriques. Le coût d'achat, l'efficacité énergétique, les prix du carburant, les coûts de pollution locale, les émissions de CO_2 - pour les véhicules à carburant. La méthodologie adoptée est une étude comparative basée sur trois aspects différents : les coûts de la consommation, les coûts socio-économiques et les émissions de CO_2 entre deux types de véhicules ayant à peu près le même niveau de service pendant la même période. Les résultats obtenus montrent que le véhicule à carburant est plus économique qu'un véhicule totalement électrique. En effet, ils ont constaté qu'un véhicule électrique coûtera 12 000 euros de plus au particulier, et 15 000 euros de plus à une entreprise sur toute sa durée d'utilisation. Le tableau suivant représente une synthèse de notre étude bibliographique, reprenant quelques travaux pertinents susmentionnés.

Tableau 1.2 - Tableau de synthèse des articles

Auteurs	Orientation de l'article	Objectif de l'article	Constats
[Gouiaa-Mtibaa, et al., 2017]	Intégration de la maintenance à la qualité des produits finis.	Optimisation des coûts des produits finis.	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilisation de la stratégie de maintenance préventive imparfaite avec réparation minimale en cas de panne. - Les auteurs cherchent à trouver un compromis économique entre les activités de maintenance d'un système et son produit fini (la rentabilité économique).
[Troudi et al., 2015]	Intégration de la maintenance à la logistique.	Minimisation simultanée du coût de maintenance et du coût de transport.	<ul style="list-style-type: none"> - Les auteurs cherchent à trouver la date optimale de maintenance préventive ainsi que les tournées optimales qui minimisent les coûts.
[Rezg et al., 2014]	Intégration de la maintenance à la logistique.	Minimisation du coût du transport entre les différents éléments du réseau logistique, ainsi que le coût routier, et le coût des actions de maintenance.	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration des délais ainsi que les types des routes entre les destinataires dans le processus de la dégradation du véhicule. - Ces facteurs peuvent provoquer une augmentation des pannes et donc des coûts des maintenances.
[Prud'homme and Koning, 2012]	Évaluation économique et environnementale pour les véhicules électriques.	Une étude comparative entre deux types de véhicules (électrique et à carburant).	<ul style="list-style-type: none"> - Développement d'un modèle qui estime les coûts de consommation, les coûts socio-économiques et les émissions de CO_2 d'un véhicule électrique, par rapport à un véhicule à carburant.
[Terry and L. Friesz, 1979]	Intégration de la maintenance à la logistique.	Optimiser les coûts de maintenance.	<ul style="list-style-type: none"> - Intervention de la qualité du moyen de transport dans la politique de maintenance. - Intégration des facteurs extérieurs : la qualité de la route et la fréquence d'utilisation de la route dans le plan de maintenance.

1.5 Positionnement scientifique

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux de recherche portent sur la maintenance et la logistique et plus particulièrement sur les moyens de transport. Pour bien positionner nos travaux par rapport à l'existant, une comparaison a été faite, en se basant sur des critères spécifiques tels que le moyen de transport, le couplage « maintenance / logistique », la consommation énergétique et l'impact environnemental. Les résultats de ces comparaisons sont rapportés dans le tableau suivant.

Tableau 1.3 - Positionnement scientifique

Auteurs	Véhicules	Maintenance	Consommation énergétique	Impact Environnemental
[Jbili et al., 2018]	✓	✓		
[Rios-Torres et al., 2018]	✓		✓	
[Vujanović et al., 2018]	✓	✓	✓	
[Wang et al., 2018]			✓	✓
[Gouiaa-Mtibaa, et al., 2017]		✓		
[Ndhaief et al., 2017]	✓	✓		✓
[Turki and Rezg, 2016]	✓	✓		✓
[Dhahri et al., 2015]	✓	✓		
[Troudi et al., 2015]	✓	✓		
[Donateo et al., 2014]	✓		✓	✓
[Rezg et al., 2014]	✓	✓		
[Chouikhi et al., 2012]		✓		✓
[Prud'homme and Koning, 2012]	✓		✓	✓
[Mori et al., 2011]			✓	
[F. Kamel, 2001]			✓	
Nos travaux	✓	✓	✓	✓

D'après cette synthèse bibliographique, nous constatons qu'aucun article de recherche n'aborde conjointement, dans un même problème, le concept de la logistique de transport sous divers types, la consommation énergétique, la dégradation et les coûts de maintenance des moyens de transport mis en œuvre ainsi que l'impact sur l'environnement. La considération simultanée de ces aspects ainsi que leurs interactions dans un contexte économique avec un respect environnemental représenteront l'originalité de la problématique de notre sujet de thèse qui sera détaillée précisément dans la section suivante.

1.6 Objectif général et problématique de la thèse

La problématique soulevée dans cette thèse concerne l'un des problèmes omniprésents de la conception d'un parc d'appui logistique. Il s'agit du problème du dimensionnement d'une flotte de véhicules constituée par différents types de véhicules en tenant compte de contraintes économiques, opérationnelles et environnementales. En effet, la réalisation des différentes missions de distribution engendre une dégradation des véhicules, un impact sur l'environnement et une consommation excessive d'énergie dont les circonstances inattendues affectent la disponibilité des véhicules, le coût total de fonctionnement et les bénéfices attendus. Par conséquent, l'objectif recherché consiste à proposer une stratégie optimale de dimensionnement d'un parc constitué de différents types de véhicules tout en intégrant la notion de la maintenance et celle de l'aspect opérationnel du moyen de transport. Ce dimensionnement est étudié, pour un horizon prédéfini, en abordant trois stratégies différentes qui seront décrites dans les trois chapitres suivants.

Le deuxième chapitre portera sur le dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie d'achat et de revente en fin de mission. En effet, une étude du lien entre le nombre de véhicules à acquérir et leurs modes de fonctionnement sera effectuée en développant une expression analytique qui exprimera le coût total intégrant les coûts liés à l'acquisition, l'exploitation, la maintenance, l'impact sur l'environnement ainsi que la valeur de revente en fin de mission.

Tenant compte de deux types de véhicules sur le marché (à carburant et électrique), notre objectif consistera à déterminer simultanément le nombre optimal de véhicules de chaque type à acquérir, le nombre de mois d'utilisation pour chaque type, leurs durées de conservation, la périodicité de la maintenance préventive systématique ainsi que le taux d'utilisation (nombre de kilomètres parcourus par mois) correspondant à chaque type de véhicule. Cette stratégie sera étudiée pour un horizon prédéfini, qui représente une période maximale accordée pour réaliser la mission, définie par un nombre de kilomètres fixé à l'avance. Un modèle analytique sera

développé et une résolution numérique, pour déterminer les variables de décision optimales, sera présentée afin d'illustrer le modèle analytique proposé.

Le troisième chapitre présentera un autre dimensionnement du parc selon une stratégie de « *leasing* ». À cet effet, un modèle mathématique sera développé afin de déterminer le nombre de véhicules de chaque type à louer, le nombre de mois d'utilisation de chaque véhicule et la périodicité des actions de maintenance préventive pour chacun des types de véhicules. Comme précédemment, notre objectif consistera à minimiser le coût total prévu, y compris la location, l'exploitation, les maintenances préventive et corrective sans oublier l'impact environnemental. Une seconde modélisation analytique et une procédure numérique seront développées afin de déterminer nos variables de décision. Ce chapitre a fait l'objet d'un article de conférence présenté en novembre 2020 lors de la conférence internationale MOSIM.

Le quatrième chapitre portera sur le dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie d'acquisition, puis location ou mise à disposition auprès de clients potentiels avant une revente à la fin de mission. En effet, pour donner suite aux résultats obtenus dans le premier modèle développé, nous avons pu remarquer que certains véhicules sont revendus alors qu'ils sont assez peu sollicités. Ce constat nous a amenés à réfléchir à une autre option que la revente immédiate. Ainsi, selon leur utilisation, il pourrait être avantageux de les proposer en location, durant une période à définir avant de les revendre. Bien sûr, le coût de cette location ainsi que l'état de dégradation de ces véhicules pour chaque type doivent être pris en considération pour établir la politique la plus intéressante du point de vue économique. La modélisation analytique et la résolution numérique élaborées restent similaires à celles développées au sein des deux chapitres précédents, mais en y intégrant une période de location comme variable de décision supplémentaire.

La dernière partie de cette thèse sera dédiée à la conclusion générale qui reprendra les grandes lignes de nos réalisations et nous amènera à une discussion sur les perspectives de recherche.

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre constitue une étude bibliographique qui met en avant les travaux de recherche qui abordent les aspects qui sont traités dans cette thèse. Plus précisément, nous avons présenté des études sur les types et politiques de maintenances, en prenant soin de détailler certains modèles analytiques qui traitent différents aspects (maintenance parfaite, imparfaite...). D'autre part, une étude bibliographique concernant la logistique de transport ainsi que les moyens de transport du point de vue exploitation et consommation a été élaborée.

Nous avons également présenté des travaux abordant le thème environnemental sous différents points de vue. En nous basant sur les recherches présentées dans ce rapport, nous avons pu positionner notre problématique et fixer clairement les objectifs de notre thèse pour lesquels chacun des chapitres suivants concernera une stratégie bien définie.

Dans la suite, nous développerons différentes stratégies à travers des modèles mathématiques dont l'objectif est de dimensionner un parc d'appui logistique constituée par différents types de véhicules en tenant compte de contraintes économiques, opérationnelles et environnementales. Ces stratégies devront assurer le bon déroulement du parc et garantir évidemment la satisfaction des clients.

Chapitre 2

Dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie d'achat et de revente en fin de mission

Résumé

Le présent chapitre porte sur le dimensionnement d'un parc de véhicules selon une stratégie d'achat et de revente à la fin des missions affectées. Nous considérons différents types de véhicules se distinguant par leurs sources d'énergie. Dans un premier temps, notre étude se basera sur des véhicules à carburants et électriques. Les différences entre ces deux types de véhicules selon les points de vue fiabilité, consommation, coût d'acquisition et impacts environnementaux sont prises en considération dans notre étude.

L'objectif de ce chapitre consiste à dimensionner un parc de véhicules par la détermination du nombre optimal de véhicules de chaque type d'énergie à acquérir ainsi que leurs durées d'utilisation, leurs durées de conservation, la périodicité des actions de maintenance ainsi que leur taux d'utilisation. Formellement, ces paramètres représentent nos variables de décision.

Pour répondre à cette problématique, un modèle analytique a été développé afin d'exprimer et d'optimiser le coût total attendu, qui comprend les coûts liés à l'acquisition, l'exploitation, la maintenance, l'impact environnemental ainsi que la valeur de revente.

Des données issues des deux marques de véhicules commerciaux (Renault et Nissan) et pour chacune d'entre elles, de deux types d'énergie (électrique et à carburant) ont été utilisées pour illustrer les résultats analytiques obtenus. On note également que des études de sensibilités ont été réalisées afin de montrer la robustesse du modèle analytique développé ainsi que l'impact des contraintes environnementales sur le dimensionnement du parc.

2.1 Introduction

La mondialisation économique pousse les entreprises à se placer à un niveau concurrentiel. En effet, l'environnement économique dans lequel les entreprises évoluent a beaucoup changé ces dernières décennies en raison de la croissance démographique et de l'apparition de nouvelles technologies. Cette concurrence a incité les entreprises à mener des pistes d'amélioration de performance afin de mieux répondre aux exigences de leurs clients. À cet égard, la logistique joue un rôle fondamental et stratégique dans le pilotage et l'amélioration des entreprises. Il est devenu primordial pour les entreprises de logistique de mettre en place des méthodes et outils innovants dans le but de garantir la continuité de service tout en respectant les nouvelles réglementations, notamment celles concernant le respect de l'environnement.

De ce fait, une étude bibliographique approfondie a été réalisée dans le chapitre précédent, sur les différents travaux réalisés dans les domaines de la logistique et de la maintenance. Nous nous sommes également focalisés sur l'aspect environnemental dédié aux missions logistiques afin de situer les travaux de cette thèse par rapport à la littérature. L'objectif de ce premier chapitre était de se positionner par rapport à l'existant afin de présenter clairement l'originalité de notre thèse tout en dévoilant la problématique générale et les valeurs scientifiques. Nous remarquons que les études rencontrées dans la bibliographie ont porté essentiellement sur le développement et l'expérimentation de différents styles et modèles analytiques concernant la maintenance pour un parc de véhicules existant alors que la particularité de notre thèse consiste à dimensionner un parc de véhicules hétérogènes en tenant compte simultanément de l'impact environnemental et des coûts de maintenance liés à la dégradation des véhicules. En effet, avec l'évolution technologique des moyens de transport, il serait également indispensable d'élargir la fonctionnalité de tels outils pour aider au dimensionnement économique des parcs de véhicules et des différentes options d'investissement envisageables.

Dans ce cadre, ce deuxième chapitre consiste à développer un modèle analytique qui serait en mesure d'aider au dimensionnement d'un parc constitué de différents types de véhicules selon un critère économique tenant compte des contraintes environnementales et opérationnelles. Il sera articulé autour de cinq sections. La section 2 sera consacrée à la description de la stratégie « Achat - Revente ». Le modèle analytique sera développé dans la section 3. Dans la section 4, nous présenterons les résultats numériques ainsi qu'une interprétation de ces résultats. La conclusion sera présentée dans la section 5.

2.2 Description du problème et hypothèses de travail

2.2.1 Inspiration du problème

Notre étude se base sur une entreprise de logistique spécialisée dans la distribution de produits légers, à l'aide de véhicules commerciaux. Cette entreprise désire acquérir un nombre optimal de deux types de véhicules, sans se focaliser sur un type d'énergie en particulier, mais en tenant compte des conditions opérationnelles et de la réglementation environnementale en vigueur. Aujourd'hui, nous assistons à une évolution économique importante du domaine de la logistique. La concurrence entre les entreprises et les encouragements des gouvernements poussent les décideurs à trouver des moyens et des stratégies pour garantir la balance optimale entre la disponibilité des moyens de transport et la prestation des services tout en investissant un coût raisonnable. Avant d'aborder la notion du coût à investir, une discussion sur la nature des coûts que l'on rencontre peut-être fort utile. En effet, l'entreprise fait face à plusieurs types de coûts, mais ils ne sont pas tous pertinents pour la prise de décision. Dans ce cas, il est très important de comprendre la nature fondamentale des coûts pour savoir lesquels prendre en compte dans un contexte de décision donné. Un coût peut être variable, fixe ou même être une combinaison de ces deux types de coûts et dans certains cas, il reflète des économies d'échelle. Il faut aussi savoir distinguer les coûts directs des coûts indirects. Pour cela, notre étude englobe les différents coûts directs et indirects tout en précisant leur lien avec le coût total du système logistique. Ainsi, pour prendre des décisions logistiques optimales, il faut évaluer leur impact sur le coût total du système logistique.

Toujours sur cette notion de coûts, l'énergie utilisée pour le fonctionnement des véhicules influe directement sur le coût de la consommation et de l'impact sur l'environnement. Véritablement, la consommation énergétique devient excessive et coûteuse lorsque sa valeur calculée dépasse un seuil déterminé et qu'un coût de pénalité est engendré par rapport aux émissions de CO_2 qui dépassent les seuils autorisés. Ces coûts peuvent influencer considérablement sur la marge bénéficiaire de l'entreprise. À cet égard, l'entreprise doit garantir une vision claire qui assurera le bon fonctionnement de ces ressources.

L'entreprise doit acquérir des quantités déterminées de deux types de véhicules commerciaux neufs pour satisfaire une mission bien définie sur un horizon de temps limité.

2.2.2 Description de la stratégie

La stratégie « Achat - Revente » se concentre essentiellement sur l'acquisition des véhicules par type pour constituer un parc logistique et les vendre après la fin de leurs missions affectées. Cette stratégie consiste à déterminer le nombre et la diversité des véhicules à acquérir, et pour chaque type de véhicule, leurs nombres de mois d'utilisation, la périodicité de leurs maintenances préventives à respecter et leurs taux d'utilisation en tenant compte des contraintes économiques, opérationnelles et environnementales. La particularité de cette stratégie consiste à définir la durée de possession de chaque type de véhicule ainsi que la valeur réelle après l'utilisation du véhicule en question. Plus précisément, ces véhicules sont à acquérir pour effectuer un ensemble de missions pendant une période prédéfinie de quelques années. La contribution visée à travers le modèle analytique développé est de répondre simultanément à deux enjeux majeurs, qui sont le recours à d'autres technologies de véhicules, et la politique de maintenance préventive à adopter pour chacun de ces types de véhicules. En outre, nous intégrons les coûts d'acquisition, les coûts d'exploitation, les coûts d'impact sur l'environnement ainsi que les coûts de maintenance spécifique à chaque type de véhicules dans une fonction objective qui vise à minimiser ces différents coûts globaux afin de déterminer simultanément le nombre optimal de véhicules de chaque type à acquérir, la durée de leur utilisation, le taux d'utilisation associée à chaque type sans oublier de prendre en compte la durée totale de leur fonctionnement ainsi que la périodicité des maintenances préventives pour chaque type de véhicule.

2.2.3 Hypothèses de l'étude

Les hypothèses adoptées pour le développement du modèle analytique en vue de déterminer les variables de décisions, qui sont le nombre de véhicules par type, le nombre de mois d'utilisation des véhicules pour chaque type, la périodicité des maintenances préventives à respecter pour chaque type de véhicule et le taux d'utilisation associé à chaque véhicule, sont les suivantes :

- Le nombre total de kilomètres à parcourir par l'ensemble des véhicules est supposé connu.
- Tous les véhicules, d'un même type, parcourront le même nombre de kilomètres ; les véhicules de mêmes types sont supposés identiques et sont soumis aux mêmes lois de défaillance.
- La durée maximale pour assurer toutes les missions est supposée connue.
- Chaque véhicule est supposé revendu, au plus tard, à la fin de la mission globale.

- Les différents coûts et les distributions de probabilité sont supposés être connus.

Il est important de mentionner que ces hypothèses pourront évoluer et être relaxées selon les différentes stratégies étudiées dans cette thèse.

2.2.4 Notations

Les notations suivantes sont utilisées dans le modèle mathématique :

- T_{Max} : durée totale pour assurer toutes les missions (mois).
- N : nombre de types des véhicules.
- i : indice utilisé pour représenter le type de véhicule, $i \in \{1, \dots, N\}$.
- K : nombre total des kilomètres à parcourir par tous types de véhicules (kms).
- ETC_N : coût total moyen (unité monétaire, notée u.m).
- C_{Ai} : coût d'acquisition d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{Oi} : coût d'exploitation d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{Mi} : coût total moyen des actions des maintenances d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{Mci} : coût moyen d'une action de maintenance corrective d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{TMci} : coût total moyen des actions de maintenance corrective d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{MPi} : coût moyen d'une action de maintenance préventive d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{TMPi} : coût total moyen des actions de maintenance préventive d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{Ei} : coût de l'impact sur l'environnement causé par un véhicule de type i (u.m).
- V_{Ri} : valeur de revente d'un véhicule de type i (u.m).
- μ_{ci} : durée moyenne d'une action de maintenance corrective pour un véhicule de type i (mois).
- μ_{pi} : durée moyenne d'une action de maintenance préventive pour un véhicule de type i (mois).
- λ_i : taux de défaillance associé aux véhicules de type i .
- $v_{i\ min}$: taux d'utilisation minimal associé à chaque véhicule de type i (kms/mois).
- $v_{i\ max}$: taux d'utilisation maximal associé à chaque véhicule de type i (kms/mois).
- T_i : durée de possession de chaque véhicule de type i (mois).
- $\emptyset(Y_i, m_i)$: nombre moyen de pannes (réparation minimale) durant la période d'utilisation d'un véhicule de type i .

- 1_X : fonction indicatrice équivalent à $\begin{cases} 1 & \text{if } X_i \geq 1 \\ 0 & \text{if } X_i = 0 \end{cases}$
- 1_Y : fonction indicatrice équivalent à $\begin{cases} 1 & \text{if } Y_i \geq 1 \\ 0 & \text{if } Y_i = 0 \end{cases}$
- $\lfloor \cdot \rfloor$: partie entière inférieure.
- $\lceil \cdot \rceil$: partie entière supérieure.

Les variables de décision sont définies comme suit :

- X_i : nombre des véhicules par type i , $i \in \{1, \dots, N\}$, avec $X_i \in \mathbb{N}$.
- Y_i : nombre de mois d'utilisation des véhicules pour chaque type i , $i \in \{1, \dots, N\}$, avec, $Y_i \in \mathbb{N}$.
- m_i : périodicité des maintenances préventives à respecter pour chaque véhicule de type i (mois) avec $m_i \in \mathbb{N}^*$.
- v_i : taux d'utilisation associé à chaque véhicule de type i (kms/mois), $i \in \{1, \dots, N\}$.

2.3 Étude analytique

Sur la base des hypothèses et notations ci-dessus, une équation mathématique (2.1) est établie pour minimiser le coût global de l'investissement du parc de véhicules selon une stratégie d'achat et de revente en fin de mission sur une période définie. En effet, cette équation représente une fonction objective qui vise à minimiser les différents coûts globaux. Cette fonction objective est la somme du nombre des véhicules de type i à acquérir multiplié par la somme des différents coûts (coût d'acquisition, coût total moyen des actions de maintenances, coût d'exploitation moyen, coût moyen de l'impact sur l'environnement) minoré de la valeur de revente d'un véhicule de type i .

$$\min ETC_N = \sum_{i=1}^N X_i \cdot [C_{Ai} + C_{Mi} + C_{Oi} + C_{Ei} - V_{Ri}] \quad (2.1)$$

Sous les contraintes suivantes :

- Contrainte pour assurer le nombre total des kilomètres :

$$\sum_{i=1}^N X_i \cdot Y_i \cdot v_i \geq K \quad (2.2)$$

Les véhicules doivent assurer le nombre total des kilomètres à parcourir. Cette contrainte (2.2) s'explique par le nombre total des véhicules multiplié par le nombre de mois d'utilisation des véhicules multiplié par le taux d'utilisation associé à chaque véhicule de type i . Ce nombre total

de kilomètres à faire par tous les types des véhicules doit être supérieur ou égal au nombre total de kilomètres à parcourir, à savoir K kms.

- Contrainte de durée de services :

$$T_i \leq T_{max} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

Dans cette stratégie, on s'intéresse essentiellement à la durée de possession des véhicules de chaque type i . Par conséquent, cette contrainte (2.3) assure que la durée de possession des véhicules T_i est inférieure ou égale à la durée totale de toutes les missions planifiées. En d'autres termes, les missions peuvent être accomplies et les véhicules revendus avant T_{max} .

- Contrainte du taux d'utilisation:

$$0 < v_i \leq v_{i\ max} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.4)$$

Le taux d'utilisation s'explique par le nombre de kilomètres parcourus mensuellement associé à chaque véhicule de type i . En effet, cette contrainte (2.4) garantit que le taux d'utilisation v_i est inférieur au taux d'utilisation maximal (v_{imax}). On rappelle que v_i est considéré comme une variable de décision.

- Contrainte d'admissibilité :

$$Y_i \leq 1_X \cdot \min\left(T_{max}, \frac{K}{v_i}\right) \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.5)$$

On rappelle que Y_i est également considérée comme étant une variable de décision. En effet, Y_i représente le nombre de mois d'utilisation d'un véhicule de type i . Cette variable est égale à 0 lorsqu'aucun véhicule de ce type n'est acquis. Dans le cas contraire, la variable Y_i est égale au nombre de mois maximum si la fonction indicatrice est égale à 1.

Nous rappelons qu'une équation mathématique (2.1) a été présentée précédemment dans l'objectif de définir la stratégie « Achat - Revente » en fin de mission. Les cinq termes de l'équation concernent le coût d'acquisition, le coût total moyen des actions des maintenances, le coût d'exploitation moyen, le coût moyen de l'impact sur l'environnement et la valeur de revente pour chaque véhicule de type i , respectivement. Quatre contraintes ont été établies afin de garantir le bon fonctionnement du modèle.

Nous présentons, par la suite, les différents coûts apparus dans la fonction objective.

2.3.1 Coût d'acquisition d'un véhicule (C_{Ai})

Dans le cas de cette stratégie, nous nous intéressons, en premier lieu, au coût d'acquisition, appelé aussi coût d'achat. Il s'agit d'un coût unitaire fixe pour acquérir un service ou un bien.

Dans notre modèle, nous l'avons considéré comme un coût fixe donné par les concessionnaires des véhicules. Ce coût d'acquisition dépend notamment de la technologie utilisée, de la marque, de la capacité, de la consommation.

D'autres coûts variables apparaîtront lors du fonctionnement des véhicules et qui dépendent aussi des taux d'utilisation des véhicules : coûts des maintenances, coût d'exploitation et coût de l'impact sur l'environnement.

À présent, nous détaillons les autres coûts présents dans la fonction objective.

2.3.2 Coût total moyen de maintenance par véhicule (C_{Mi})

Le coût total moyen de maintenance correspond à la somme des coûts des actions des maintenances préventives et correctives pour chaque véhicule de type i .

$$C_{Mi} = C_{TMPi} + C_{TMCI} \quad (2.6)$$

✓ Coût des actions de maintenance préventive

La stratégie de maintenance adoptée est connue en littérature comme une stratégie de maintenance préventive (MP) imparfaite avec réparation minimale. Plus précisément, des actions de maintenance préventive imparfaites sont réalisées à des périodicités fixes ($m_i, 2m_i, N \cdot m_i$). En cas de pannes entre deux actions de (MP) successives, une réparation minimale qui n'impacte pas l'évolution du taux de défaillance est appliquée. L'aspect de maintenance préventive imparfaite adopté est illustrée par le fait que le nombre moyen de pannes entre deux actions de (MP) successives est croissant le long du cycle. Cet aspect est modélisé analytiquement selon le modèle de [Gertsbakh, 2013] qui sera détaillé plus précisément par la suite.

Dans cette problématique, nous considérons que le nombre des actions de maintenance préventive correspond au quotient du nombre des mois d'utilisation des véhicules pour chaque type i (Y_i) par la périodicité des maintenances préventives à respecter pour chaque véhicule de type i (m_i). Par conséquent, le coût total des actions de maintenance préventive est le produit du coût moyen d'une action de maintenance préventive par le nombre des actions préventives par type de véhicule.

$$C_{TMPi} = C_{MPi} \cdot \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \quad (2.7)$$

✓ Coût des actions de maintenance corrective

Durant les trajets effectués, il peut se produire, en moyenne, $\phi(Y_i, m_i)$ défaillances. Le coût total des réparations correspond donc au produit du coût moyen d'une action maintenance corrective par le nombre de pannes.

$$C_{TMci} = C_{Mci} \cdot \phi(Y_i, m_i) \quad (2.8)$$

Les auteurs de plusieurs travaux scientifiques ont modélisé l'impact des actions de maintenance préventive imparfaite par une augmentation du nombre moyen de panne après chaque action de maintenance imparfaite. Nous nous sommes inspirés de cette modélisation pour mettre en équation notre problématique. En effet, en se basant sur le travail réalisé par [Gertsbakh, 2013], la stratégie de maintenance proposée consiste à réaliser des actions de maintenance préventive imparfaites sur un véhicule tous les m_i mois. Ces actions préventives se caractérisent par le remplacement de certains composants du véhicule par d'autres composants identiques neufs ; Cette action est habituellement reconnue comme un renouvellement partiel. Ce dernier diminue dans une certaine mesure le taux de défaillance du véhicule. Autrement dit, après une action de maintenance préventive imparfaite, le nombre moyen de panne augmente d'une proportion e^α par rapport à celui du précédent intervalle. Ici, e^α est considéré comme un facteur de dégradation strictement positif [Gertsbakh, 2013].

En cas de pannes entre des actions de maintenance préventive consécutives, des réparations minimales sont effectuées pour remettre le véhicule en état de fonctionnement tout en maintenant son taux de défaillance au même niveau qu'avant la panne.

La figure suivante (2.1) exprime la variation du nombre moyen de pannes sur une période d'utilisation d'un véhicule de type i .

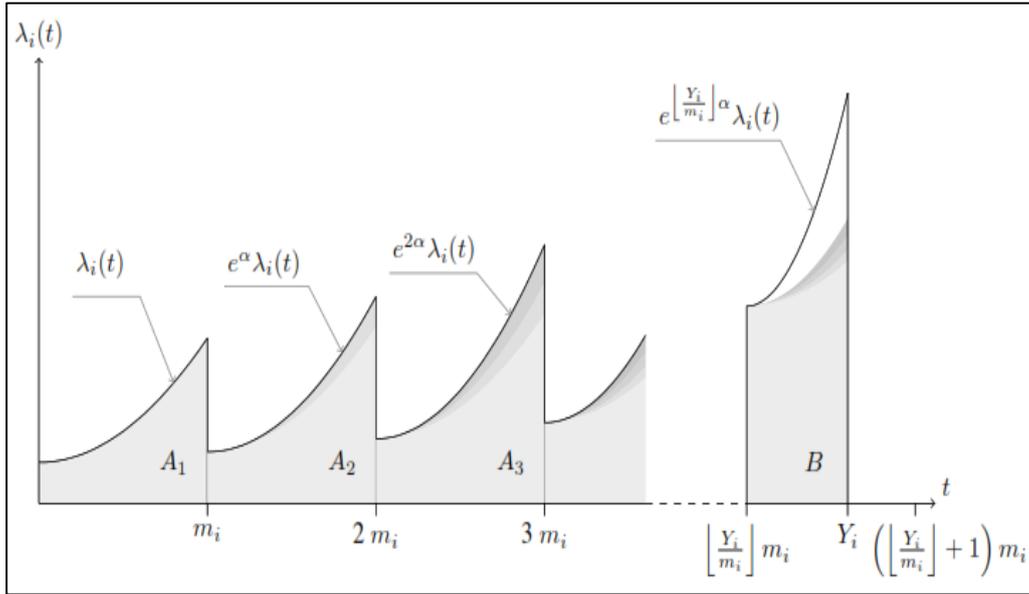


Figure 2.1 - Variation du nombre moyen de pannes

Par ailleurs, le nombre moyen de pannes $\phi(Y_i, m_i)$, représenté par les surfaces grises sur la figure (2.1) s'exprime comme suit :

$$\phi(Y_i, m_i) = \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor} \underbrace{\int_0^{m_i} e^{(j-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) dx}_{A_j} + \underbrace{\int_0^{Y_i - \lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor m_i} e^{\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor \alpha} \cdot \lambda_i(x) dx}_{B} \quad (2.9)$$

A_j en Figure 2.1
avec $j = 1, \dots, \lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor$

B en Figure 2.1

2.3.3 Coût d'exploitation (C_{oi})

Le coût d'exploitation dépend de plusieurs paramètres qui diffèrent selon le type de véhicule. Sans perte de généralité sur le modèle de coût (équations 2.1 à 2.5) qui considère N types de véhicules, nous limiterons notre étude à deux types de véhicules ($i = 1$ pour le véhicule à carburant et $i = 2$ pour le véhicule électrique).

Sur la base de la littérature existante, nous formulons ci-dessous l'expression des coûts d'exploitation pour chacun de ces deux types de véhicules dans le cadre des présents travaux.

✓ Coût d'exploitation pour un véhicule à carburant (C_{o1})

Le véhicule à carburant se caractérise par son efficacité énergétique, qui est exprimée par le nombre de kilomètres parcourus par unité de carburant consommée (kms/litre) selon la norme américaine, ou en litres/100 kms qui est plus couramment utilisé en Europe. Sur la base de la

formulation développée par [Prud'homme et Koning 2012], l'équation suivante présente le coût d'exploitation d'un véhicule à carburant ($i = 1$) :

$$C_{O1} = \left(\frac{Y_1 \cdot v_1}{eff_1} \right) \cdot C_{carb} \quad (2.10)$$

Avec les notations complémentaires :

- eff_1 : efficacité énergétique (kms/litre).
- C_{carb} : coût unitaire du carburant (u.m./litre).
- Y_1 : nombre de mois d'utilisation des véhicules à carburant (mois).
- v_1 : taux d'utilisation associé au véhicule à carburant (kms/mois).

✓ Coût d'exploitation pour un véhicule électrique (C_{O2})

Le fonctionnement d'un véhicule électrique est caractérisé par la consommation électrique et la spécificité de la technologie utilisée pour la batterie notamment (autonomie, cycles de recharge, etc.). Le coût moyen d'exploitation des véhicules électriques peut être exprimé comme la somme du coût moyen des batteries à utiliser et du coût moyen des recharges sur la période d'utilisation.

$$C_{O2} = C_{unit} \cdot \left[\frac{Nb_{AverCh}}{Nb_{MaxCh}} \right] + C_{ch} \cdot Nb_{AverCh} \quad (2.11)$$

Où le nombre moyen de recharges sur une période d'utilisation, Nb_{AverCh} , se définit par :

$$Nb_{AverCh} = \left[\frac{Y_2 \cdot v_2}{\theta} \right] \quad (2.12)$$

Avec comme notations complémentaires :

- C_{ch} : coût forfaitaire d'une recharge pour une batterie électrique (u.m).
- C_{unit} : coût unitaire d'une nouvelle batterie électrique (u.m).
- Nb_{MaxCh} : nombre maximum de recharges pour une batterie électrique.
- θ : autonomie d'une batterie électrique (kms).
- Y_2 : nombre de mois d'utilisation des véhicules électriques (mois).
- v_2 : taux d'utilisation associé à un véhicule électrique (kms/mois).

2.3.4 Coût de l'impact sur l'environnement (C_{Ei})

L'impact environnemental majeur considéré dans ce travail est l'émission du CO_2 . En se référant aux travaux de [Prud'homme and Koning 2012], le coût moyen de l'impact sur l'environnement s'exprime comme suit :

$$C_{Ei} = CU_{CO_2} \cdot Y_i \cdot v_i \cdot g_i \cdot \left(\frac{1}{eff_i} \right) \quad (2.13)$$

Avec les notations complémentaires suivantes :

- CU_{CO_2} : coût unitaire du CO_2 émis dans l'espace (u.m/kg).
- g_i : quantité de CO_2 émis par chaque type i de véhicules :
 - pour les véhicules à carburant ($i = 1$), la quantité de CO_2 s'exprime en (kg/litre).
 - pour les véhicules électriques ($i = 2$), la quantité de CO_2 s'exprime en (kg/kWh).
- eff_i : efficacité énergétique par chaque type i de véhicules :
 - pour les véhicules à carburant ($i = 1$), l'efficacité énergétique s'exprime en (kms/litre).
 - pour les véhicules électriques ($i = 2$), l'efficacité énergétique s'exprime en (kms/kWh).

2.3.5 Valeur de revente d'un véhicule (V_{Ri})

La valeur de revente d'un véhicule, quel que soit son type, peut être estimée par l'équation suivante :

$$V_{Ri} = C_{Ai} \cdot \sum_k (a_{ik} \cdot T_i + b_{ik}) \cdot 1_{[12.(k-1) \leq T_i \leq 12.k]} \quad (2.14)$$

Avec comme notations complémentaires :

- V_{Ri} : valeur de revente d'un véhicule de type i (u.m).
- C_{Ai} : coût d'acquisition d'un véhicule de type i (u.m).
- K : nombre total de kilomètres à parcourir par l'ensemble de tous les véhicules (kms).
- T_i : durée de possession de chaque véhicule de type i (mois).
- (a_{ik}) et (b_{ik}) : paramètres de dépréciation des valeurs des véhicules en fonction du temps. En effet, le prix de chaque véhicule neuf se déprécie au cours du temps ce qui conduit à un coût réel du véhicule différent selon le type.
- $1_{[12.(k-1) \leq T_i \leq 12.k]}$: fonction indicatrice équivalente à $\begin{cases} 1 & \text{si } T_i \in [12.(k-1), 12.k] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

Concernant la dépréciation de la valeur des véhicules par type, nous constatons, selon les références suivantes ([Legipermis, 2020] et [Le Point, 2013]), qu'un véhicule neuf (type

carburant ou électrique) perd jusqu'à 25% de sa valeur au cours de la première année. En revanche, un véhicule à carburant se déprécie à un rythme plus lent par rapport à un type électrique. Le tableau suivant montre la dépréciation moyenne des véhicules neufs par type et par an.

Tableau 2.1 - La décote moyenne des véhicules neufs par an.

Véhicule à carburant		Véhicule électrique	
Années	Décote %	Années	Décote %
1	-25%	1	-25%
2	-15%	2	-17%
3	-10%	3	-20%
4	-10%	4 et +	-33%
5	-7%		
6 et +	-7%		

Pour mémoire, T_i représente la durée de possession d'un véhicule de type i qui comprend le nombre de mois d'utilisation des véhicules de type i (Y_i) et la durée de toutes les actions de maintenance préventive et corrective effectuées sur les véhicules. Elle s'exprime comme suit :

$$T_i = \left[Y_i + \emptyset(Y_i, m_i) \cdot \mu c_i + \left[\frac{Y_i}{m_i} \right] \cdot \mu p_i \right] \quad (2.15)$$

On rappelle que $\emptyset(Y_i, m_i)$, exprimé précédemment par l'équation (2.9), représente le nombre moyen de pannes (réparations minimales) sur la durée d'utilisation d'un véhicule de type i pour une période PM donnée, à savoir m_i .

Nous rappelons que l'objectif de ce chapitre est de présenter la stratégie « Achat - Revente » afin de dimensionner un parc de véhicules constitué par des véhicules fonctionnant avec des énergies de type carburant ($i=1$) ou de type électrique ($i=2$). En outre, nous nous intéressons à la modélisation mathématique afin de répondre aux exigences de ce chapitre. En effet, en utilisant les équations étudiées (éq. 2.7 à éq. 2.15), et en considérant $N = 2$ types de véhicules (carburant et électrique), l'expression analytique du coût total moyen (éq. 1) est donnée ci-dessous en fonction des variables de décision X_i , Y_i , m_i et v_i .

$$ETC_{(N=2)} = \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^2 X_i \cdot C_{Ai} \\ + \sum_{i=1}^2 X_i \cdot \left(C_{Mci} \cdot \phi(Y_i, m_i) + C_{MPi} \cdot \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \right) \\ + X_1 \cdot \left(\frac{Y_1 \cdot v_1}{eff_1} \right) \cdot C_{carb} + X_2 \cdot \left(C_{unit} \cdot \left\lfloor \frac{Nb_{AverCh}}{Nb_{MaxCh}} \right\rfloor + C_{ch} \cdot Nb_{AverCh} \right) \\ + \sum_{i=1}^2 X_i \cdot CU_{CO_2} \cdot Y_i \cdot v_i \cdot g_i \cdot \left(\frac{1}{eff_i} \right) \\ - \sum_{i=1}^2 X_i \cdot C_{Ai} \cdot \sum_k (a_{ik} \cdot T_i + b_{ik}) \cdot 1_{[12.(k-1) \leq T_i \leq 12.k]} \end{array} \right] \quad (2.16)$$

2.4 Études numériques

Dans cette section, une étude numérique, basée sur un cas typique d'une entreprise de logistique, est présentée pour illustrer le modèle mathématique présenté dans la section précédente par l'équation (2.16). En effet, nous avons utilisé deux marques de véhicules utilitaires (Renault et Nissan) afin de présenter la robustesse du modèle proposé pour cette stratégie « Achat - Revente ».

Notre modèle mathématique impliquant $(4 \times N)$ variables de décision $((X_i, Y_i, m_i \text{ et } v_i), i \in \{1, \dots, N\})$ et chaque variable pouvant prendre plusieurs dizaines ou centaines de valeurs différentes, nous nous retrouvons face à une explosion combinatoire ne permettant pas d'obtenir la solution optimale dans un délai raisonnable. En effet, le modèle mathématique développé dans ce chapitre appartient aux problèmes de programmation non linéaire en nombres entiers mixtes non convexes (MINLP), considéré comme (NP-Hard).

D'autre part, plusieurs méta-heuristiques existent pour résoudre ces problèmes tels que les algorithmes génétiques ou d'autres moins connues comme (*Cuckoo search*, *Grey Wolf Optimizer*, etc). En effet, [Hui et al. 2017] ont montré dans leur travail que l'utilisation de l'algorithme (*Grey Wolf Optimizer*) conduit à l'optimum, et ce en particulier lorsqu'il est utilisé dans les données de haute dimension. D'autre part, [Chitrakant and Srinivasu, 2020] ont travaillé sur le développement d'une approche pour la classification des mégadonnées en utilisant le classificateur (*Correlative Naive Bayes*) basé sur les méta-heuristiques (*Cuckoo search*) et (*Gray Wolf Optimizer*). Selon ces auteurs, ces méta-heuristiques sont fiables aux défis du traitement de grandes quantités de données. Vu la complexité et la combinaison importante de nos variables de décisions à trouver, une résolution numérique (exploration de

toutes les combinaisons) en utilisant MATLAB ne pourra pas résoudre ce problème dans un délai convenable. De ce fait, l'utilisation d'un algorithme génétique (GA) dans le code traduit en langage MATLAB s'est avéré nécessaire d'autant qu'il a pu démontrer son efficacité dans des problèmes similaires (MINLP) et largement publié dans la littérature [Ponsich et al. 2007].

En effet, l'algorithme génétique est basé sur le principe de l'évolution Darwinienne. À partir d'un ensemble de solutions initiales générées aléatoirement, des opérations génétiques (croisements et mutations) sont effectuées pour générer de nouvelles solutions potentiellement meilleures. L'évaluation de la solution est basée sur une fonction objective (*fitness*) qui, pour notre cas, correspond à l'équation (2.1). Pour garantir une solution efficiente, il est habituel de retenir les meilleures solutions (élites) au fil des générations.

Pour résoudre ce problème de type (MINLP), l'algorithme génétique proposé par la « *toolbox* » « *Global Optimization* », du logiciel MATLAB (Version R2019a), s'est avéré adapté à notre problématique après l'avoir largement testé.

Nous rappelons que notre objectif, dans cette partie, est de proposer un algorithme nous permettant, par simulation, de trouver nos variables de décisions quasi-optimales dans le but de dimensionnement, de manière efficace, un parc de véhicules selon une stratégie d'achat et de revente en fin de mission. Un flowchart est proposé pour illustrer la démarche de notre procédure numérique.

2.4.1 Procédure numérique

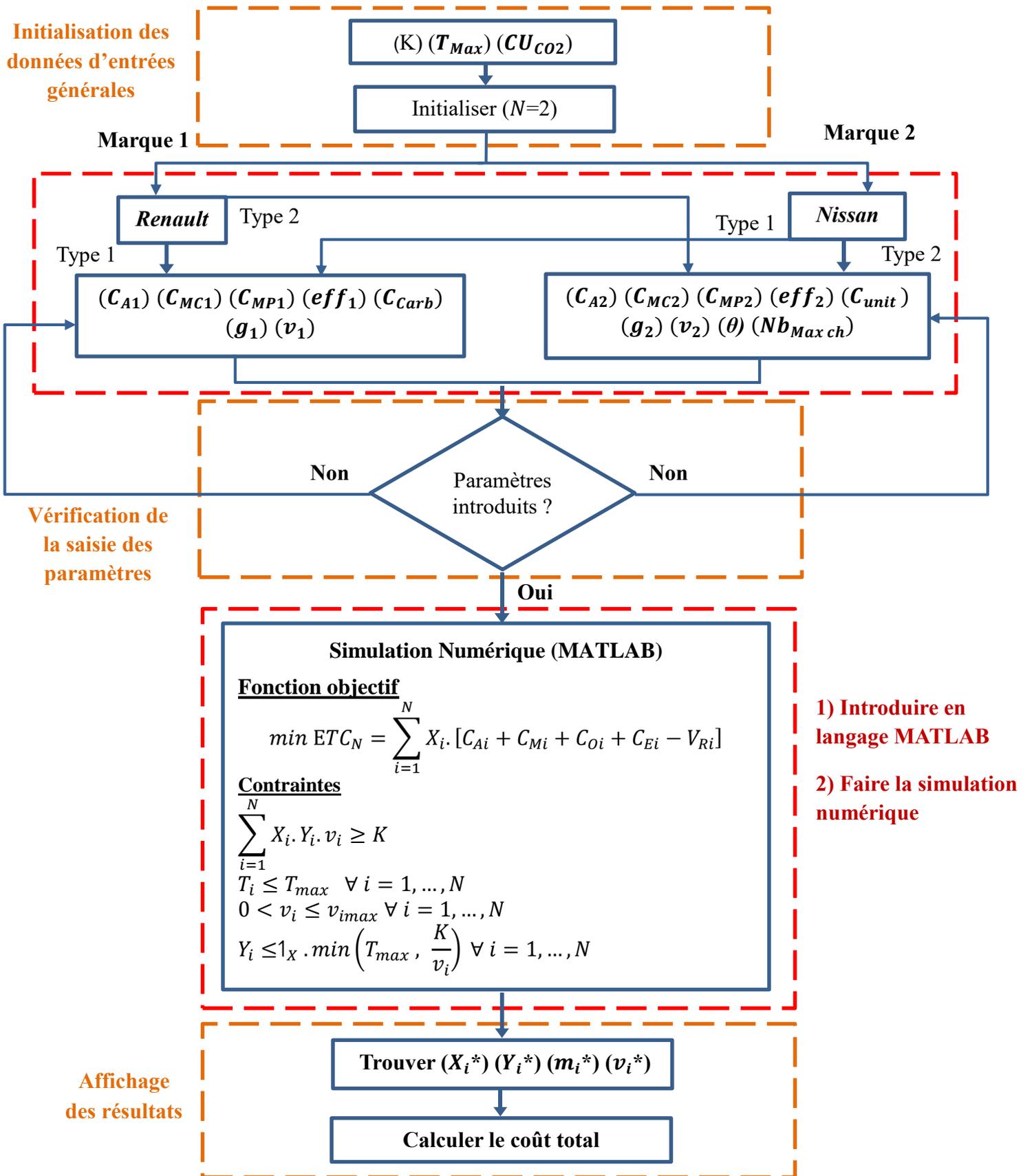


Figure 2.2 – Flowchart de la procédure numérique développée

2.4.2 Paramètres d'entrées

L'exemple numérique suivant est basé sur deux marques de véhicules (Renault et Nissan). Les données, présentées dans les tableaux (2.2) et (2.3), sont collectées à partir des fiches techniques des concessionnaires des véhicules.

Nous considérons 2 types de véhicules (carburant et électrique) et des missions à effectuer sur une période T_{max} de 5 ans (soit 60 mois). Il est à noter que les paramètres liés à l'efficacité énergétique et aux émissions de CO_2 ou à leur teneur en fonction du type de véhicule sont les mêmes que ceux utilisés par [Prud'homme and Koning, 2012].

Tableau 2.2 - Paramètres d'entrées

		Les données d'entrées numériques			
K	(kms)	17 000 000			
T_{Max}	(mois)	60			
CU_{CO_2}	(€/kg)	0.056			
		<u>Marque 1: Renault</u>		<u>Marque 2: Nissan</u>	
		Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$	Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$
C_{Ai}	(€)	0.5	0.5	0.5	0.5
C_{MCi}	(€)	17 500	30 500	22 500	39 588
C_{MPi}	(€)	800	1 200	800	1 200
μ_{Ci}	(mois)	500	400	500	400
μ_{Pi}	(mois)	1/30	1/30	1/30	1/30
v_{imin}	(kms/mois)	2/30	2/30	2/30	2/30
v_{imax}	(kms/mois)	1 500	1 500	1 500	1 500
eff_1	(kms/litre)	24 000	24 000	24 000	24 000
g_1	(kg/litre)	20	-	20	-
C_{carb}	(€/litre)	2.6	-	2.6	-
eff_2	(kms/kWh)	1.5	-	1.5	-
g_2	(kg/kWh)	-	6	-	5
C_{ch}	(€)	-	0.09	-	0.09
C_{Unit}	(€)	-	5.11	-	5.95
θ	(kms)	-	7 360	-	6 100
Nb_{MaxCh}		-	160	-	250
		-	1 200	-	1 200

Pour ce problème, la distribution de probabilité associée à la défaillance des véhicules est une distribution de Weibull avec un taux de défaillance croissant. Pour chaque véhicule, les paramètres de la distribution de Weibull utilisés sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.3 - Paramètres de la distribution de Weibull

	Paramètre d'échelle	Paramètre de forme	MTBF (mois)
Véhicule à carburant	9	2	7.98
Véhicule électrique	13	2	11.52

2.4.3 Résultats obtenus

Sur la base de l'algorithme génétique utilisé ainsi que du paramétrage réalisé (*Max Generations* = 100000 et *Max Stall Generations* = Inf), nous obtenons dans un délai raisonnable (environ 15 minutes) une solution quasi-optimale (Figure 2.3 et Tableau 2.4) respectivement après la 63 458^{ème} et 58 964^{ème} générations pour les deux exemples. Après de nombreux tests, nous avons pu constater qu'il n'était pas nécessaire d'augmenter le nombre de générations en fonction des solutions obtenues et du temps écoulé.

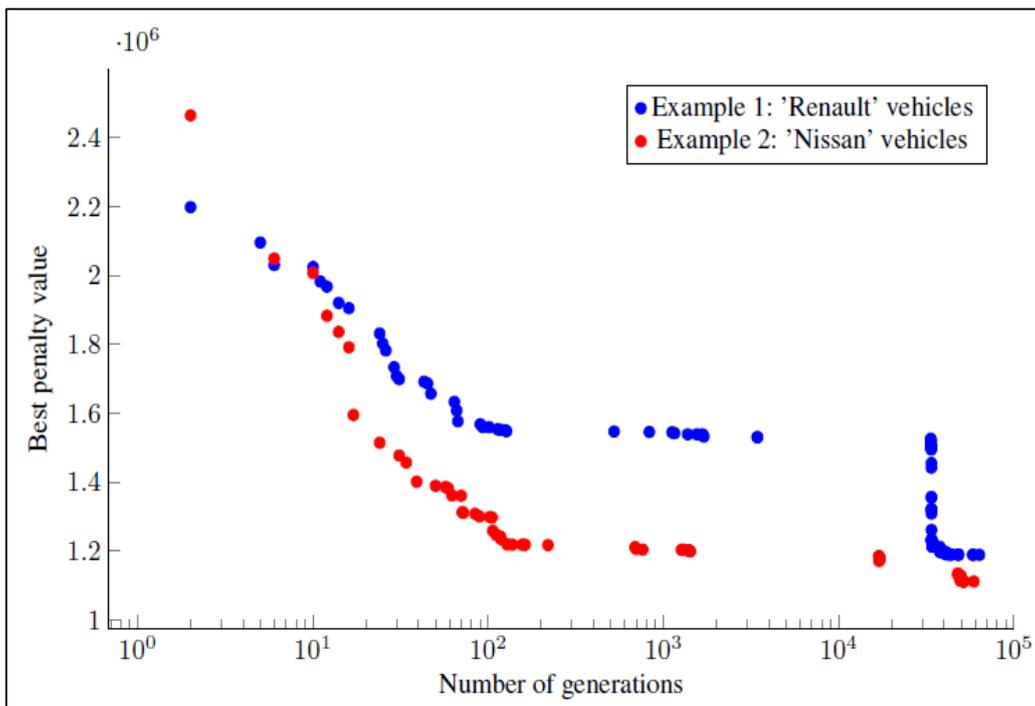


Figure 2.3 - Résultats de la méta-heuristique utilisée

Nous rappelons que les variables de décision (X_i , Y_i , m_i et v_i) représentent respectivement pour chaque véhicule de type i , le nombre total de véhicules, le nombre de mois d'utilisation des véhicules, la période des maintenances préventives à respecter pour chaque véhicule et le taux d'utilisation associé à chaque véhicule de type i . Les valeurs obtenues pour ces variables de décision sont présentées dans le tableau (2.4).

Dans le même tableau, sont également présentés, le nombre des actions de maintenances préventives ($\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor$), le nombre de kilomètres à parcourir par chaque véhicule ($Y_i \cdot v_i$), et la durée de possession pour chaque type de véhicule (T_i). Finalement, le tableau fournit aussi la valeur de revente ($X_i \cdot V_{Ri}$) et les différents coûts moyens totaux pour tous les véhicules de chaque type (acquisition : ($X_i \cdot C_{Ai}$), maintenance : ($X_i \cdot C_{Mi}$), exploitation : ($X_i \cdot C_{Oi}$), et l'impact sur l'environnement : ($X_i \cdot C_{Ei}$), leur somme (PC_i) ainsi que le coût total moyen ($ETC_{(N=2)}$).

Tableau 2.4 - Résultats obtenus

	Exemple 1: véhicule (Renault)		Exemple 2: véhicule (Nissan)	
	Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$	Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$
X_i	3	12	1	15
Y_i (mois)	13	57	5	47
m_i (mois)	8	23	-	19
v_i (kms/mois)	24 000	23 500	16 000	24 000
$\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor$	1	2	-	2
$Y_i \cdot v_i$ (kms)	312 000	1 339 500	80 000	1 128 000
T_i (mois)	14	58	6	48
$X_i \cdot V_{Ri}$ (€)	38 391	144 729	18 563	236 050
$X_i \cdot C_{Ai}$ (€)	52 500	366 000	22 500	593 820
$X_i \cdot C_{Mi}$ (€)	4 618	157 016	247	137 294
$X_i \cdot C_{Oi}$ (€)	70 200	1 043 230	6 000	677 196
$X_i \cdot C_{Ei}$ (€)	6 814	13 502	582	17 055
PC_i (€)	134 132	1 579 747	29 329	1 425 365
$PC_i - X_i \cdot V_{Ri}$ (€)	95 741	1 435 018	10 767	1 189 316
$ETC_{(N=2)}$ (€)	1 530 759		1 200 082	
$\frac{PC_i - X_i \cdot V_{Ri}}{X_i \cdot Y_i \cdot v_i}$ (€/km)	0.102	0.089	0.135	0.070

Après analyse des résultats obtenus pour le premier exemple (marque Renault), il apparaît que 15 véhicules doivent être acquis : 3 correspondent à des véhicules à carburant et 12 électriques. Les véhicules à carburant seront utilisés pendant 13 mois, chacun d'eux devant parcourir une distance totale de 312 000 kms avec un taux d'utilisation moyen de 24 000 kms/mois soit (800 kms/jour) et pour lesquels une action de maintenance préventive doit être entreprise tous les 8 mois. Les véhicules électriques seront utilisés 57 mois, chacun d'entre eux devrait parcourir

une distance totale de 1 339 500 kms avec un taux d'utilisation de 23 500 kms/mois, et une action de maintenance préventive tous les 23 mois. Ces résultats conduisent à des coûts totaux moyens par type de véhicule respectivement de 95 741 € pour les véhicules à carburant soit (0.102 €/km) et de 1 435 018 € pour les véhicules électriques soit (0.089 €/km), soit un coût total moyen de 1 530 759 € en tenant compte des valeurs de revente.

Concernant la marque Nissan, les résultats obtenus sollicitent l'utilisation de 15 véhicules électriques pendant 47 mois avec une action de maintenance préventive tous les 19 mois. D'autre part, chaque véhicule parcourra 24 000 kms/mois. Pour ces véhicules électriques, le coût total moyen est évalué à 1 189 316 € soit (0.070 €/km). Concernant les véhicules à carburant, 1 seul doit être acquis et utilisé pendant 5 mois avec un taux d'utilisation de 16 000 kms/mois et sans aucune action de maintenance préventive. Le coût total prévu est de 10 767 € soit (0.135 €/km) pour ce véhicule. L'utilisation de véhicules à carburant et de véhicules électriques génère un coût total attendu de 1 200 082 €.

Globalement, nous constatons qu'il existe des similitudes entre les deux exemples. L'utilisation de véhicules électriques est favorisée en raison d'un coût total par kilomètre moindre. Pour ces véhicules, le taux d'utilisation est pratiquement au niveau maximum autorisé. Cependant, une remarque doit être notée pour l'exemple 1 (véhicules « Renault »), en raison des caractéristiques de la batterie. Ce dernier a une autonomie de 160 kms et peut être rechargé jusqu'à 1 200 fois, lui permettant de parcourir 192 000 kms avec une seule batterie. Parcourir 500 kms de plus par mois $v_2 = 24\,000$ kms/mois nécessiterait l'achat d'une autre batterie. Les véhicules à carburant ne sont utilisés que pour compléter le nombre de kilomètres à parcourir, où l'utilisation de véhicules électriques supplémentaires dépasserait de loin le nombre total de kilomètres souhaité (K). De plus, si le coût total par kms des véhicules à carburant est plus élevé, parcourir une distance plus courte est économiquement plus intéressante (par exemple, pour les véhicules « Nissan » : $(80\,000 \times 0.135 \ll 1\,128\,000 \times 0.070)$).

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le dimensionnement d'un parc de véhicules selon une stratégie « Achat - Revente » en fin de mission. Notre étude d'un parc d'appui logistique constitué par deux types de véhicules (carburant et électrique) dédiés aux missions logistiques se caractérisent par un nombre de kilomètres à parcourir pendant une durée maximale requise. La composition du parc de véhicules doit minimiser le coût total prévu, correspondant à la différence entre le coût total moyen de ces paramètres (acquisition, maintenance, exploitation

et impact sur l'environnement) et la valeur de revente. Dans cette perspective, nous avons développé un modèle analytique de type (MINLP) afin d'atteindre nos objectifs souhaités. La minimisation du coût total a pour objectif la détermination simultanée des quatre variables de décision, à savoir : le nombre de véhicules par type, et pour chaque véhicule : le nombre de mois d'utilisation, la période de la maintenance préventive et le taux d'utilisation. La particularité de ce travail réside dans le choix du critère économique, mais surtout des contraintes environnementales et opérationnelles dans la modélisation analytique.

En outre, pour avoir les résultats des huit variables de décision citées (quatre pour chacun des deux types de véhicules), une méta heuristique (algorithme génétique) a été utilisée pour trouver une solution optimale dans un temps de calcul raisonnable (15 minutes) pour toute instance du problème. Deux exemples numériques ont été présentés. Le premier concerne deux types de véhicules utilitaires (carburant et électrique) pour la marque Renault et le second pour la marque Nissan. Un exemple numérique a été présenté et une analyse des résultats a été interprétée.

Dans le prochain chapitre, nous conserverons ce même problème de dimensionnement, mais selon une stratégie de « *leasing* » qui diffèrera de la stratégie d'achat et de revente adoptée dans ce présent chapitre.

Chapitre 3

Dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie de ‘*Leasing*’

Résumé

Ce présent chapitre s’articule toujours autour du dimensionnement d’un parc de véhicules devant satisfaire une mission pendant une durée prédéfinie, mais selon une stratégie de location longue durée, appelée également « *leasing* ». Dans ce chapitre, et face au dimensionnement d’un parc d’appui logistique constitué selon deux typologies de véhicules, nous nous intéressons à la location de véhicules, contrairement au chapitre précédent où le parc de véhicules était constitué par l’acquisition et la revente des véhicules en fin de mission.

La particularité de ce chapitre consiste à dimensionner un parc de véhicules par la détermination du nombre optimal de véhicules de chaque type d’énergie à louer en fonction de leurs durées de location ainsi que du nombre de mois d’utilisation et de la périodicité des actions de maintenance. Ces différents paramètres représenteront donc nos variables de décision. On note que, dans ce nouveau concept, nous tenons compte de certaines contraintes liées au contrat de « *leasing* » telles que des pénalités liées aux excédents de kilomètres ou la prise en charge des actions de maintenance des véhicules toujours définies dans le contrat de « *leasing* ».

À cet égard, un modèle analytique faisant le lien entre les variables de décision et le coût total estimé est proposé. La fonction objective du coût total a été développée ; celle-ci intègre les coûts de location, d’exploitation, des maintenances préventives et correctives et des impacts sur l’environnement. Ainsi, l’objectif consiste à déterminer nos différentes variables de décision, qui, pour mémoire, sont : le nombre de véhicules de chaque type à louer, le nombre de mois d’utilisation de chaque véhicule, la périodicité des maintenances préventives pour chaque typologie de véhicules.

Des données ont été adoptées afin d’illustrer les résultats numériques. Une interprétation des résultats obtenus est présentée à la fin de ce chapitre.

3.1 Introduction et étude bibliographique sur le « *Leasing* »

Tenant compte du contexte économique complexe et afin d'éviter la prise de risques, de nombreuses entreprises choisissent de louer des matériels industriels, médicaux ou des moyens de transport plutôt que de les acheter. En effet, l'acquisition de nouveaux équipements s'avère très coûteuse et parfois non amortissable. De ce fait, le calcul de la rentabilité financière des entreprises industrielles et, en particulier, les questions de louer ces équipements, représentent un nouvel axe et un cadre de recherche très intéressant. Ces objectifs seraient de permettre aux industriels de diminuer les coûts, d'assurer la production et de créer un accord « gagnant-gagnant » avec un prestataire de service afin d'assurer un bénéfice relativement équitable. Les travaux de recherche sur le domaine du « *leasing* » des équipements sont un domaine d'actualité. Nous pouvons citer par exemple le travail de [Lestari and Kurniati, 2017] qui ont traité l'importance de la location d'un équipement industriel au lieu de l'acquérir en terme de bénéfice. En effet, ils ont abordé, dans leur travail, la notion de la prolongation de la période de location d'équipement déjà loué. Ainsi, ils ont développé un modèle mathématique dans le but de convaincre le propriétaire de prolonger la période de location. La particularité de ce travail réside dans l'intégration de la maintenance dans la nouvelle période de location envisagée afin d'assurer la maintenabilité de l'équipement. Le modèle mathématique a pour objectif de déterminer la limite de contrôle optimale, le nombre ainsi que la périodicité de la maintenance préventive et, par conséquent, la période optimale de la prolongation de la location. Un exemple numérique a été réalisé dans le cadre de ce travail afin d'illustrer les influences de la période prolongée de la location et la politique de maintenance préférable.

Dans une autre étude, [Ben mabrouk et al., 2019] ont traité le problème de l'inspection des équipements loués. En effet, ils ont proposé un modèle mathématique permettant de trouver une séquence quasi-optimale des instants d'inspection des équipements loués afin de détecter des problèmes techniques et réagir sur l'équipement concerné en cas d'urgence ou nécessité. L'objectif recherché dans leurs travaux réside dans la garantie d'un coût minimal de fonctionnement. Un exemple numérique a été présenté afin d'illustrer les résultats du modèle proposé tout en analysant l'effet de la variation du coût total estimé en fonction des coûts des pénalités causées par des arrêts imprévus, des coûts d'inspection, de la durée de location et de la fiabilité de l'équipement.

Dans le même cadre, il existe d'autres travaux qui ont tenu compte simultanément du « *leasing* » des équipements et de la maintenance, nous pouvons citer les travaux de [Ben

Mabrouk and Chelbi, 2020] qui ont travaillé sur la location des équipements industriels avec une période de garantie où le propriétaire de l'équipement doit garantir au locataire le bon fonctionnement des équipements. Sur le plan opérationnel, le propriétaire assure les actions de maintenances en prenant leurs coûts à sa charge. Après l'expiration de la période de garantie, les actions de maintenance sont toujours assurées par le propriétaire, mais sont facturées au locataire. Une originalité de ce travail réside dans un coût de pénalité envers le propriétaire si le nombre de réparations dépasse une certaine limite sur la période de location. Par conséquent, le propriétaire est contraint d'instaurer une politique de maintenance efficace pour assurer l'utilisation des équipements de manière économique. Sur cette base, un modèle mathématique a été développé afin de déterminer la périodicité des actions des maintenances préventives dans le but de maximiser le bénéfice total attendu au cours de la période de location en tenant compte évidemment de la garantie proposée dans le contrat. Un exemple numérique et une analyse de sensibilité ont été réalisés dans le cadre de ces travaux afin de montrer l'efficacité du modèle proposé. Il a été démontré analytiquement que le profit total attendu diminue lorsque la période de garantie augmente, nécessitant donc de chercher conjointement la périodicité optimale de maintenance préventive ainsi que la durée de garantie à proposer en considérant les coûts de « *leasing* » ainsi que les caractéristiques fiabilistes du système industriel.

Dans une autre étude, [Ben Mabrouk et al., 2016a] ont traité le problème d'optimisation de la maintenance lorsque plusieurs actions de « *leasing* » portent sur un équipement. Ils ont développé un modèle analytique afin d'établir un plan de maintenance préventive économique durant le cycle de vie d'un équipement soumis à plusieurs contrats de location en tenant compte de la période de garantie. La particularité de ce modèle réside dans la prise en considération simultanée de l'investissement pour l'équipement, du coût de location et des coûts des actions de maintenances réalisées durant ou hors des périodes de garantie. Un autre type de problème qui concerne la location successive de l'équipement a été étudié aussi par [Wang et al. 2018]. Dans ce dernier travail, les auteurs ont travaillé sur l'amélioration des clauses du contrat et le développement d'une nouvelle stratégie de maintenance préventive pour une nouvelle mise en location de l'équipement. Cette amélioration est basée sur le taux d'utilisation précédent de l'équipement en considérant la période de garantie. Dans cet article, le coût des actions de maintenance est pris en charge seulement par le propriétaire ou partagé avec le locataire, selon le contrat adopté par les deux parties.

Par ailleurs, nous pouvons citer les travaux de [Pongpech and Murthy, 2006] qui ont travaillé sur une politique de maintenance préventive optimale pour des équipements loués dans

l'objectif de minimiser les frais de pénalité. Ils ont considéré deux types de pénalité pour un équipement loué sur une période prédéfinie : un coût de pénalité si la réparation n'est pas terminée à temps et un autre coût de pénalité pour chaque défaillance apparue au cours de la période de location. De ce fait, l'adoption d'un plan de maintenance préventive efficace permet de réduire les coûts de pénalité. Ces travaux confirment l'importance d'instaurer une politique optimale de maintenance préventive périodique afin d'assurer un compromis entre la pénalité et le coût de la maintenance. En gardant la même réflexion de location des équipements, [Zhou et al., 2014] ont proposé une politique de maintenance préventive « multi-phases » pour des équipements loués. Ils ont intégré les notions de maintenances préventives périodiques et séquentielles dans leur modélisation tout en introduisant aussi le principe de pénalité. La politique développée est basée sur la méthode de réduction de la durée de vie de l'équipement. La période de location est subdivisée en plusieurs phases de maintenances préventives. Dans chaque phase, l'équipement loué est entretenu périodiquement alors que l'intervalle de la maintenance préventive change uniquement lorsqu'une nouvelle phase d'action préventive commence. Un exemple numérique a permis de démontrer que le coût total de la maintenance concernant la politique de maintenance proposée, dite « multi-phase », est généralement inférieur à celle de la politique de maintenance préventive classique.

Dans le même cadre, [Schutz and Rezg, 2013] ont travaillé sur la stratégie de maintenance pour des équipements loués. En effet, deux stratégies ont été proposées. La première consiste à effectuer des actions des maintenances préventives dès que la fiabilité du système atteint un seuil prédéfini par le client. Une telle stratégie est caractérisée par une réduction de la durée de vie de l'équipement. L'approche est basée sur la détermination du facteur d'efficacité de la maintenance optimale permettant les coûts minimums des maintenances. Pour la deuxième stratégie, ils ont remplacé les actions de maintenance corrective par des actions d'amélioration durant un intervalle à déterminer afin de minimiser les coûts de maintenance. Les deux stratégies ont été résolues à l'aide de procédures numériques et d'algorithmes de simulation à événements discrets.

D'un autre côté, [Hajej et al., 2016] ont travaillé sur une approche relativement nouvelle qui consiste à optimiser conjointement les systèmes de production et la maintenance de équipements loués en tenant compte de leurs délais de garantie. En effet, un modèle mathématique a été développé afin de minimiser le coût total prévu de l'ensemble cité. De plus, une optimisation conjointe a été réalisée dans le but d'obtenir un plan de production optimal

ainsi que les périodes des maintenances préventives correspondantes. Un exemple numérique et une étude de sensibilité ont été présentés pour illustrer l'approche proposée.

[Hajej et al., 2020] se sont également intéressés à l'optimisation conjointe de la production et de la planification de la maintenance préventive d'un système de production constitué par des machines louées en redondance. Le système de production doit satisfaire une demande aléatoire sur une période prédéfinie. Le nombre de machines à louer, la quantité à produire par chacune d'entre elles et la demande des clients sont variables. De ce fait, une démarche d'optimisation conjointe d'une stratégie de maintenance et d'un plan de production économique a été développée en tenant compte de l'influence des taux d'utilisation sur la dégradation des machines. Ils ont déterminé dans une première étape le nombre quasi optimal des machines à louer ainsi que la quantité à produire au cours de chaque période. Dans une deuxième étape, et en se basant sur le plan de production déjà obtenu, une politique de maintenance préventive périodique avec des réparations minimales en cas de panne brusque pour chaque machine a été présentée.

Ces différentes études citées représentent un ensemble des travaux en relation avec la notion de la location des équipements industriels. En effet, cette partie a pour objectif de prouver l'importance de la location des équipements industriels dans les stratégies manufacturières. La décision qui devrait être prise repose donc sur un choix entre l'investissement pour l'achat d'équipement ou l'adoption d'une politique de « *leasing* » en tenant compte de toutes les contraintes liées à la maintenance et à la sollicitation de l'équipement.

Malgré ces différents travaux sur la location des équipements industriels, plusieurs entreprises font encore face à plusieurs autres difficultés opérationnelles. Les travaux cités préalablement sont focalisés exclusivement sur la location des équipements industriels sans donner d'importance aux moyens de manutention ou de transport. Vu l'importance de ces moyens dans la promotion du secteur industriel, il est important de s'orienter vers ce nouvel axe de recherche. Ces objectifs seraient de permettre aux industriels d'améliorer la gestion de leur flotte de véhicules dans le but de minimiser les coûts supplémentaires de logistique à investir. Nous pouvons citer, par exemple, le travail de [Balcik et al., 2015] qui ont prouvé, dans leur étude, la réussite du Haut-Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés (HCR) à l'amélioration de la gestion de leur parc de véhicules grâce à l'introduction d'un programme de location interne. Les auteurs ont comparé les indicateurs de performance de la flotte avant et après la mise en œuvre du programme de location interne. Ils ont ainsi pu indiquer que l'introduction du programme a impacté positivement la gestion de la flotte en réduisant les coûts

d'approvisionnement, la taille de la flotte et l'âge moyen de la flotte. Grâce à l'utilisation du programme de location interne, une diminution de la taille de la flotte de 11% a été réalisée entre avril 2013 et octobre 2015. Gardant le même contexte de location des véhicules, nous pouvons également citer le travail de [Miao et al., 2018] qui ont proposé une tarification complète pour une société chinoise de location de véhicules électriques dans le but d'optimiser le bénéfice d'exploitation annuel de location de ces types de véhicules. En effet, ils ont développé une stratégie de tarification sur le kilométrage et ont ainsi proposé un algorithme énumératif afin de déterminer la tarification optimale et pouvoir examiner l'influence de certains paramètres sur le profit total. Les auteurs ont prouvé, par l'utilisation de leur proposition, une augmentation significative du profit (entre 2.3 % et 69.8 %).

En se référant à l'étude bibliographique présentée, il s'avère intéressant de penser à l'adoption de la stratégie de « *leasing* » des véhicules pour une mission en tenant compte de la fiabilité des véhicules et du plan de maintenance approprié. De plus, nous avons constaté que la plupart des études rencontrées ont portées essentiellement sur l'amélioration d'un parc de véhicules existant en introduisant l'aspect de la location, alors que la particularité de notre thèse consiste à dimensionner un parc de véhicules non-existant. Sur cette base, nous nous intéressons à la location de véhicules par type d'énergie pour une durée prédéfinie dans le but de réaliser des missions logistiques. Plutôt que d'acheter des véhicules et de les revendre après la réalisation de leurs missions, nous avons préféré, dans cette nouvelle stratégie, louer les différents types de véhicules sur une période optimale tout en intégrant, aux conditions de location, l'aspect de la maintenance, d'exploitation et de l'impact sur l'environnement adaptés. Il est certain que le rapport entre les différents types de véhicules et les contraintes opérationnelles impactera la décision finale à prendre. Dans ce contexte, nous avons développé un modèle analytique qui serait en mesure d'aider au dimensionnement d'un parc de véhicules selon une stratégie de « *leasing* ».

Ce chapitre est organisé comme suit : la deuxième section sera consacrée à décrire précisément la problématique proposée, les hypothèses de l'étude retenues ainsi que les notations utilisées. Une troisième section sera dédiée à l'étude analytique et au développement de la stratégie envisagée. Un exemple numérique sera présenté dans la quatrième section afin d'illustrer le modèle mathématique développé et d'étudier l'impact des conditions opérationnelles et environnementales sur le dimensionnement du parc de véhicules selon cette stratégie choisie. Finalement, dans la cinquième section, nous présenterons la conclusion du chapitre.

3.2 Description du problème et hypothèse de travail

3.2.1 Inspiration du problème

La problématique soulevée dans ce chapitre concerne une entreprise de logistique spécialisée dans la distribution des produits, en utilisant des véhicules commerciaux, aux différents destinataires dispersés. Dans une telle situation, les véhicules doivent être disponibles aux services affectés. À cet égard, il est important de dimensionner un parc d'appui logistique qui sera en mesure de satisfaire les attentes des clients aussi bien par rapport au nombre total de kilomètres à parcourir que de la disponibilité des véhicules aux services. Vu l'émergence de l'aspect location longue durée « *leasing* » dans le domaine industriel et logistique, et notamment au niveau des différents types de véhicules pour un usage commercial, il est parfois préférable de louer un nombre optimal de véhicules, selon leurs typologies, tout en introduisant les conditions opérationnelles et la réglementation environnementale parmi les critères de choix. En effet, les véhicules ont des impacts négatifs sur l'environnement tels que le réchauffement climatique, la détérioration de la couche d'ozone, la dégradation des paysages, etc. De plus, les émissions gazeuses liées aux véhicules sont responsables de maladies, de dommages environnementaux et de problèmes de visibilité, comme le smog. Par conséquent, pour protéger l'environnement, les entreprises de logistique sont amenées à trouver des solutions pour contrôler les émissions de gaz ainsi que celles d'autres produits toxiques. En outre, le choix des véhicules à louer doit être raisonnable et fondé sur des bases scientifiques afin de satisfaire les clients dans un environnement sain avec un coût minimum. À cet égard, nous cherchons à louer une flotte de véhicules utilitaires afin de satisfaire une mission bien définie à long terme, en se basant sur deux types d'énergie : carburant ou électrique. Plus précisément, le présent chapitre est consacré à la détermination du nombre optimal des deux types de véhicules (carburant et électrique), le nombre de mois d'utilisation de chaque véhicule ainsi que la périodicité de maintenance préventive pour chaque véhicule. Cet objectif sera atteint par la minimisation du coût total attendu tout en intégrant essentiellement les coûts de location, de maintenance, d'exploitation et d'impact sur l'environnement.

3.2.2 Description de la stratégie

La stratégie dite de « *leasing* » se concentre sur la location de véhicules afin de constituer un parc d'appui logistique. Pour mémoire, notre problème consiste à déterminer le nombre optimal des véhicules par type à louer, tout en indiquant, leurs nombres de mois de disponibilité aux services et la périodicité de leurs maintenances préventives à respecter afin de minimiser le coût

total. La particularité de cette stratégie consiste à louer des véhicules, par type d'énergie, sur une période prédéfinie tout en intégrant un programme de maintenance préventive optimal développé en tenant compte évidemment des contraintes opérationnelles et environnementales. La contribution visée à travers le modèle analytique développé dans ce chapitre est de garantir, à la fois, la disponibilité des véhicules aux services affectés et le respect de l'environnement en pouvant privilégier un type d'énergie. Par ailleurs, nous intégrons dans cette modélisation les coûts de location, d'exploitation, d'impact sur l'environnement ainsi que les coûts de maintenance spécifiques à chaque type de véhicule dans une fonction objective. Cette fonction permettra de minimiser les différents coûts globaux et de déterminer simultanément les variables de décisions.

3.2.3 Hypothèses de l'étude

Les hypothèses adoptées pour le développement du modèle, en vue de déterminer les différentes variables de décisions, sont les suivantes :

- Le nombre total des kilomètres à parcourir par l'ensemble des véhicules à louer est supposé connu.
- Deux types d'énergie sont considérés (carburant et électrique).
- Chaque type de véhicule à louer parcourra (Y_i, v_i) kilomètres.
- Le locataire des véhicules assurera les actions de maintenance (correctives et préventives) et s'assurera de garantir l'état parfait des véhicules loués.
- Le coût de location des véhicules dépend du type de véhicule.
- Le locataire assurera le renouvellement des batteries pour les véhicules électriques loués.
- Tous les véhicules, d'un même type, parcourront le même nombre de kilomètres ; les véhicules de mêmes types sont supposés identiques et sont soumis au même taux de dégradation.
- La durée maximale pour assurer toutes les missions est supposée connue.
- Une durée de location minimale est imposée.
- Les différents coûts et les distributions de probabilité sont supposés être connus.

3.2.4 Notations

Les notations suivantes sont utilisées dans le modèle mathématique :

- T_{Max} : durée totale pour assurer toutes les missions (mois).

- T_{min} : durée minimale de location chaque véhicule de type i (mois).
- N : nombre de types de véhicules à louer.
- i : indice utilisé pour représenter le type de véhicule à louer, $i \in \{1, \dots, N\}$.
- K : nombre total des kilomètres à parcourir par tous type des véhicules loués (kms).
- ETC_N : coût total (u.m).
- C_{Li} : coût de location d'un véhicule de type i (u.m).
- T_i : durée de location de chaque véhicule de type i (mois)
- C_{Oi} : coût d'exploitation d'un véhicule loué de type i (u.m).
- C_{Mi} :coût total moyen des actions des maintenances d'un véhicule loué de type i (u.m).
- C_{Mci} :coût moyen d'une action de maintenance corrective d'un véhicule loué de type i (u.m).
- C_{TMci} : coût total moyen des actions de maintenance corrective d'un véhicule loué de type i (u.m).
- C_{MPi} : coût moyen d'une action de maintenance préventive d'un véhicule loué de type i (u.m).
- C_{TMPi} : coût total moyen des actions de maintenance préventive d'un véhicule loué de type i (u.m.)
- C_{Ei} : coût de l'impact sur l'environnement causé par un véhicule loué de type i (u.m).
- μ_{ci} : durée moyenne d'une action de maintenance corrective pour un véhicule loué de type i (mois).
- μ_{pi} : durée moyenne d'une action de maintenance préventive pour un véhicule loué de type i (mois).
- λ_i : taux de défaillance associé aux véhicules loués de type i .
- v_i : taux d'utilisation associé à chaque véhicule loué de type i (kms/mois).
- $\emptyset(Y_i, m_i)$: nombre moyen de pannes (réparation minimale) durant la période d'utilisation d'un véhicule loué de type i .
- 1_X : fonction indicatrice équivalent à $\begin{cases} 1 & \text{if } X_i \geq 1 \\ 0 & \text{if } X_i = 0 \end{cases}$
- 1_Y : fonction indicatrice équivalent à $\begin{cases} 1 & \text{if } Y_i \geq 1 \\ 0 & \text{if } Y_i = 0 \end{cases}$
- $[\cdot]$: partie entière inférieure.
- $\lceil \cdot \rceil$: partie entière supérieure.

Les variables de décision sont définies comme suit :

- X_i : nombre de véhicules loués par type i , $i \in \{1, \dots, N\}$, avec $X_i \in \mathbb{N}$.
- Y_i : nombre de mois d'utilisation des véhicules loués pour chaque type i , $i \in \{1, \dots, N\}$, avec, $Y_i \in \mathbb{N}$.
- m_i : périodicité des maintenances préventives à respecter pour chaque véhicule loué de type i (mois) avec $m_i \in \mathbb{N}^*$.

3.3 Étude analytique

Le but de cette partie consiste à développer analytiquement le coût total moyen de location des véhicules, par type d'énergie, sur un horizon de temps fini. Ce type de problème peut être formulé sous forme d'une fonction objective qui vise à minimiser les coûts de location, d'exploitation, d'impact sur l'environnement ainsi que la maintenance sous différentes contraintes. Pour élaborer le modèle analytique, nous avons supposé que la fonction objective développée (3.1) correspond au produit de la totalité des véhicules à louer de type d'énergie i (X_i) par la somme du coût de location d'un véhicule de type i par la durée de location de chaque véhicule de type i ($C_{Li} \cdot T_i$) ainsi que le coût total moyen des actions de maintenances (C_{Mi}), le coût d'exploitation moyen (C_{Oi}) et le coût moyen de l'impact sur l'environnement (C_{Ei}) associée à chaque véhicule de type i .

$$\min ETC_N = \sum_{i=1}^N X_i \cdot [C_{Li} \cdot T_i + C_{Mi} + C_{Oi} + C_{Ei}] \quad (3.1)$$

Sous les contraintes suivantes :

- Contrainte pour assurer le nombre total des kilomètres :

$$\sum_{i=1}^N X_i \cdot Y_i \cdot v_i \geq K \quad (3.2)$$

Les véhicules loués doivent assurer le nombre total des kilomètres à parcourir. Cette contrainte (3.2) s'explique par le nombre total des véhicules à louer multiplié par le nombre de mois d'utilisation de ces véhicules multiplié par le taux d'utilisation associé à chaque véhicule loué de type i . Ce nombre total de kilomètres à faire par tous types des véhicules loués doit être supérieur ou égal au nombre total de kilomètres à parcourir (K).

- Contrainte de durée maximale de service :

$$T_i \leq T_{max} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3.3)$$

Chaque véhicule à louer de type i a une durée de location. Cette durée ne doit pas dépasser la durée totale de toute les missions à réaliser. Autrement dit, les missions doivent être accomplies évidemment avant la durée de vie ou la totalité de toute les missions. À partir de cette réflexion, la contrainte (3.3) assurera le non-dépassement de la durée de location des véhicules (T_i) par rapport à la durée de vie du parc à dimensionner ou la durée totale de toutes les missions planifiées. En d'autres termes, les missions doivent être accomplies avant (T_{max}).

- Contrainte de durée minimum de service :

$$T_i \geq T_{min} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3.4)$$

Cette contrainte (3.4) garantit que la durée de location des véhicules de type i (T_i) doit être supérieure ou égale à la période minimale pour louer des véhicules. En d'autres termes, le locataire peut louer que pour une durée minimale prédéfinie.

- Contrainte d'admissibilité :

$$Y_i \leq 1_x \cdot \min\left(T_{max}, \frac{K}{v_i}\right) \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3.5)$$

Le modèle mathématique développé dans ce chapitre assure l'obtention d'un nombre quasi-optimal des véhicules à louer (par type) et d'un nombre de mois d'utilisation associé. Ces deux paramètres cités sont considérés en tant que variables de décision. À partir de cette logique, la contrainte (3.5) assure le fait que lorsqu'il n'y a pas de véhicule à louer, le nombre des mois d'utilisation d'un véhicule loué de type i (Y_i) doit impérativement être égal à 0 sinon (Y_i) est égal au nombre de mois maximum si la fonction indicatrice est égale à 1, c'est-à-dire l'existence au moins d'un véhicule à louer comme solution. Cette contrainte assure l'obtention de la variable de décision (Y_i) à partir du nombre des véhicules par type à louer.

Pour rappel, un modèle analytique a été proposé afin de dimensionner un parc de véhicules selon la stratégie « *leasing* ». À cet égard, nous formulons par la suite les différents coûts proposés dans la fonction objective.

3.3.1 Coût de location d'un véhicule (C_{Li})

Dans le présent problème, nous nous intéressons essentiellement au coût de location des véhicules. En effet, ce dernier représente un paramètre important dans notre deuxième stratégie et est obtenu par le produit du coût de location unitaire (proposé par le bailleur) et la durée de location de chaque véhicule de type i ($C_{Li} \cdot T_i$). Ce coût dépend souvent de la durée de location, de la marque et aussi du type de véhicule. Dans notre étude, T_i représente la durée de location d'un véhicule de type i qui comprend le nombre de mois d'utilisation de chaque véhicule loué de type i , noté Y_i , et la durée de toutes les actions de maintenance préventive et corrective effectuées sur les véhicules. Elle s'exprime comme suit :

$$T_i = \left[Y_i + \Phi(Y_i, m_i) \cdot \mu c_i + \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \cdot \mu p_i \right] \quad (3.6)$$

De manière similaire au chapitre précédent, nous considérons dans notre étude deux types de véhicules à louer (carburant ($i = 1$) et électrique ($i = 2$)). Ainsi, nous considérons que le coût de location des véhicules dépend du type de véhicule et de la durée de location envisagée. Nous proposons, dans le tableau 3.1, les coûts de location mensuelle des véhicules pour chaque type i . Ces coûts sont des propositions pour une location longue durée et n'incluent pas les coûts d'exploitation, de maintenance et d'impact sur l'environnement.

3.3.2 Coût total moyen de maintenance par véhicule (C_{Mi})

Nous rappelons que la politique de maintenance adoptée aux véhicules loués reste identique à celle adoptée dans le deuxième chapitre : politique de maintenance préventive imparfaite de type bloc avec réparation minimale à la panne. Par conséquent, l'expression analytique du coût total des actions de maintenance est développée d'une façon similaire au chapitre 2, comme exprimé par l'équation 3.7 :

$$C_{Mi} = C_{TMPi} + C_{TMCi} \quad (3.7)$$

$$\text{Alors : } C_{Mi} = C_{MPi} \cdot \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor + C_{MCI} \cdot \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor} \int_0^{m_i} e^{(j-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) dx \quad (3.8)$$

$$+ \int_0^{Y_i - \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor m_i} e^{\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \alpha} \cdot \lambda_i(x) dx$$

$$\text{avec : } j = 1, \dots, \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \quad (3.9)$$

3.3.3 Coût moyen d'exploitation (C_{oi})

Nous rappelons que le coût d'exploitation des véhicules loués est estimé à partir d'une fonction similaire à celle développée dans le chapitre 2 pour les deux types de véhicules. On rappelle les expressions analytiques des coûts d'exploitation pour les deux types de véhicule :

Type - carburant :

$$C_{O1} = \left(\frac{Y_1 \cdot v_1}{eff_1} \right) \cdot C_{carb} \quad (3.10)$$

Avec :

- Y_1 : nombre de mois d'utilisation des véhicules à carburant (mois).
- v_1 : taux d'utilisation associé au véhicule à carburant (kms/mois).
- eff_1 : efficacité énergétique (kms/litre).
- C_{carb} : coût unitaire du carburant (u.m/litre).

Type - électrique :

$$C_{O2} = C_{unit} \cdot \left[\frac{Nb_{AverCh}}{Nb_{MaxCh}} \right] + C_{ch} \cdot Nb_{AverCh} \quad (3.11)$$

Où :

$$Nb_{AverCh} = \left[\frac{Y_2 \cdot v_2}{\theta} \right] \quad (3.12)$$

Avec :

- C_{unit} : coût unitaire d'une nouvelle batterie électrique (u.m).
- Nb_{AverCh} : nombre moyen de recharges sur une période d'utilisation.
- Nb_{MaxCh} : nombre maximum de recharges pour une batterie électrique.
- C_{ch} : coût unitaire d'une recharge pour batterie électrique (u.m).

3.3.4 Coût de l'impact sur l'environnement (C_{Ei})

Le coût de l'impact sur l'environnement des véhicules loués est estimé de la même manière que dans le chapitre 2, et ce pour les deux types de véhicules. Nous rappelons l'expression analytique des coûts de l'impact sur l'environnement pour les deux types de véhicule :

$$C_{Ei} = CU_{CO2} \cdot Y_i \cdot v_i \cdot g_i \cdot \left(\frac{1}{eff_i} \right) \quad (3.13)$$

Avec :

- CU_{CO_2} : coût unitaire de CO_2 emis (u.m./kg).
- Y_i : nombre de mois d'utilisation des véhicules loués pour chaque type i .
- v_i : taux d'utilisation associé à chaque véhicule loué de type i (kms/mois).
- g_i : quantité de CO_2 émis par types des véhicules (kg/litre) – pour véhicule à carburant ($i=1$) et (kg/kWh) – pour véhicule électrique ($i=2$).
- eff_i : efficacité énergétique par type de véhicules (kms/litre) – pour véhicule à carburant ($i=1$) et (kms/kWh) – pour véhicule électrique ($i=2$).

En conclusion, l'expression analytique du coût total moyen se trouve exprimé ainsi :

$$ETC_{(N=2)} = \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^2 X_i \cdot C_{Li} \cdot \left[Y_i + \phi(Y_i, m_i) \cdot \mu c_i + \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \cdot \mu p_i \right] \\ + \sum_{i=1}^2 X_i \cdot \left(C_{Mci} \cdot \phi(Y_i, m_i) + C_{MPi} \cdot \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \right) \\ + X_1 \cdot C_{Carb} \cdot \left(\frac{Y_1 \cdot v_1}{eff_1} \right) + X_2 \cdot \left(C_{unit} \cdot \left\lfloor \frac{Y_2 \cdot v_2}{\theta \cdot Nb_{MaxCh}} \right\rfloor + C_{ch} \cdot \left\lfloor \frac{Y_2 \cdot v_2}{\theta} \right\rfloor \right) \\ + \sum_{i=1}^2 X_i \cdot CU_{CO_2} \cdot Y_i \cdot v_i \cdot g_i \cdot \left(\frac{1}{eff_i} \right) \end{array} \right] \quad (3.14)$$

3.4 Études numériques

Cette section est consacrée à l'étude numérique de la deuxième stratégie proposée pour laquelle nous allons considérer deux types des véhicules utilitaires (carburant et électrique) comme critère de choix et qui sont sujets à des défaillances aléatoires. Toutefois, diverses contraintes doivent être prises en considération : des contraintes opérationnelles, telle que le nombre total des kilomètres à parcourir sans oublier également les contraintes liées aux durées maximales et minimales de service. Les paramètres d'entrées présentés par la suite regroupent les données numériques relatives au dimensionnement du parc selon la deuxième stratégie de « *leasing* ».

Pour mémoire, notre objectif pour ce modèle développé dans ce chapitre consiste à trouver le nombre des véhicules à louer (X_i), le nombre de mois d'utilisation pour chaque type (Y_i) et la périodicité de maintenance (m_i) associée à chaque type de véhicule. Le modèle a été programmé sous MATLAB afin de trouver les résultats en se basant sur une résolution numérique. De plus, nous présentons dans cette section un exemple illustratif et nous discuterons les résultats obtenus.

3.4.1 Paramètres d'entrées

Nous considérons que les deux types des véhicules à louer ont des missions à effectuer sur une période T_{max} de 5 ans (60 mois). À noter que les coûts de « *leasing* » indiqués dans le tableau 3.1 représentent l'estimation des différents coûts proposés par les agences de location des véhicules utilitaires à long terme [Leazeco, 2020]. D'autre part, les paramètres liés à l'efficacité énergétique et la quantité de CO_2 émise par chaque type de véhicule correspondent aux mêmes paramètres que ceux utilisés par [Prud'homme and Koning, 2012]. Le tableaux 3.1 rappelle les paramètres d'entrées utilisés pour chaque type de véhicule. Dans notre étude, nous supposons qu'il s'agit de réaliser, sur un horizon de 5 ans, au moins 10 000 000 kilomètres avec un même taux d'utilisation (v_i) associé à chaque type de véhicule i . La relaxation du taux d'utilisation comme variable de décision a pour objectif d'assurer l'équilibre dans le choix des types de véhicules après la simulation vue qu'il s'agit d'une stratégie de « *leasing* » et non d'acquisition. D'autre part, toutes les missions doivent être réalisées en tenant compte de l'impact sur l'environnement. Dans ce cadre, [Ba et al. 2016] ont indiqué dans leur travail que le coût unitaire du CO_2 émis est égal à 0.05 u.m./kg.

Notre objectif dans cette partie consiste à proposer un algorithme afin de trouver nos variables de décisions et ainsi atteindre l'objectif du chapitre, à savoir le dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie de « *leasing* ». Dans ce cadre, un flowchart de la procédure numérique est présenté dans la figure suivante.

3.4.2 Procédure numérique

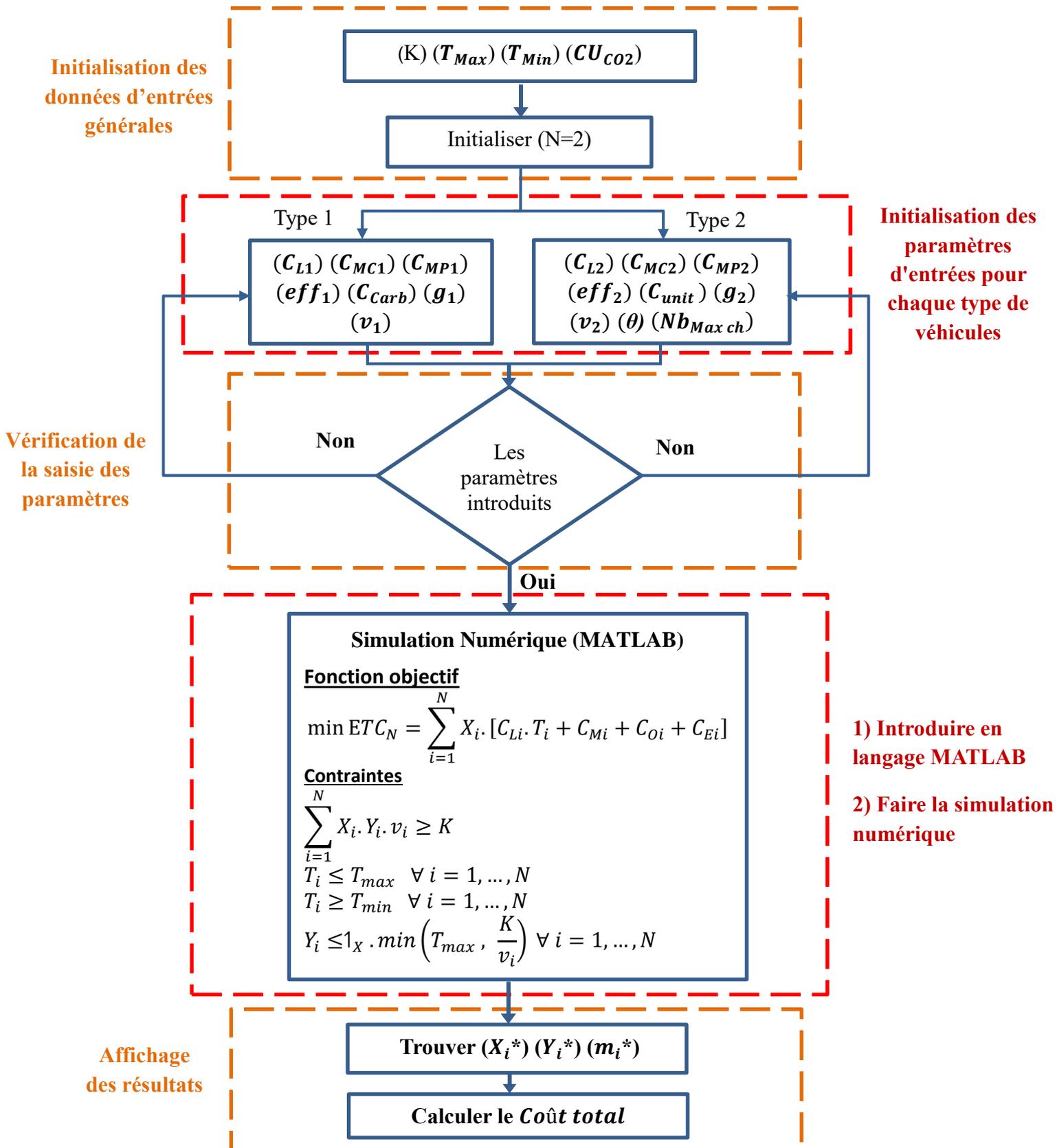


Figure 3.1 - Flowchart de la procédure numérique développée

Tableau 3.1- Paramètres d'entrées

		Les données d'entrées numériques	
K	(kms)	10 000 000	
T_{Max}	(mois)	60	
T_{Min}	(mois)	24	
CU_{CO_2}	(€/kg)	0.05	
		Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$
C_{Li}	(€)	400	430
C_{MC_i}	(€)	250	300
C_{MP_i}	(€)	60	80
v_i	(kms/heure)	70	70
eff_1	(kms/litre)	20	-
g_1	(kg/litre)	2.6	-
C_{carb}	(€/litre)	1.5	-
eff_2	(kms/kWh)	-	5
g_2	(kg/kWh)	-	0.09
C_{Ch}	(€)	-	12.5
C_{Unit}	(€)	-	6 000
θ	(kms)	-	160
Nb_{MaxCh}		-	2 000

Nous considérons également que la distribution de probabilité associée à la défaillance des véhicules est une distribution de Weibull avec un taux de défaillance croissant. Plus précisément, le paramètre de forme est estimé à 2 pour les deux types de véhicules tandis que le paramètre d'échelle est estimé à 25 pour le véhicule à carburant et à 30 pour le véhicule électrique.

La durée moyenne d'une action de maintenance corrective (μ_{Ci}) correspond à 1 jour et la durée d'une action de maintenance préventive (μ_{Pi}) à 0.5 jour, quel que soit le type de véhicule.

3.4.3 Résultats obtenus

Sur la base du modèle mathématique, programmé sous MATLAB et des données d'entrées indiquées dans le tableau (3.1), nous sommes parvenus à un résultat optimal tel qu'affiché dans le tableau (3.2). Nous rappelons que les variables de décision X_i , Y_i et m_i représentent respectivement le nombre total de véhicules à louer, le nombre de mois d'utilisation des

véhicules loués et la période des maintenances préventives à respecter pour chaque véhicule. Les valeurs obtenues pour ces variables de décision sont présentées dans le tableau (3.2). Ce même tableau indique également le nombre des actions de maintenances préventives $\left(\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor\right)$, le nombre de kilomètres à parcourir par chaque véhicule à louer ($Y_i \cdot v_i$), la durée de location (T_i) pour chaque type de véhicule ainsi que les coûts de « *leasing* » ($X_i \cdot C_{Li} \cdot T_i$) pour chaque type de véhicule.

Tableau 3.2 - Résultats obtenus

		Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$
CU_{CO_2}	(€/kg)	0.05	
X_i		8	8
Y_i	(mois)	59	53
m_i	(mois)	12	18
$\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor$		4	2
$Y_i \cdot v_i$	(kms)	660 800	593 600
T_i	(mois)	60	54
$X_i \cdot C_{Li} \cdot T_i$	(€)	192 000	185 760
$X_i \cdot C_{Mi}$	(€)	4 377	3 901
$X_i \cdot C_{Oi}$	(€)	396 480	419 000
$X_i \cdot C_{Ei}$	(€)	34 361.6	4 273.92
PC_i	(€)	627 218.6	612 934.92
$ETC_{(N=2)}$	(€)	1 240 153.52	
$\frac{PC_i}{X_i \cdot Y_i \cdot v_i}$	(€/km)	0.118	0.129

En analysant les résultats obtenus, nous constatons qu'il est nécessaire de louer 16 véhicules en totalité, 8 véhicules à carburant pendant 60 mois et 8 électriques pendant 54 mois. Les véhicules à carburant seront utilisés pendant 59 mois, chacun d'eux devrait parcourir une distance totale de 660 800 kms à un taux d'utilisation prédéfini de 11 200 kms/mois équivalent à 70 kms/heure durant les jours ouvrables, c'est-à-dire que chaque véhicule fonctionnera 8h par jour, avec une action de maintenance préventive planifiée tous les 12 mois. Les véhicules électriques seront utilisés 53 mois, chacun d'entre eux devrait parcourir une distance totale de 593 600 kms avec le même taux d'utilisation que celui des véhicules à carburant, à savoir 11 200 kms/mois, et une

action de maintenance préventive tous les 18 mois. Cette configuration conduit à des coûts totaux par type de véhicule respectivement de 627 218.6 € pour les véhicules à carburant soit (0.118 €/km) et de 612 934.92 € pour les véhicules électriques soit (0.129 €/km), soit un coût total de 1 240 153.52 €.

Selon les pays et donc les normes en vigueur, l'impact sur l'environnement peut varier (notamment en terme de coût). Pour appréhender cette variation, nous pouvons considérer différentes valeurs pour l'impact environnemental en faisant varier le coût unitaire du CO_2 . En effet, nous avons utilisé des coûts unitaires du CO_2 inférieure et supérieure à celle du coût déjà utilisé par [Ba et al. 2016]. De ce fait, le tableau suivant (3.3) montre les nouvelles variables de décision obtenues respectivement (X_i , Y_i et m_i) ainsi que le nombre des actions de maintenances préventives, le nombre de kilomètres à parcourir par chaque véhicule, la durée de location pour chaque type de véhicule et aussi les différents coûts totaux pour chaque type de véhicule à louer.

Tableau 3.3 - Impact du coût unitaire du (CO_2) sur le modèle

	Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$	Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$	Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$
CU_{CO_2} (€/kg)	0.02		0.05		0.08	
X_i	9	7	8	8	8	8
Y_i (mois)	55	57	59	53	55	57
m_i (mois)	14	15	12	18	14	15
$\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor$	3	3	4	2	3	3
$Y_i \cdot v_i$ (kms)	616 000	638 400	660 800	593 600	616 000	638 400
T_i (mois)	56	58	60	54	56	58
$X_i \cdot C_{Li} \cdot T_i$ (€)	201 600	174 580	192 000	185 760	179 200	199 520
$X_i \cdot C_{Mi}$ (€)	4 549	3 724	4 377	3 901	4 043	4 256
$X_i \cdot C_{Oi}$ (€)	415 800	391 125	396 480	419 000	369 600	447 000
$X_i \cdot C_{Ei}$ (€)	14 414.4	1 608.768	34 361.6	4 273.92	51 251.2	7 354.368
PC_i (€)	636 363.4	571 037.768	627 218.6	612 934.92	604 094.2	658 130.368
$ETC_{(N=2)}$ (€)	1 207 401.168		1 240 153.52		1 262 224.568	
$\frac{PC_i}{X_i \cdot Y_i \cdot v_i}$ (€/km)	0.114	0.127	0.118	0.129	0.122	0.128

Globalement, nous constatons que le coût lié à l'émission du CO_2 n'impacte pas de manière significative le nombre de véhicules à louer qui se maintient toujours à 16. En effet, en

augmentant le coût unitaire du CO_2 , nous remarquons que la répartition des véhicules en nombre n'a pas changé, mais les autres paramètres ont varié selon le type. Par exemple, le nombre de mois d'utilisation et la durée de location des véhicules à carburant ont diminué. À contrario, les mêmes variables ont augmenté pour les véhicules de type électrique. En outre, le coût total moyen a augmenté de 1.7%. En diminuant le coût unitaire du CO_2 , nous constatons qu'il faut toujours louer 16 véhicules, mais cette fois-ci, 9 véhicules à carburant pendant 56 mois (ils seront utilisés pendant 55 mois) et 7 électriques pendant 58 mois (ils seront utilisés pendant 57 mois). Chaque véhicule à carburant devrait parcourir une distance totale de 616 800 kms avec une action de maintenance préventive planifiée tous les 14 mois et chaque véhicule électrique devrait parcourir une distance totale de 638 400 kms tout en effectuant une action de maintenance préventive tous les 15 mois. Ce nouveau coût unitaire du CO_2 conduit à une diminution de 2.7 % du coût total à investir.

Avec ces deux nouveaux scénarios d'augmentation et de diminution du coût unitaire du CO_2 , nous remarquons que le nombre de mois d'utilisation (Y_i), la période des maintenances préventives (m_i) ainsi que le nombre des actions de maintenances ($\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor$), le nombre de kilomètres à parcourir ($Y_i \cdot v_i$) et la durée de location (T_i) pour chaque type de véhicule à louer demeurent inchangés. Cependant, les coûts sont relatifs aux nombres de véhicules à louer obtenus après simulation. En effet, lorsqu'il s'agit d'un coût unitaire quasi-négligeable du CO_2 l'utilisation des véhicules à carburant est favorisée.

3.5 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons étudié le dimensionnement d'un parc de véhicules constitué par deux types d'énergie (carburant et électrique), selon une stratégie de « *leasing* », en tenant compte bien évidemment de la maintenance (corrective et préventive) et de l'impact sur l'environnement. Le dimensionnement du parc concerné se caractérise par un nombre de kilomètres à parcourir durant un intervalle de temps donné (soit entre la durée imposée par la durée de location minimale et T_{max}). La composition du parc de véhicules à louer doit minimiser le coût total prévu, correspondant au coût total de la location, de la maintenance, de l'exploitation et de l'impact sur l'environnement. Dans cette approche, nous avons proposé un modèle analytique afin de trouver la solution quasi-optimale. La minimisation du coût total à investir a pour objectif la détermination simultanée des trois variables de décision, à savoir : le nombre de véhicules par type à louer, et pour chaque véhicule : le nombre de mois d'utilisation et la période de la maintenance préventive.

En outre, pour avoir les résultats des six variables de décision citées (trois pour chaque type de véhicule), un algorithme élaboré sous MATLAB a été utilisé pour obtenir les résultats précédemment présentés. Un exemple numérique, constitué de deux types de véhicules utilitaires à louer (carburant et électrique), a été présenté et les résultats obtenus ont été interprétés.

Dans le prochain chapitre, nous conserverons ce même problème de dimensionnement, mais selon une stratégie d'acquisition avec location en fin de mission avant la revente qui constituera un lien entre les deux stratégies adoptées dans les chapitres 2 et 3.

Chapitre 4

Dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie d'acquisition avec location en fin de mission avant la revente

Résumé

Ce quatrième chapitre reste dans la même thématique du dimensionnement d'un parc d'appui logistique constitué par deux types de véhicules tout en respectant plusieurs contraintes opérationnelles telles que les coûts à investir, la disponibilité des véhicules aux services et la satisfaction des clients. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons particulièrement à la maximisation de la valeur ajoutée liée à la gestion des véhicules déjà acquis après la fin de la mission. Autrement dit, ce chapitre se concentrera sur une étude comparative qui combine les deux stratégies proposées dans cette thèse « Achat - Revente » et « *Leasing* » (chapitre 2 et 3), mais selon un contexte différent. En effet, l'objectif consiste à trouver une balance optimale entre la revente des véhicules après la fin de leurs missions et la possibilité de les mettre à disposition de plusieurs locataires dans un contexte de « *leasing* » avant de les vendre. Chaque locataire, également appelé client, doit indiquer le nombre et le type de véhicules souhaités ainsi que le taux d'utilisation envisagé pour chaque type véhicule.

Pour répondre à cette problématique, un modèle analytique a été développé et optimisé, selon une résolution numérique, afin d'optimiser le choix entre les clients potentiels après la fin de réalisation de la mission principale. Ce choix est soumis à des contraintes de faisabilité ; le nombre de véhicules disponibles après la fin de la mission initiale ainsi qu'une contrainte économique liée aux revenus de chaque location et des coûts de maintenance qui restent à charge.

Des données initiales issues majoritairement des deux chapitres précédents ont été utilisées afin d'illustrer les résultats numériques obtenus à la suite de la résolution du modèle analytique. Des études de sensibilités ont été réalisées afin de prouver la robustesse de notre modèle analytique de ce quatrième chapitre.

4.1 Introduction

Au cours des deux chapitres précédents, nous avons proposé deux modèles analytiques dont le but était de dimensionner une flotte de véhicules constituée par deux types de véhicules selon une stratégie d'achat et de revente en fin de missions et selon une stratégie nommée « *Leasing* » où les véhicules étaient loués pour la durée des missions. De plus, nous avons considéré des contraintes spécifiques pour chaque stratégie tout en respectant l'objectif général de la thèse, à savoir tenir compte simultanément des aspects économiques, opérationnels et environnementaux pour le dimensionnement. Pour l'essentiel, l'effort a porté sur le dimensionnement d'un parc de véhicules pour lequel nous avons déterminé simultanément le nombre optimal de véhicules de chaque type d'énergie à exploiter ainsi que leurs durées d'utilisation et la périodicité des actions de maintenance pour chaque véhicule. Formellement, ces paramètres représentent les variables de décision du modèle analytique développé

À la faveur d'un travail de réflexion et de modélisation analytique, nous proposons d'étendre notre étude faite dans les chapitres précédents en proposant une location, partielle ou totale, de la flotte de véhicules en fin de mission tout en intégrant évidemment la notion de maintenance (préventive ou corrective), la dépréciation de la valeur résiduelle du véhicule, le taux d'utilisation par mois et le nombre total de kilomètres à parcourir. En effet, l'idée réside sur la maximisation des bénéfices liée à la flotte de véhicules juste après la fin de leurs missions déjà réalisées dans le but d'exploiter la disponibilité maximale des véhicules avant leur revente.

À cet égard, nous proposons un modèle analytique suivi d'une résolution numérique créant le lien entre ces différents paramètres indiqués dans le but d'estimer les bénéfices nets attendus selon une satisfaction des clients.

Ce modèle intègre le nombre des véhicules demandés par le client pour location ainsi que les coûts de la maintenance, de la location et de la revente à la fin de la période de location en tenant compte de la dépréciation de la valeur des véhicules. Par conséquent, notre objectif consiste à trouver la combinaison économique entre les clients potentiels à satisfaire en terme de nombre de véhicules désirés.

D'un autre côté, cette partie représente la continuité d'une étude de dimensionnement d'un parc d'appui logistique constitué par deux typologies de véhicules, certaines données sont prises des deux chapitres précédents afin d'examiner la décision raisonnable à prendre à partir des résultats numériques. Une interprétation des résultats obtenus est présentée à la fin de cette étude.

Ce chapitre sera articulé autour de six sections. La section 2 sera consacrée à la description du problème et l'hypothèse de travail. L'étude analytique sera présentée à la 3^{ème} section. Dans la section 4, nous présenterons les résultats numériques ainsi qu'une interprétation de ces résultats. Une étude de sensibilité sera abordée dans la 5^{ème} section avec une synthèse de ces résultats. La conclusion sera présentée dans la dernière section.

4.2 Description du problème et hypothèses de travail

4.2.1 Contexte général

La problématique traitée concerne une entreprise de logistique spécialisée dans la distribution de produits légers, en utilisant deux types de véhicules commerciaux. Notre travail dans ce chapitre débute après la fin de la totalité des missions réalisées par tous les véhicules sur une période prédéfinie (chapitre 2). Dans ce cas, l'entreprise doit choisir entre la revente des véhicules juste à la fin des missions ou les louer selon la demande de certains clients. Pour répondre à cette problématique, nous supposons qu'un nombre de clients souhaitent utiliser les véhicules pour leurs propres besoins. Ainsi, une étude de rentabilité doit être réalisée pour déterminer le choix optimal des clients potentiels qui vont maximiser les bénéfices tout en indiquant le revenu net de chaque client et le comparer avec le coût de revente des véhicules dans le cas où l'entreprise préfère les revendre à la fin de ses propres missions. La finalité de cette étude sera dédiée à la détermination d'un ou plusieurs clients à satisfaire en tenant compte de la durée de la location, du taux d'utilisation des véhicules et de la politique de maintenance adoptée.

4.2.2 Description de la stratégie

La stratégie « d'acquisition avec location en fin de mission avant la revente » se concentre essentiellement sur l'acquisition de véhicules (selon deux typologies) pour constituer un parc d'appui logistique afin d'assurer des missions fixées puis les utiliser pour mise en location à la fin des missions avant de les revendre. En effet, cette stratégie consiste à déterminer le choix optimal des clients afin de satisfaire leurs besoins de véhicules, par types, tout en précisant le taux d'utilisation ainsi que le nombre total de kilomètres à réaliser par chaque véhicule. La particularité de ce travail, réside dans le fait que le bailleur des véhicules gère l'ensemble des actions des maintenances, qu'elles soient correctives ou préventives. Autrement dit, les clients à qui on a loué les véhicules, payeront seulement le coût total de location, les coûts de maintenance restant à la charge du bailleur. La contribution visée à travers ce travail consiste à répondre simultanément à deux enjeux majeurs, qui sont l'ensemble des clients à satisfaire et

les bénéfices estimés à la fin du contrat de location. Pour essentiel, cette étude permettra de prévoir l'impact de la location pour des véhicules acquis tout en indiquant la marge bénéficiaire ou écart budgétaire si nous adoptons la mise en location des véhicules à la fin de leurs missions au lieu de les revendre à l'issue de la mission principale.

4.2.3 Hypothèses de l'étude

Les hypothèses adoptées pour le développement du modèle en vue de déterminer le choix des clients sont les suivantes :

- Les kilomètres à parcourir par l'ensemble des véhicules en location sont proposés par les clients potentiels.
- Deux typologies de véhicules sont considérées (carburant et électrique).
- Le bailleur assurera les actions des maintenances (correctives et préventives).
- Le coût de location des véhicules dépend du type de véhicule ainsi que du nombre des kilomètres à parcourir.
- Pour un client donné, tous les véhicules, d'un même type, parcourront le même nombre de kilomètres. Les véhicules de même type sont supposés identiques et sont soumis au même taux de dégradation.
- La durée de location est déterminée par le nombre de kilomètres demandé par le client ainsi que du taux d'utilisation envisagé.
- Les différents coûts et les distributions de probabilité sont supposés être connus.

4.2.4 Notations

Les notations suivantes sont utilisées dans le modèle mathématique proposé :

- i : indice utilisé pour représenter le type de véhicule à louer, $i \in \{1, \dots, N\}$.
- j : indice utilisé pour représenter le client, $j \in \{1, \dots, n\}$.
- n : nombre de clients potentiels.
- x_i : nombre de véhicules associé au type i .
- m_i : la périodicité de maintenance préventive pour un type i (mois).
- T_i : âge des véhicules de type i avant la location (mois).
- Y_i : nombre de mois d'utilisation des véhicules pour chaque type i avant la location (mois).
- $D_{(i,j)}$: durée de location de véhicule de type i pour le client j (mois).
- F_i : durée de possession totale pour chaque véhicule loué de type i (mois).

- C_{Ai} : coût d'acquisition de chaque véhicule de type i (u.m).
- C_{Li} : coût unitaire de location de véhicule de type i (u.m).
- C_{Mci} : coût de la maintenance corrective pour véhicule de type i (u.m).
- C_{MPi} : coût de la maintenance préventive pour véhicule de type i (u.m).
- μ_{ci} : durée moyenne d'une action de maintenance corrective pour un véhicule loué de type i (mois).
- μ_{pi} : durée moyenne d'une action de maintenance préventive pour un véhicule loué de type i (mois).
- C_{Mi} : coût total moyen de maintenance par véhicule de type i (u.m).
- $Nb_{KM(i,j)}$: nombre total des kilomètres à parcourir par chaque véhicule de type i par le client j (kms).
- $Nb_V(i,j)$: nombre de véhicule de type i souhaité par le client j .
- $v_{(i,j)}$: taux d'utilisation associé à chaque véhicule de type i (kms/mois).
- $B_{(i,j)}$: bénéfice d'un client j pour des véhicules de type i (u.m).
- $V_{R(i,j)}$: valeur de revente d'un véhicule de type i sans location (u.m).
- $V_{RL(i,j)}$: valeur de revente d'un véhicule de type i après la durée de location (u.m).
- $v_{i\ max}$: taux d'utilisation maximal associé à chaque véhicule de type i (kms/mois).
- λ_i : taux de défaillance associé aux véhicules de type i .
- $Nb_{KM(i,j)}$: nombre total de kilomètres à réaliser en location (kms).
- $\emptyset(Y_i, m_i)$: nombre moyen de pannes (réparation minimale) avant le contrat de location d'un véhicule de type i .
- $\emptyset(Y_i + D_{(i,j)}, m_i)$: nombre moyen de pannes en tenant compte de la période de location d'un véhicule de type i .
- (a_{ik}) et (b_{ik}) : paramètres de dépréciations des valeurs des véhicules en fonction du temps.
- $1_{[12*(k-1) \leq f_i \leq 12K]}$: fonction indicatrice équivalente à $\begin{cases} 1 & \text{si } f_i \in [12 * (k - 1), 12 * k] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

4.3 Étude analytique

Sur la base des hypothèses et notations indiquées dans la section précédente, nous nous intéressons dans cette partie à présenter un modèle analytique dédié au choix de location des véhicules les plus rentables sous forme d'une combinaison qui regroupe un ensemble de

demandes de clients potentiels. À cet égard, ce choix est soumis à une contrainte liée au taux d'utilisation associé à chaque véhicule de type i pour le client j ($v_{(i,j)}$) et aux différents autres facteurs pertinents qui assureront la bonne décision tels que la durée de location ($D_{(i,j)}$), la durée totale de possession (F_i), le nombre moyen de pannes en tenant compte de la période de location $\emptyset(Y_i + D_{(i,j)}, m_i)$ pour chaque véhicule de type i .

Nous indiquons par la suite les différentes expressions impliquées dans le développement de ce modèle.

- Contrainte du taux d'utilisation:

$$v_{(i,j)} \leq v_{i \max} \quad \forall i = 1, \dots, N \text{ et } j = 1, \dots, n \quad (4.1)$$

Le taux d'utilisation s'explique par le nombre de kilomètres à parcourir mensuellement par chaque véhicule type i à louer. Sur cette base, le client doit indiquer approximativement le taux d'utilisation ($v_{(i,j)}$) pour chaque type de véhicule et qui ne devra pas dépasser un taux d'utilisation maximal ($v_{i \max}$). Le dépassement du taux maximal engendrera un coût de pénalité par kilomètre supplémentaire.

- Durée de location:

$$D_{(i,j)} = \left(\frac{Nb_{KM(i,j)}}{Nb_V(i,j) \cdot v_{(i,j)}} \right) \quad (4.2)$$

Avec :

- $D_{(i,j)}$: durée de location du véhicule de type i pour le client j (mois).
- $Nb_{KM(i,j)}$: nombre total de kilomètres à parcourir pour chaque véhicule de type i par le client j (kms).
- $Nb_V(i,j)$: nombre de véhicule de type i indiqué dans chaque demande du client j .
- $v_{(i,j)}$: taux d'utilisation associé à chaque véhicule de type i (kms/mois).

L'expression de la location est déterminée à partir de la demande client. En fait, nous ne travaillons pas sur un nombre de mois fixe, mais plutôt sur la durée nécessaire pour parcourir un certain nombre de kilomètres demandé par le client. Ainsi, le taux et le nombre de véhicule par type sont spécifiés pour chaque demande.

- Durée de possession totale d'un véhicule :

Parmi les hypothèses que nous avons posées, la maintenance préventive ou les réparations seront assurées par l'entreprise. Ceci implique un temps supplémentaire requis par la durée des actions de maintenance au-delà de la période de la location déterminée à partir des besoins exprimés par le client. L'expression de la durée de possession totale est représentée comme suit :

$$F_i = T_i + D_{(i,j)} + (Nb_{MP(i,j)} \cdot \mu p_i) + \left((\emptyset(Y_i + D_{(i,j)}, m_i) - \emptyset(Y_i, m_i)) \cdot \mu c_i \right) \quad (4.3)$$

Avec :

- $Nb_{MP(i,j)}$: nombre d'actions de maintenance préventive pour chaque véhicule de type i durant la période de location avec le client j .
- μp_i : durée moyenne d'une action de maintenance préventive pour un véhicule loué de type i (mois).
- $\emptyset(Y_i, m_i)$: nombre moyen de pannes (réparation minimale) durant la période d'utilisation avant le contrat de location d'un véhicule de type i .
- $\emptyset(Y_i + D_{(i,j)}, m_i)$: nombre moyen de pannes en tenant compte de la période de location d'un véhicule de type i .
- μc_i : durée moyenne d'une action de maintenance corrective pour un véhicule loué de type i (mois).

4.3.1 Coût total moyen de maintenance par véhicule (C_{Mi})

Nous rappelons que la politique de maintenance proposée pour les véhicules en location reste identique à celle adoptée dans les deux chapitres précédents : politique de maintenance préventive imparfaite de type bloc avec réparation minimale à la panne. En effet, ces actions de maintenances préventives consistent à remplacer certains composants du véhicule par de nouveaux composants identiques, ce qui donne lieu à ce que l'on appelle un renouvellement partiel, qui permet de diminuer dans une certaine mesure le taux de panne du véhicule. En cas de pannes entre deux actions de maintenance préventive consécutives, des réparations minimales seront effectuées afin de remettre le véhicule en état de fonctionnement tout en maintenant son taux de défaillance au même niveau qu'avant la panne. De ce fait, l'expression analytique du coût total des actions de maintenance associées aux véhicules est développée d'une façon similaire aux deux chapitres précédents. Cependant, il est à noter que nous avons pris en considération le délai de location des véhicules dans notre nouvelle équation. De plus,

une nouvelle modélisation concernant le nombre des actions de maintenance à effectuer, soit préventives soit correctives, sera proposée dans le cas de la location des véhicules en fin de missions.

La modélisation suivante représente le coût total de maintenance des véhicules loués tout en indiquant le nombre des pannes préventives et correctives.

$$C_M(i,j) = C_{TMP(i,j)} + C_{TMC(i,j)} \quad (4.4)$$

✓ Coût des actions de maintenance préventive

Dans ce chapitre, nous considérons que le nombre des actions de maintenance préventive pendant la période de location correspond à la différence entre le nombre total des actions des maintenances préventives en tenant compte de la période de location et le nombre des actions des maintenances déjà effectué lors des missions réalisées (période hors location).

Les deux équations suivantes montrent le coût total de ces actions de maintenance préventive ainsi que le nombre d'actions préventives durant la période de location.

$$C_{TMP(i,j)} = C_{MPi} \cdot Nb_{MP(i,j)} \quad (4.5)$$

Avec :

$$Nb_{MP(i,j)} = \left\lfloor \frac{Y_i + D(i,j)}{m_i} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \quad (4.6)$$

✓ Coûts des actions de maintenance corrective

Durant la période de location, un nombre moyen de pannes apprêtera et engendrera un coût supplémentaire de maintenance. Ce nombre doit être modélisé afin de calculer approximativement le coût total des maintenances corrective. En se référant à l'équation (2.9) modélisée dans la première stratégie le nombre moyen de pannes durant la période de location s'exprime comme suit :

$$\Phi(Y_i + D_{(i,j)}, m_i) - \Phi(Y_i, m_i) \quad (4.7)$$

$$= \left[\sum_{K=1}^{\lfloor \frac{Y_i + D_{(i,j)}}{m_i} \rfloor} \int_0^{m_i} e^{(K-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) d(x) \right. \\ \left. + \int_0^{(Y_i + D_{(i,j)}) - \lfloor \frac{Y_i + D_{(i,j)}}{m_i} \rfloor \cdot m_i} e^{\lfloor \frac{Y_i + D_{(i,j)}}{m_i} \rfloor \cdot \alpha} \cdot \lambda_i(x) d(x) \right] \\ - \left[\sum_{K=1}^{\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor} \int_0^{m_i} e^{(K-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) d(x) + \int_0^{Y_i - \lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor \cdot m_i} e^{\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \rfloor \cdot \alpha} \cdot \lambda_i(x) d(x) \right]$$

$$\text{Finalement : } C_{TMC(i,j)} = C_{MCI} \cdot (\Phi(Y_i + D_{(i,j)}, m_i) - \Phi(Y_i, m_i)) \quad (4.8)$$

4.3.2 Revenu de la location

Dans chaque décision à prendre, un intérêt commun regroupe toutes les parties intéressées, en l'occurrence le bénéficiaire à gagner. Pour cela, nous présentons une expression analytique pour le calcul du revenu pour chaque client potentiel. Cette dernière est composée du nombre des véhicules demandés par types, leurs coûts de location ainsi que les coûts de maintenance et les valeurs des reventes, après la période de location.

Dans notre cas, nous pouvons considérer les bénéfices de la location comme le produit du coût de la location et le nombre de véhicules demandé par le client. Il est important de préciser que la valeur de revente diffèrera après la période de location en raison d'une durée de conservation plus longue des véhicules. En se référant à la partie abordée dans le deuxième chapitre de ce manuscrit qui traite de la dépréciation de la valeur des véhicules, nous présentons l'équation de la valeur de revente d'un véhicule quel que soit son type juste après la période de location.

$$V_{RLi} = C_{Ai} \cdot \sum_k (a_{ik} \cdot F_i + b_{ik}) \cdot 1_{[12 \cdot (k-1) \leq T_i \leq 12 \cdot k]} \quad (4.9)$$

Avec comme notations complémentaires :

- V_{RLi} : valeur de revente d'un véhicule de type i après location (u.m).
- C_{Ai} : coût d'acquisition d'un véhicule de type i (u.m).
- K : nombre total de kilomètres à parcourir par l'ensemble de tous les véhicules (kms).
- F_i : durée de possession totale de chaque véhicule de type i (mois).

- (a_{ik}) et (b_{ik}) : paramètres de dépréciations des valeurs des véhicules en fonction du temps. En effet, le prix de chaque véhicule se déprécie au cours du temps ce qui conduit à un coût réel du véhicule différent selon le type.
- $1_{[12.(k-1) \leq T_i \leq 12.k]}$: fonction indicatrice équivalente à $\begin{cases} 1 & \text{si } T_i \in [12.(k-1), 12.k] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

Et finalement, nous pouvons exprimer le revenu net de la location par l'équation suivante :

$$R_{L \text{ net } (i,j)} = Nb_{V(i,j)} \cdot \left(C_{Li} \cdot \frac{Nb_{KM(i,j)}}{Nb_{V(i,j)}} - C_{M(i,j)} + V_{RL(i,j)} - V_R(i) \right) \quad (4.10)$$

Avec :

- $R_{L \text{ net } (i,j)}$: revenu net de la location d'un véhicule de type i pour le client j (u.m).
- $Nb_{V(i,j)}$: nombre de véhicule par type i indiqué dans chaque demande du client j .
- C_{Li} : coût unitaire de location d'un véhicule de type i (u.m).
- $Nb_{KM(i,j)}$: nombre total des kilomètres à faire pour chaque véhicule de type i par le client j (kms).
- $C_{M(i,j)}$: coût total moyen de maintenance par véhicule de type i pour le client j (u.m).
- $V_{RL(i,j)}$: valeur de revente d'un véhicule de type i après la durée de la location (u.m).
- $V_R(i,j)$: valeur de revente d'un véhicule de type i sans location (u.m).

4.4 Résolution numérique

L'étude numérique de la stratégie proposée actuelle est basée sur plusieurs demandes de clients potentiels. Chaque demande peut considérer un ou plusieurs types de véhicules utilitaires (à carburant et électrique). Toutefois, diverses contraintes opérationnelles doivent être prises en considération telles que le nombre total de kilomètres à parcourir et le taux d'utilisation par mois pour chaque véhicule.

Pour mémoire, l'objectif défini pour ce modèle consiste à trouver la meilleure combinaison de clients à satisfaire, en vue de maximiser le bénéfice. Cela implique la détermination du nombre des véhicules par type à louer ainsi que leurs durées de location pour chaque type ($D_{(i,j)}$). La résolution numérique du modèle analytique développé a été réalisée par l'intermédiaire du logiciel MATLAB afin de sélectionner le ou les clients à satisfaire ou, au contraire, de décider de vendre les véhicules à la fin de la mission initiale sans les louer. Une étude de sensibilité a été réalisée afin de montrer la robustesse du modèle analytique développé.

4.4.1 Paramètres d'entrées

Pour illustrer ce modèle, considérons une flotte de véhicules constituée de 10 véhicules à carburant et 30 véhicules électriques avec des coûts d'acquisition respectifs de 17 500 € et 30 500 €. Nous rappelons que ces véhicules ont déjà réalisé des missions initiales sur une période de 14 mois pour les véhicules à carburant et de 58 mois pour les véhicules électriques. Ces durées ont engendré une dépréciation, calculée à partir de l'équation (2.14), ramenant leurs valeurs de revente respectivement à 13 125 € et 10 177 €.

Dans cet exemple, nous allons étudier la décision de proposer la location des véhicules avec un coût de 0.025 €/km pour les véhicules à carburant et de 0.04 €/km pour les véhicules électriques.

Tableau 4.1 - Données numériques

	Carburant	Électrique
Nombre total de véhicule existant dans le parc	10	30
C_{Ai} (€)	17 500	30 500
T_i (mois)	14	58
V_{Ri} (€)	13 125	10 177
C_{Li} (€/kms)	0.025	0.04

La distribution de probabilité du temps de défaillance des véhicules est une distribution de Weibull avec un taux de défaillance croissant avec les paramètres suivants pour chaque type de véhicule :

Tableau 4.2 - Paramètres de la distribution de dégradation des véhicules « Weibull »

	Paramètre d'échelle	Paramètre de forme
Véhicule à carburant	9	2
Véhicule électrique	13	2

Nous supposons que les clients ont déjà déterminé le nombre de kilomètres à parcourir et le taux d'utilisation pour chaque type de véhicule sachant que les tarifs sont exprimés en unité monétaire par kilomètre. Sur cette base, nous présentons dans le tableau suivant un exemple des différents clients (j) et leurs demandes regroupées en termes de nombre de véhicules souhaités par type ($Nb_{v(i,j)}$), le nombre de kilomètres à parcourir ($Nb_{KM(i,j)}$) et le taux d'utilisation par mois ($v_{(i,j)}$) pour chaque véhicule de type i . À titre d'exemple, la demande du client 1 sera constituée de 1 véhicule à carburant pour parcourir 100 000 km avec un taux

d'utilisation de 10 000 kms/mois et le client 2 souhaite louer 2 véhicules à carburant pour parcourir 150 000 km avec un taux d'utilisation de 8 500 kms/mois par chaque véhicule. D'autre part, le client 11 désire louer 10 véhicules électriques pour parcourir 200 000 km avec un taux d'utilisation de 20 000 kms/mois par chaque véhicule et le client 12 demande aussi 8 véhicules électriques pour faire 90 000 km avec un taux d'utilisation de 2 500 km/mois associé à chaque véhicule.

Tableau 4.3 - Demande des clients

		Véhicule à carburant ($i = 1$)			Véhicule électrique ($i = 2$)		
j	Nb_v	$Nb_{KM} (kms)$	$v_{(i,j)}(kms/mois)$	j	Nb_v	$Nb_{KM} (kms)$	$v_{(i,j)}(kms/mois)$
1	1	100 000	10 000	11	10	200 000	20 000
2	2	150 000	8 500	12	8	90 000	2 500
3	3	210 000	12 000	13	9	100 000	5 000
4	5	300 000	15 000	14	12	150 000	5 000
5	3	190 000	11 000	15	5	100 000	7 000
6	6	500 000	8 000	16	7	130 000	4 000
7	4	250 000	16 000	17	6	125 000	9 000
8	7	550 000	22 000	18	5	200 000	15 000
9	2	170 000	18 000	19	9	170 000	9 000
10	5	400 000	19 000	20	4	100 000	15 000

La résolution de cette stratégie à l'aide d'une procédure numérique s'effectue en introduisant d'une part, les demandes spécifiques de chaque client, d'autre part, le nombre total de véhicules existant dans le parc par type i , ainsi que leurs valeurs de revente avant la location. Ces valeurs permettent l'obtention de la durée de location pour chaque client ainsi que la durée de possession totale de chaque type de véhicule. Puis, on détermine la valeur de revente de chaque type de véhicule tout en précisant les revenus nets de chaque location afin de déterminer la meilleure combinaison des clients. La procédure numérique utilisée est présentée par la figure suivante (4.1)

4.4.2 Procédure numérique

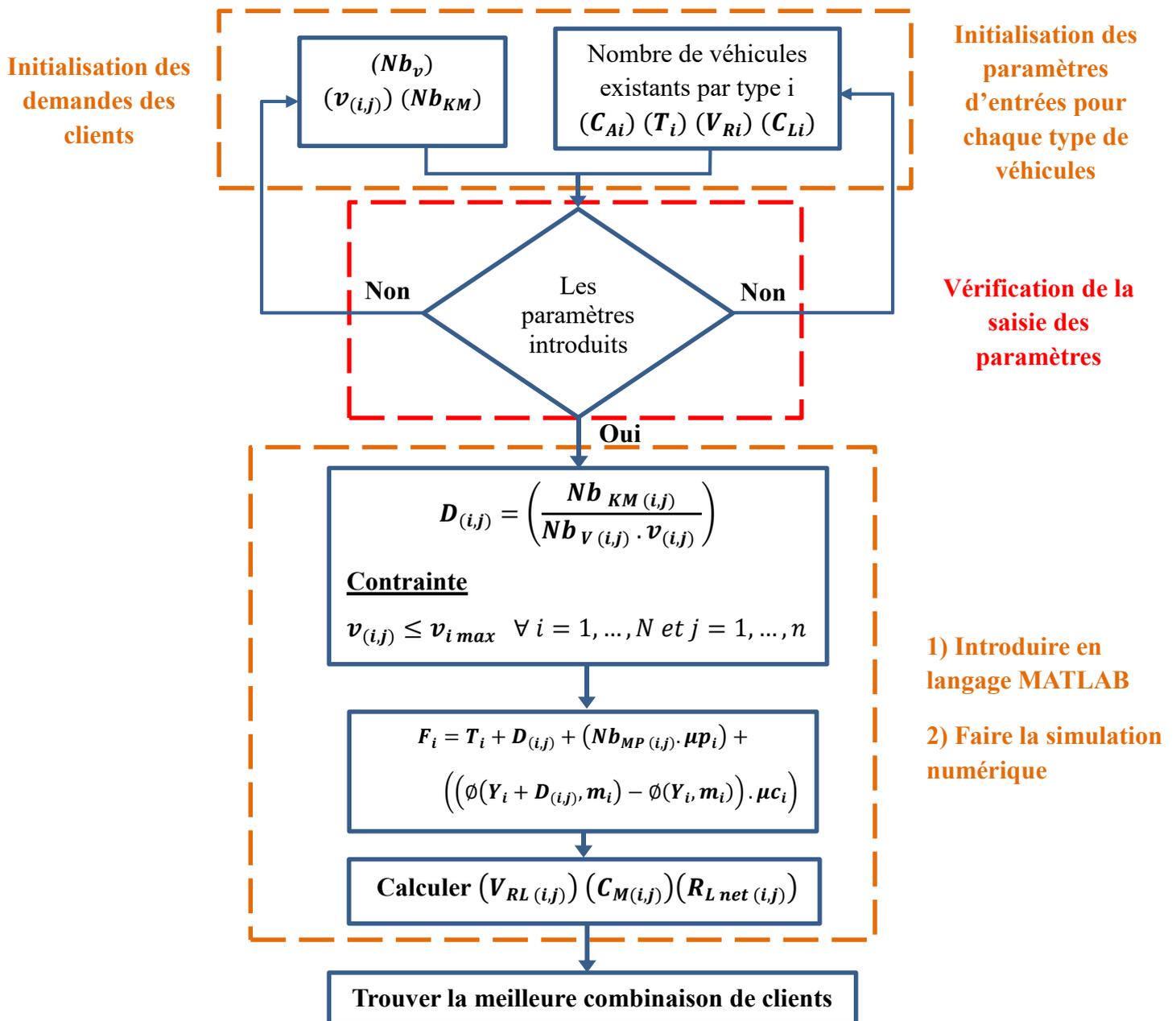


Figure 4.1 - Flowchart de la procédure numérique développée

4.4.3 Résultats obtenus

Sur la base du modèle analytique développé et de la résolution numérique basée sur les paramètres d'entrées indiqués dans les tableaux (4.1, 4.2 et 4.3), nous sommes parvenus à un résultat pertinent associé à chaque client tel qu'affiché dans le tableau suivant (4.4). Nous rappelons que notre objectif consistait à chercher une combinaison optimale entre les clients tout en indiquant les revenus de chacun. Le tableau suivant expose les valeurs de revente d'un véhicule après la location V_{RL} (€), les coûts de maintenances les bénéfices de la location sans

prendre en considération des coûts des reventes des véhicules B (€). Le résultat le plus important demeure le revenu net de chaque client demandée $R_{L_{net}}$ (€).

Tableau 4.4 - Résultats des coûts obtenus

j	Véhicule à carburant ($i = 1$)				j	Véhicule électrique ($i = 2$)			
	V_{RL} (€)	C_M (€)	B (€)	$R_{L_{net}}$ (€)		V_{RL} (€)	C_M (€)	B (€)	$R_{L_{net}}$ (€)
1	11 156	1 408.4	12 250	- 877	11	10 177	12 284	- 13 075	- 114 840
2	13 125	1 003.4	27 990	1 743	12	10 177	16 160	- 44 268	- 125 680
3	13 125	308.4	43 700	4 325	13	10 177	13 526	- 26 140	- 117 734
4	13 125	119.8	72 530	6 901	14	10 177	13 824	- 37 774	- 159 888
5	13 125	286	115 210	3 892	15	10 177	14 218	- 16 206	- 67 090
6	11 156	1 569.7	70 020	- 8 732	16	10 177	16 339	- 37 939	- 109 173
7	13 125	115	58 290	5 790	17	10 177	13 624	- 15 687	- 76 744
8	13 125	101.7	104 910	13 038	18	10 177	14 007	- 6 690	- 62 035
9	13 125	114.1	147 610	4 022	19	10 177	14 412	- 34 593	- 122 908
10	13 125	99.9	132 230	9 501	20	10 177	12 946	- 7 079	- 47 784

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, nous remarquons que les revenus nets des locations selon les demandes sont négatifs pour les véhicules électriques et positifs dans la plupart des demandes pour les véhicules à carburant. Un revenu négatif indique qu'il n'est pas rentable de louer les véhicules électriques en particulier à la fin de leurs missions quel que soit les circonstances. Ce résultat s'explique par les surcoûts des actions des maintenances de ces véhicules, dû à l'âge des véhicules engendrant une augmentation du nombre moyen de panne mais également par le renouvellement des batteries au bout de 60 mois.

Le scénario le plus rentable correspond à la satisfaction du client 8. En effet nous pouvons faire des bénéfices de l'ordre de 13 038 € en louant 7 véhicules à carburant pour le client cité, en plus nous gardons la même valeur de revente de véhicule après la période de location. En outre, parcourir le plus possible des kilomètres en une courte période est l'option privilégiée vu que la valeur de revente après location et la fréquence de maintenance dépendent essentiellement de la période de possession des véhicules.

Vu la forte dépréciation de la valeur des véhicules électriques, nous proposons un second exemple numérique où la période de possession de ces véhicules électrique sera fixée arbitrairement à 28 mois, (c'est-à-dire $T_2 = 28$ mois), afin d'étudier l'effet de la location des véhicules électriques sans devoir imposer systématiquement un renouvellement des batteries. Ce nouvel exemple est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 4.5 - Impact du (T_i) sur la (V_R) pour le cas : véhicule électrique

		Véhicule électrique	
		1 ^{ère} exemple	2 ^{ème} exemple
T_2	(Mois)	58	28
V_R	(€)	10 177	18 986

Après avoir introduit la nouvelle période de possession (T_i) des véhicules électriques, le tableau suivant présente les nouveaux résultats relatifs à chaque demande.

Tableau 4.6 – Coûts obtenus en tenant compte de la diminution de (T_2)

		Véhicule à carburant ($i = 1$)				Véhicule électrique ($i = 2$)				
j		V_{RL} (€)	C_M (€)	B (€)	$R_{L\ net}$ (€)	j	V_{RL} (€)	C_M (€)	B (€)	$R_{L\ net}$ (€)
1		11 156	1 408.4	12 248	- 877	11	18 986	7 108.7	126 773	- 63 087
2		13 125	1 003.4	27 993	1 743	12	18 986	8 262.8	89 386	- 62 502
3		13 125	308.4	43 700	4 325	13	18 986	7 443.7	107 881	- 62 993
4		13 125	119.8	72 526	6 901	14	18 986	7 530.1	143 471	- 84 361
5		13 125	286	43 267	3 892	15	18 986	7 646.6	60 697	- 34 233
6		11 156	1 569.7	70 018	- 8 732	16	18 986	8 322.6	79 844	- 53 058
7		13 125	115	58 290	5 790	17	18 986	7 472.1	74 083	- 39 833
8		13 125	101.7	104 913	13 038	18	18 986	7 583.7	65 012	- 29 919
9		13 125	114.1	30 272	4 022	19	18 986	7 705.3	108 326	- 62 548
10		13 125	99.9	75 126	9 501	20	18 986	7 282.4	50 814	- 25 130

Malgré une diminution de la période de possession pour le cas des véhicules électriques à 28 mois, nous notons que les revenus nets après locations restent toujours négatifs en dépit de l'augmentation des valeurs de revente des véhicules en fin de mission. C'est pourquoi, il reste malgré tout plus rentable de les vendre directement à l'issue de la mission principale plutôt que de les proposer en location.

4.4.4 Combinaisons entre les clients potentiels

En se référant aux résultats obtenus et après une résolution numérique complète, les meilleures combinaisons des demandes des clients potentiels à satisfaire pour chaque demande de véhicules par type i sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.7 - Meilleures combinaisons possibles des clients pour chaque véhicule de type i

Véhicule à carburant ($i = 1$)		Véhicule électrique ($i = 2$)	
Combinaisons	$R_{L\ net\ (i,j)}$ (€)	Combinaisons	$R_{L\ net\ (i,j)}$ (€)
3 / 8	17 363	12 / 15 / 16 / 17 / 20	- 214 756
4 / 10	16 402	12 / 15 / 16 / 18 / 20	- 204 842
8 / 5	16 930	12 / 15 / 17 / 18 / 20	- 191 616
2 / 3 / 4	12 969	12 / 16 / 17 / 18 / 20	- 210 441
2 / 3 / 10	15 569	13 / 15 / 16 / 17 / 18	- 220 036
2 / 5 / 4	12 536	13 / 15 / 16 / 18 / 20	- 205 333
2 / 5 / 10	15 136	13 / 15 / 17 / 18 / 20	- 192 107
3 / 5 / 7	14 007	13 / 16 / 17 / 18 / 20	- 210 932
9 / 3 / 4	15 248	14 / 15 / 17 / 18 / 20	- 213 475
9 / 3 / 10	17 847	15 / 16 / 17 / 18 / 20	- 182 172
9 / 5 / 4	14 815	15 / 16 / 18 / 19 / 20	- 204 887
9 / 5 / 10	17 414	15 / 17 / 18 / 19 / 20	- 191 661
2 / 3 / 5 / 9	13 982		

Nous constatons que la combinaison des clients (3 / 9 / 10) est la plus rentable pour le cas des véhicules à carburant vu qu'elle génère un revenu de location net égal 17 847 €. Par contre, aucune meilleure combinaison possible permet de générer un revenu net de location positif pour les véhicules électriques. Il est donc plus avantageux de les vendre directement après la mission principale.

4.5 Étude de sensibilité

L'étude de sensibilité est une analyse de la variation des résultats obtenus à la suite de changements des données d'entrée. Elle permet d'alléger le modèle analytique développé en fixant les paramètres d'entrée dont l'influence est négligeable.

Pour notre problème, nous avons choisi d'étudier l'impact de la variation du taux d'utilisation des véhicules demandés ($v_{(i,j)}$) sur les revenus nets des locations tout en changeant de temps en temps le nombre total de kilomètres à parcourir pour chaque véhicule ($Nb_{KM\ (i,j)}$), ainsi que le nombre de véhicule souhaité par le client j ($Nb_v\ (i,j)$). Sur cette base, nous proposons dans le tableau suivant une variation du taux d'utilisation de chaque demande selon trois cas.

Tableau 4.8 – Étude de sensibilité basé sur une variation du taux d'utilisation ($v_{(i,j)}$)

						$v_{(i,j)}(kms/mois)$					
$(i = 1)$			$(i = 2)$			Cas 1		Cas 2		Cas 3	
j	Nb_v	$Nb_{KM} (kms)$	j	Nb_v	$Nb_{KM} (kms)$	$(i = 1)$	$(i = 2)$	$(i = 1)$	$(i = 2)$	$(i = 1)$	$(i = 2)$
1	1	100 000	11	10	200 000	15 000	22 000	9 000	19 000	8 000	12 000
2	2	150 000	12	8	90 000	9 500	4 000	7 500	5 000	6 000	4 000
3	3	210 000	13	9	100 000	11 000	6 000	10 000	4 000	9 000	7 000
4	5	300 000	14	12	150 000	19 000	8 000	13 000	6 000	9 900	4 500
5	8	500 000	15	5	100 000	10 000	10 000	14 000	8 000	17 000	9 000
6	6	500 000	16	7	130 000	7 000	4 900	9 000	7 000	9 900	5 900
7	4	250 000	17	6	125 000	17 500	9 900	14 000	8 000	11 000	7 900
8	7	550 000	18	3	120 000	23 000	16 000	20 000	12 000	13 600	10 900
9	10	700 000	19	11	300 000	14 000	8 000	12 500	7 500	8 500	9 000
10	9	600 000	20	4	100 000	20 000	16 000	16 000	10 000	14 900	8 900

Après simulation numériques pour l'études de sensibilité, nous constatons que les revenus nets des véhicules à carburant sont toujours positifs. Alors que les véhicules électriques restent toujours négatifs. Les deux tableaux suivants (4.9 et 4.10) indiquent les revenus nets de location pour chaque cas de variation du taux d'utilisation tout en précisant les valeurs des ventes en fin de missions $V_{R(i)}$ et les bénéfices générés en fonction des demandes de location $B(€)$. De plus nous avons considéré d'autres combinaisons possibles mais pas meilleures pour le cas à carburant afin d'étudier l'impact de cette étude de sensibilité sur leurs revenus nets de location.

Tableau 4.9 – Coûts obtenus pour des combinaisons de véhicules à carburant en tenant compte des variations du taux d'utilisation

Combinaisons	$V_{R(i)}(€)$	$B(€)$			$R_{L net}(€)$		
	Cas (1,2,3)	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 1	Cas 2	Cas 3
1 / 2 / 3	78 750	87 130	79 370	80 150	8 380	620	1 399
1 / 2 / 4	105 000	116 360	108 620	109 040	11 360	3 620	4 044
1 / 2 / 6	118 125	119 360	120 690	123 610	1 235	2 565	5 481
1 / 2 / 7	91 875	102 040	94 460	95 290	10 165	2 585	3 372
1 / 2 / 8	131 250	148 640	141 120	141 170	17 390	9 870	9 916
1 / 3 / 4	118 125	131 260	128 430	126 870	13 135	10 305	8 750
1 / 3 / 6	131 250	134 270	140 500	141 440	3 020	9 250	10 186
1 / 3 / 7	105 000	116 950	114 270	113 080	11 950	9 270	8 077
1 / 4 / 7	131 250	146 170	143 520	141 970	14 920	12 270	10 723
2 / 3 / 4	131 250	144 620	138 610	138 590	13 370	7 360	7 338
2 / 3 / 7	118 125	130 310	124 450	124 790	12 185	6 325	6 666

Tableau 4.10 - Coûts obtenus pour des combinaisons de véhicules électriques en tenant compte des variations du taux d'utilisation

Combinaisons	$V_{R(i)}$ (€)	B (€)			$R_{L\ net}$ (€)		
	Cas (1,2,3)	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 1	Cas 2	Cas 3
11 / 12 / 15 / 18 / 20	569 590	373 570	371 950	368 560	- 196 020	- 197 640	- 201 030
11 / 15 / 16 / 18 / 20	550 600	361 380	361 120	358 010	- 189 220	- 189 480	- 192 590
11 / 15 / 17 / 18 / 20	531 620	353 610	349 610	347 600	- 178 010	- 182 010	- 184 020
11 / 16 / 17 / 18 / 20	569 590	373 800	373 380	369 770	-195 790	- 196 210	- 199 820
12 / 13 / 15 / 18 / 20	550 600	355 440	351 600	353 060	- 195 160	- 199 000	- 197 540
12 / 13 / 17 / 18 / 20	569 590	367 870	363 850	364 820	- 201 720	- 205 740	- 204 770
12 / 15 / 16 / 17 / 18	550 600	352 360	354 060	351 460	- 198 240	- 196 540	- 199 140
12 / 15 / 16 / 17 / 20	569 590	364 120	365 560	362 930	- 205 470	- 204 030	- 206 660
12 / 15 / 16 / 18 / 20	512 630	328 820	330 350	327 410	- 183 810	- 182 280	- 185 220
12 / 15 / 17 / 18 / 20	493 640	321 050	318 840	317 000	- 172 590	- 174 800	- 176 640
12 / 16 / 17 / 18 / 20	531 620	341 240	342 610	339 170	- 190 380	- 189 010	- 192 450
13 / 15 / 16 / 17 / 18	569 590	366 790	364 490	366 550	- 202 800	- 205 100	- 203 040
13 / 15 / 16 / 18 / 20	531 620	343 250	340 770	342 500	- 188 370	- 190 850	- 189 120
13 / 15 / 17 / 18 / 20	512 630	335 480	329 260	332 090	- 177 150	- 183 370	- 180 540
13 / 16 / 17 / 18 / 20	550 600	355 670	353 030	354 260	- 194 930	- 197 570	- 196 340
14 / 15 / 17 / 18 / 20	569 590	373 400	367 980	364 960	- 196 190	- 201 610	- 204 630
15 / 16 / 17 / 18 / 20	474 660	308 850	308 020	306 440	- 165 810	- 166 640	- 168 220
15 / 16 / 18 / 19 / 20	569 590	369 000	368 180	369 060	- 200 590	- 201 410	- 200 530
15 / 17 / 18 / 19 / 20	550 600	361 230	356 670	358 650	- 189 370	- 193 930	- 191 950

4.6 Synthèse des résultats obtenus

D'après les résultats obtenus avant et après l'étude de sensibilité, nous constatons d'une façon évidente que l'option de la location des véhicules électriques ne peut pas être retenue en raison des valeurs négatives de location nets quel que soit l'âge des véhicules électriques ($T_2 = 58$ ou 28 mois). Donc, la revente des véhicules électriques juste en fin de missions reste la meilleure décision.

De plus nous avons constaté que lorsqu'un client exige un nombre important de kilomètres à faire avec un taux d'utilisation faible, la durée de location devient importante ce qui engendre une augmentation des actions des maintenances et une dépréciation de la valeur de revente après location. C'est pour cela, la revente des véhicules électriques juste en fin de missions reste la

meilleure décision. Et même en diminuant l'âge des véhicules électriques avant location ($T_2 = 28$ mois) les revenus nets de location restent toujours négatifs.

D'autre part, nous remarquons que le modèle donne des résultats qui sont dans leur majorité positifs pour le cas de location des véhicules à carburant.

Après analyse des résultats obtenus avant et après l'étude de sensibilité, il apparaît que (3, 9 et 10) représente la meilleure combinaison des clients d'un point de vue économique, alors que (1, 2 et 6) est la mauvaise combinaison. Ces combinaisons conduisent respectivement à un revenu net de location de 17 847 € et - 7 866 €. De plus en variant le taux d'utilisation associé à chaque véhicule de type i (lors de l'étude de sensibilité), nous constatons qu'aucun résultat négatif des revenus nets de locations a été affiché pour les toutes combinaisons possibles. Globalement, nous apercevons que la location des véhicules à carburant est favorisée en raison des revenus nets de location à gagner. Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation du taux d'utilisation permet une croissance du bénéfice, qui s'explique par une minimisation de la période de location et par conséquent par une réduction des coûts de maintenance.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au développement d'un modèle analytique et de sa résolution numérique afin de choisir, selon un critère économique, les clients à privilégier pour louer les deux types de véhicule à la fin de la mission initiale. Plus précisément, le modèle développé permet de choisir de vendre les véhicules, des deux types, dès la fin de la mission initiale (chapitre 1) ou d'étudier l'alternative de la location des véhicules, à carburant ou électrique, après la fin de leurs missions, en tenant compte de la stratégie de maintenance appliquée par l'entreprise propriétaire. Par hypothèse, le coût de maintenance restera à la charge de l'entreprise propriétaire qui a géré la mission initiale. Le choix décisionnel entre les clients peut mener au choix d'un seul client ou la satisfaction de plusieurs clients selon leurs demandes et la rentabilité économique illustrée par une fonction bénéfice développée analytiquement.

Une résolution numérique, programmée avec MATLAB, a été réalisée afin de déterminer la combinaison la plus économique entre les clients ou simplement de vendre les véhicules à la fin de mission initiales sans même les louer.

Dans ce présent chapitre, la demande des clients, le taux d'utilisation associé à chaque véhicule souhaité ainsi que la dépréciation de la valeur des véhicules durant la période de location ainsi ont été pris en considération.

De même, une analyse de sensibilité a été réalisée pour étudier le comportement du modèle à la suite de la variation de certains paramètres d'entrée. Cette analyse a mis en évidence le rôle et du taux d'utilisation (v_i) sur le coix des clients potentiels à privilégier pour la location.

Épilogue – Impact du COVID-19

✓ L'apparition de la crise sanitaire (COVID – 19) durant la thèse

Pendant ces années de thèse, la crise sanitaire mondiale provoquée par le virus (COVID-19) a impacté négativement l'activité économique dans le monde entier. Il a été prouvé à maintes reprises que cette crise sanitaire présente malheureusement un large éventail de risques pouvant mener à des conséquences catastrophiques pour les entreprises. Elle a eu pour conséquences d'inciter les entreprises et industries à prendre différentes mesures et à mettre en place des stratégies adaptées afin de gérer, à moindre mal, la situation et minimiser les dégâts.

Dans ce cadre, de nombreuses études ont évoqué la problématique de la crise sanitaire comme étant l'un des facteurs agissant sur la performance de l'entreprise et l'efficacité des différents services. En effet, l'impact d'une telle situation se manifeste dans des divers domaines dont le degré d'importance diffère d'un domaine à l'autre. D'ailleurs, dans le contexte industriel, l'impact négatif du (COVID-19) est difficile à identifier ou à caractériser puisqu'il s'agit d'un phénomène qui touche une grande variété de services logistiques. La gravité de cette crise fait d'elle un vaste éventail de recherche à explorer et un nouveau défi à relever. Par conséquent nous avons eu l'idée d'analyser l'impact de cette crise sanitaire sur nos stratégies développées afin de prévoir de nouveaux plans économiques où l'impact d'une future épidémie pourrait être prise en compte.

✓ Intégration de la notion crise sanitaire (COVID – 19) dans notre étude

Étant donné qu'il s'agit d'un concept jusqu'à peu inconnu, nous savons désormais que la crise sanitaire peut toucher divers domaines, mais nous tâcherons de rester étroitement lié à notre problématique du dimensionnement d'un parc de véhicules selon les trois stratégies étudiées, mais, avec la prise en compte d'éventuels dégradations des moyens de transport ainsi que l'adaptation d'un plan de maintenance pour faire face aux dégradations.

En effet, dans un tel contexte, nous considérons que les mesures de confinement imposées pendant la période d'exploitation de nos véhicules causeront une éventuelle suspension des actions de maintenances préventives, ces dernières pouvant être considérées comme des « activités non essentielles ». Cette décision, peu favorable à un plan de maintenance optimal, engendre une augmentation du facteur de dégradation de véhicules. Fort heureusement, les réparations correctives restent autorisées, puisqu'elles font partie de l'activité logistique vitale.

À cet égard, un nouveau plan de maintenance préventive doit être établi et mis en place à la fin de la période du confinement et ce, afin de garantir une performance élevée des véhicules du point de vue fiabilité.

En se basant sur cette hypothèse, nous supposons une période de confinement totale notée ΔC , commençant à partir de la date C et se terminant à la date $(C + \Delta C)$. Concrètement, les actions de maintenance préventive au cours de la période ΔC ne sont pas réalisés, ce qui entraîne une augmentation du taux de défaillance des véhicules. Par conséquent, un nouveau plan d'action des maintenances préventives doit être adopté à l'issue de la période de confinement, c'est-à-dire à partir de la date $(C + \Delta C)$ et ce, jusqu'à la fin de l'horizon de l'étude. En s'inspirant du travail réalisé dans le deuxième chapitre de cette thèse, la nouvelle stratégie de maintenance proposée consiste à réaliser des actions de maintenance préventive imparfaites sur un véhicule tous les m_i' mois. En outre, après chaque action de maintenance préventive imparfaite, le nombre moyen de panne augmente d'une fraction de e^α par rapport à celui du précédent intervalle de maintenances préventives. Le facteur e^α représente un facteur de « dégradation » strictement positif. En cas de pannes entre deux actions des maintenances préventives consécutives, des réparations minimales sont réalisées afin de remettre le véhicule en état de fonctionnement tout en maintenant son taux de défaillance au même niveau qu'avant la panne.

La figure suivante exprime l'évolution du taux de défaillance des véhicules par type i en tenant compte de la période du confinement.

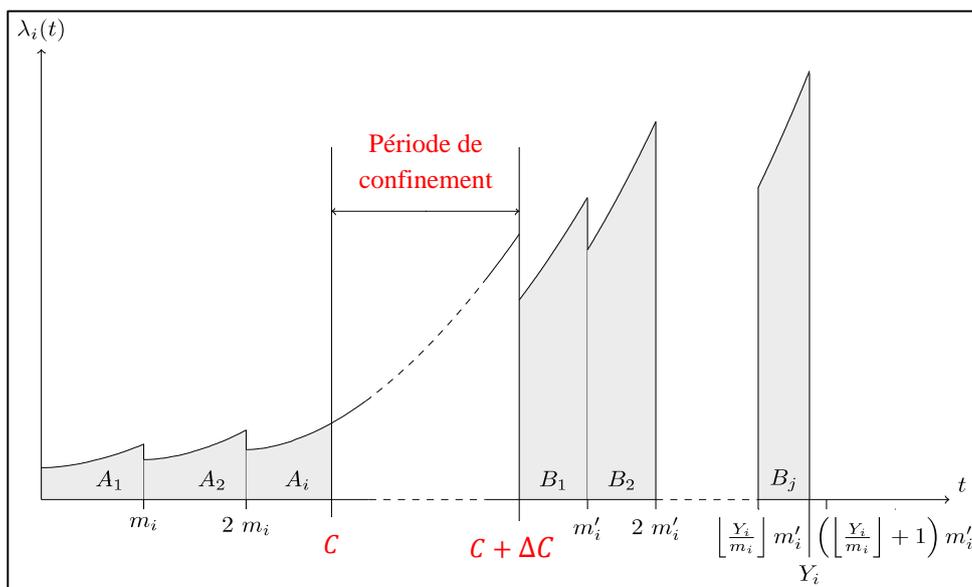


Figure A - Évolution du taux de défaillance des véhicules par type i en tenant compte de la période de confinement

En se référant à la figure ci-dessus, nous présentons le nombre moyen de pannes en prenant compte de la période de confinement. En effet, durant les tournées des véhicules, il peut se produire, en moyenne, $\emptyset(Y_i, m_i, C, \Delta C)$ défaillances entre deux actions de maintenances préventives effectuées (intervalle complet) ainsi qu'entre une action de maintenance préventive réalisée et l'arrivée de la date de confinement C au lieu d'une action préventive (intervalle incomplet). Le nombre moyen de pannes correspond donc à la somme des deux cas cités.

$$\emptyset(Y_i, m_i, C, \Delta C) = \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor} \int_0^{m_i} e^{(j-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) dx + \int_0^{(C+\Delta C) - \lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor \cdot m_i} e^{\lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor \cdot \alpha} \cdot \lambda_i(x) dx \quad (1)$$

Où $j = 1, \dots, \lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor$

Concernant le nombre moyen de pannes après le confinement, il s'agit de la somme du nombre de pannes entre un intervalle complet qui représente deux actions de maintenances préventives successives réalisées après le confinement en respectant la nouvelle périodicité m_i' et le nombre moyen de pannes dans un intervalle incomplet, c'est-à-dire l'arrivée de la date finale d'utilisation des véhicules. L'équation suivante représente le nombre moyen de pannes en tenant compte de la fin de la date du confinement.

$$\begin{aligned} \emptyset(Y_i, m_i', C, \Delta C) &= \sum_{j=\lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor + 1}^{\lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \rfloor} \int_0^{m_i'} e^{(j-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) dx \\ &+ \int_0^{(Y_i - (C + \Delta C)) - \lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \rfloor \cdot m_i'} e^{\lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \rfloor \cdot \alpha} \cdot \lambda_i(x) dx \end{aligned} \quad (2)$$

Où

- $j = \lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor + 1, \dots, \lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \rfloor$
- m_i' : nouvelle périodicité des maintenances préventives à respecter après le confinement pour chaque véhicule de type i (mois) avec $m_i' \in \mathbb{N}^*$.

Par conséquent, le nombre total moyen de pannes, pour les véhicules de type i , en tenant compte de la période avant et après le confinement est définie comme suit :

$$\begin{aligned}
\Phi(Y_i, m_i, m_i', C, \Delta C) &= \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor} \int_0^{m_i} e^{(j-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) dx + \int_0^{(C+\Delta C) - \lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor m_i} e^{\lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor \cdot \alpha} \cdot \lambda_i(x) dx \\
&+ \sum_{j=\lfloor \frac{C}{m_i} \rfloor + 1}^{\lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \rfloor} \int_0^{m_i'} e^{(j-1)\alpha} \cdot \lambda_i(x) dx \\
&+ \int_0^{(Y_i - (C + \Delta C)) - \lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \rfloor m_i'} e^{\lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \rfloor \cdot \alpha} \cdot \lambda_i(x) dx
\end{aligned} \tag{3}$$

Par ailleurs, l'expression analytique du coût des actions de maintenance est développée d'une façon similaire au deuxième chapitre, mais en introduisant la nouvelle périodicité de maintenance m_i' ainsi que le nouveau nombre total moyen de pannes déterminé pour tenir compte de la période de confinement.

$$C_{Mi} = C_{MCI} \cdot \Phi(Y_i, m_i, m_i', C, \Delta C) + C_{MPI} \cdot \left(\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i'} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \right\rfloor \right) \tag{4}$$

Avec :

- C_{MCI} : coût moyen d'une action de maintenance corrective d'un véhicule de type i (u.m).
- $\Phi(Y_i, m_i, m_i', C, \Delta C)$: nombre total moyen de pannes (réparation minimale), pour les véhicules de type i , en tenant compte de la période de confinement.
- C_{MPI} : coût moyen d'une action de maintenance préventive d'un véhicule de type i (u.m)
- $\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i'} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{Y_i - (C + \Delta C)}{m_i'} \right\rfloor$: nombre des actions de maintenances préventives.

Dans cette partie, nous avons cherché à ajuster le plan de maintenance préventif dans le cas d'une crise sanitaire pour un parc de véhicules déjà existant et ce, en se référant à la modélisation analytique de la maintenance présentée dans le deuxième chapitre.

Un des points forts de ce travail, imposé par la pandémie du (COVID-19), est l'adaptation d'un plan de maintenance pour s'adapter au mieux au contexte actuel.

✓ Étude numérique

L'étude numérique de la nouvelle périodicité des maintenances préventives à respecter après le confinement pour chaque véhicule de type i est basée sur les résultats déjà obtenus dans la première stratégie de ce manuscrit ainsi que la date d'arrivée du confinement. Sur cette base nous proposons dans le tableau suivant un exemple numérique qui montre l'impact de l'arrivée de la date du confinement causé par le virus COVID-19 sur la planification des maintenances.

Tableau A - Résultats numériques en tenant compte du confinement

		Durée de confinement			
C	(mois)	18			
ΔC	(mois)	6			
		(Renault)		(Nissan)	
		Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$	Carburant $i = 1$	Électrique $i = 2$
		Résultats de la première stratégie			
X_i		3	12	1	15
Y_i	(mois)	13	57	5	47
m_i	(mois)	8	23	-	19
		Nouveau plan de maintenance préventif à respecter après le confinement			
m'_i	(mois)	-	7	-	8
		Coût total de la maintenance dans le cas où 'PM initial' est réalisé à (m_i) 'durant le confinement' ($C < PM_{initial} < C + \Delta C$)			
$X_i \cdot C_{Mi}$	(€)	4 618	94 692	247	100 065
		Coût total de la maintenance dans le cas où 'PM initial' est conservé juste après le confinement ($PM_{initial} > C + \Delta C$)			
$X_i \cdot C_{Mi}$	(€)	4 618	115 404	247	115 605

Après l'analyse des résultats obtenus en tenant compte évidemment de la période de confinement, il apparaît que seuls les véhicules électriques des deux marques sont concernés par la nouvelle périodicité des maintenances préventives à respecter juste après le confinement (m'_i). En effet, en se référant des résultats de la première stratégie (tableau 2.4) les véhicules à carburant seront utilisés pendant 13 mois pour (Renault) et 5 mois pour (Nissan), ces dates sont inférieures de la date d'arrivée du confinement ($C = 18$ mois). Donc les véhicules à carburant sont hors planning. Concernant les véhicules électriques, nous constatons qu'une action de maintenance préventive doit être réalisée au début du confinement pour (Renault) et en totalité 5 actions PM doivent être réalisées avec une cadence d'une action PM chaque 7 mois à partir de la date finale de confinement ($C + \Delta C = 24$ mois). En suivant cette planification le coût total de maintenance sera 7 891 € pour un seul véhicule, alors si nous conservons la première action de maintenance lors de l'arrivée de la date de confinement juste après la date ($C + \Delta C$) le coût total de maintenance d'un véhicule sera égal à 9 617 €.

Pour la deuxième marque (Nissan), une action de PM doit être réalisée au début de l'arrivée de la date du confinement puis une action de PM chaque 8 mois à partir de la date ($C + \Delta C$). Avec ce nouvel ajustement du PM, le coût total des maintenances sera égal à 6 671€ alors si nous conservons la première action PM ($m_i = 19 \text{ mois}$) juste après le confinement, le coût total augmentera à 7 707 € pour un véhicule. À partir de ces résultats, nous constatons sur l'importance de respecter la nouvelle périodicité des maintenances préventives après le confinement pour chaque véhicule électrique afin de gagner un coût total de maintenance de 1 726 € pour chaque véhicule électrique Renault (soit 20 712 € pour toute la flotte) et 1 036 € pour chaque véhicule électrique Nissan (soit 15 540 € pour toute la flotte).

Conclusion générale

Dans ce travail de Doctorat, nous nous sommes intéressés à l'étude du dimensionnement d'une flotte de véhicules, basé sur deux typologies d'énergies distinctes, tenant compte de l'impact environnemental ainsi que des actions de maintenance réalisées sur les véhicules. Ce dimensionnement qui se base essentiellement sur l'intégration de la gestion de la maintenance, est devenue une alternative crédible pour répondre aux divers défis logistiques imposés. En effet, les véhicules sont sujets à des pannes aléatoires, d'où la nécessité de prévoir des actions de maintenance préventive pour diminuer l'occurrence des pannes. L'une des originalités de notre étude, est le fait de considérer une dégradation du véhicule liée au type de véhicule, sa durée d'utilisation ainsi qu'à son mode d'exploitation. Dans cet optique, la problématique posée consistait à dimensionner un parc de véhicules qui intègre l'aspect de la maintenance pour les véhicules, sujet à des contraintes opérationnelles et environnementales. Cette politique de dimensionnement dérive du problème de la mise en place des parcs d'appui logistique qui prend en considération l'aspect opérationnel comme étant une contrainte de décision en considérant la disponibilité de deux types de véhicule (à carburant, électrique).

Nous avons débuté ce travail par un état de l'art en vue de se familiariser avec l'environnement sur lequel notre thèse a été fondée. Nous avons présenté les fonctions fondamentales de la maintenance, de la logistique ainsi que le concept du couplage (logistique / maintenance). De même, nous avons exposé plusieurs travaux de recherches qui touchent ces thématiques et qui soulignent l'effet de contraintes opérationnelles sur les problèmes de l'utilisation des véhicules. Plusieurs chercheurs se sont focalisés sur l'étude de la fonction maintenance pour un parc de véhicules existant, sans tenir compte des autres fonctions comme l'exploitation, la consommation énergétique et l'impact sur l'environnement. À cet égard, nous nous sommes intéressés à développer une nouvelle stratégie de maintenance pour un parc de véhicules à constituer. Ainsi, nous avons eu l'idée de nous orienter vers le dimensionnement économique d'un parc de différents types de véhicules tout en intégrant la maintenance, les contraintes opérationnelles et l'impact sur l'environnement dans la modélisation.

Il est à noter, qu'au sein de cette étude, nous nous sommes intéressés à trois aspects fondamentaux dans le dimensionnement :

- La planification de la maintenance en tenant compte de la durée d'utilisation des véhicules et leurs exploitations.
- La consommation énergétique de chaque type de véhicule.
- L'impact sur l'environnement causé par chaque type de véhicule.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation d'un premier problème par le biais du développement d'un modèle analytique qui serait en mesure d'aider au dimensionnement d'un parc de différents types de véhicules selon un critère économique en tenant compte des contraintes environnementales et opérationnelles. En effet, nous avons cherché à dimensionner le parc selon la stratégie d'achat et de revente en fin de mission. Nous avons considéré, dans cette stratégie, qu'une entreprise de logistique doit réaliser des missions

de transport sur un horizon de temps fini. De ce fait, cette entreprise doit acquérir plusieurs véhicules par types. Dans ce contexte, nous avons sélectionné deux types de véhicules (à carburant et électrique) comme critère de choix.

La particularité de cette stratégie réside dans la prise en considération de la différence entre les deux types de véhicule au niveau de la fiabilité, de la consommation, du coût d'acquisition et de l'impact sur l'environnement. Pour cette stratégie, nous avons déterminé simultanément le nombre optimal de véhicules de chaque type d'énergie à acquérir ainsi que leurs durées d'utilisation, la périodicité des actions de maintenance ainsi que leur taux d'utilisation. Clairement, ces paramètres représentent nos variables de décision. Un autre travail de réflexion, non moins important, était l'idée d'intégrer dans le modèle développé les coûts de revente de chaque type de véhicule qui se calcule à partir du coût d'acquisition en fonction de la dépréciation de la valeur de revente pour chaque type de véhicule. À part les variables de décisions citées, les durées de conservation concernant chaque type de véhicule ont été rajoutés comme variables de décision. On note que pour cette stratégie, nous avons pris un exemple réel de deux marques de véhicules utilitaires (Renault et Nissan) et pour chacune d'entre elles, deux types d'énergie (électrique et à carburant). Un exemple numérique, se basant sur des méthodes et des techniques d'optimisation a été présenté afin de déterminer le dimensionnement économique.

Pendant cette thèse, nous avons vécu une période très critique marquée par la crise sanitaire dû à l'épidémie du COVID-19. Cette crise a montré un impact négatif considérable sur le domaine socio-économique. De ce fait, nous avons eu d'idée d'intégrer une des conséquences possibles de cette crise sur notre travail réalisé dans le cadre de ce manuscrit afin d'améliorer notre stratégie. En effet, à la suite de la modélisation analytique de la périodicité de maintenances, effectuée dans ce chapitre, un travail approfondi nous a permis de proposer une nouvelle périodicité des maintenances préventive qui tient compte de la durée de confinement causé par la crise sanitaire mondiale. En effet, pour donner suite à la suspension des activités de maintenance préventive pendant la période de confinement, les dégradations des véhicules se sont accélérées n'autorisant que les réparations correctives durant cette période. Par conséquent, nous avons considéré la durée du confinement comme une nouvelle contrainte opérationnelle dans la planification des actions de maintenances.

Le troisième chapitre concerne également le dimensionnement du parc de véhicules selon une stratégie de « leasing ». Ce chapitre se caractérise par la location de véhicules par type, contrairement au deuxième chapitre, où le parc a été constitué par l'acquisition et la revente des véhicules à la fin de leurs missions. En effet, nous avons considéré dans ce chapitre que le coût de la location des véhicules remplace le coût d'investissement et le revenu de revente des véhicules. Avec cette nouvelle approche, nous avons écarté la dépréciation de la valeur des véhicules lors de la revente. En revanche, nous avons introduit d'autres contraintes telles que des coûts de pénalité liés aux kilomètres supplémentaires. Pour cette stratégie, trois variables de décision sont à déterminer sur un horizon fini : le nombre optimal de véhicules de chaque type d'énergie à louer, les durées de location ainsi que la périodicité des actions de maintenance préventive. Un modèle analytique a été développé afin d'illustrer la stratégie envisagée puis

une étude numérique a été présentée dans l'intention de mettre en valeur le modèle développé et examiner l'impact de contraintes opérationnelles sur les résultats obtenus.

Le dernier chapitre de cette thèse est consacré à l'étude de la troisième stratégie de dimensionnement d'un parc de véhicules en considérant le concept d'acquisition avec possibilité de mise à disposition des véhicules auprès de clients potentiels, avant la revente. Ce chapitre peut être considéré comme une continuité du travail de la première stratégie proposée, mais en intégrant l'aspect location de la deuxième stratégie. Ce chapitre se caractérise par la détermination du choix le plus favorable entre la revente des véhicules après la première mission ou la location de véhicules auprès de certains clients avant la revente des véhicules. En outre, l'impact de la dégradation des véhicules ainsi que leurs coûts de maintenance et la dépréciation du revenu de revente liée à la période de location ont été prises en considération dans la décision finale. Par la suite, une étude numérique a été menée et interprétée pour prouver la robustesse de la modélisation de notre modèle.

À travers ce projet de thèse, nous avons démontré que les concepts opérationnels et environnementaux jouent un rôle important dans la prise de décision du dimensionnement d'un parc d'appui logistique tout comme le nombre de véhicules et leurs typologies. De ce fait, il serait intéressant d'ouvrir d'autres perspectives de recherche pour l'amélioration de nos modèles développés. Parmi les alternatives proposées, nous pouvons agir sur le plan de maintenance, en adoptant un coût de maintenance variable ce qui revêt être une pratique réellement appliquée. Une autre stratégie concernerait le dimensionnement d'une flotte de véhicules selon une multi-stratégies d'achat et location en fin de mission. Toutefois, cela nécessiterait la relaxation de plusieurs hypothèses posées et une réadaptation majeure de nos modèles analytiques.

Pour finir, les travaux réalisés dans cette thèse représentent une proposition innovante dans le domaine du génie industriel. En effet, ce travail se focalise essentiellement sur la gestion d'une flotte de véhicules tout en intégrant l'aspect de la maintenance ainsi que les contraintes opérationnelles dans la flotte. J'espère que ce travail permettra de proposer de nouvelles stratégies économiques de dimensionnement des parcs des véhicules.

Je terminerai par indiquer que ce travail de thèse a fait l'objet d'un article de journal et de trois conférences internationales.

Journal :

- Malek Ben Mechlia, Jérémie Schutz, Sofiene Dellagi and Anis Chelbi, Quasi-Optimal Sizing of a Vehicle Fleet Considering Environmental Impact, Maintenance, and Eventual Containment. Sustainability, 2021.

Conférences :

- Malek Ben Mechlia, Jérémie Schutz and Sofiene Dellagi. The possibility of Renting an Existing Vehicles Fleet at the end of Their mission with Consideration The customer demand and Maintenance. The 12th Annual Industrial Engineering and Operations Management, Istanbul - Turkey, 2022, (Accepted).

- Malek Ben Mechlia, Jérémie Schutz, Sofiene Dellagi and Anis Chelbi. Optimal design of a leased vehicle fleet with consideration of maintenance and environmental constraints. The International Conference on Modeling, Optimization and Simulation, Agadir - Morocco, 2020.
- Malek Ben Mechlia, Jérémie Schutz and Sofiene Dellagi. Integrated maintenance policy for transportation system according to a supply chain. The Euro-Mediterranean Conferences on Mathematical Reliability, Djerba - Tunisia, 2018.

Résumé : De nos jours, la logistique occupe une place prépondérante dans la politique de pilotage des entreprises. Ceci est principalement dû aux exigences imposées par les parties prenantes qui ont conduit les entreprises à explorer d'autres voies pour améliorer leurs performances économiques tout en respectant les exigences imposées. La clé de la réussite de la plupart des entreprises réside dans les bonnes décisions à prendre avant d'investir. Dans ce cadre, instaurer des outils d'aides à la décision en tenant compte des contraintes opérationnelles et environnementales dans le domaine de la logistique est devenu un enjeu majeur pour relever ce défi. À cet égard, nous nous sommes intéressés dans ce projet de recherche au dimensionnement d'un parc de véhicules en tenant compte de l'impact environnemental et de la maintenance tout en considérant deux types de véhicules (à carburant et électrique). Une étude bibliographique des domaines de la logistique des transports, de la fiabilité, de la maintenance, des caractéristiques des différents types de véhicules, a été réalisée dans un premier temps. La modalité d'exploitation, la consommation énergétique ainsi que l'impact environnemental causé par les moyens de transport selon les typologies, sont pris en considération dans la présentation des différentes études menées. Pour le dimensionnement et la typologie d'une flotte de véhicules basés sur la maintenance et l'impact environnemental, nous avons proposé trois stratégies où chacune est illustrée par le biais du développement d'un modèle analytique et d'une résolution numérique basée sur un exemple. Le premier modèle se rapporte à la stratégie d'achat et de revente en fin de missions, le deuxième s'intéresse à la stratégie de « *leasing* » et le troisième concerne la stratégie d'acquisition avec location en fin de mission avant la revente. L'optimisation de chaque stratégie est développée dans le but de déterminer essentiellement le nombre de véhicules à exploiter pour chaque type, le nombre de mois d'utilisation de chaque véhicule et la périodicité des maintenances préventives pour chaque type de véhicules. Les résultats numériques indiquent, pour chaque stratégie, les valeurs quasi-optimales des différentes variables de décision et prouvent la robustesse des modèles analytiques développés. La crise sanitaire (COVID -19) subie pendant ces années de recherches a permis d'enrichir ce travail en proposant la prise en compte d'événements imprévus sur l'élaboration d'un plan de maintenance préventive.

Mots-clés : Logistique, Fiabilité/Maintenance, Véhicules électrique, Exploitation, Impact environnemental.

Abstract : Nowadays, taking into account hard customer requirements, logistics represent one of the most important keys of success for companies. The expectations have led companies to explore new ways to improve their economic performance while respecting the imposed requirements. In this context, introducing the decision support tools considering operational and environmental constraints in the logistics field has become a major issue to turn up this challenge. Therein, we were interested in this research project in the economical sizing of a fleet of vehicles considering the environmental impact and maintenance, while considering two types of vehicles (fuel, electric). The operating mode, the energy consumption as well as the environmental impact caused by the means of transport are considered in presenting the various works studied. For the sizing and typology of a vehicle fleet based on maintenance and environmental impact we proposed three strategies, where each is illustrated through the development of an analytical model and a numerical resolution based on an example. The first relates to the strategy of acquisition and resale of all vehicles used at the end of missions, the second is about the strategy of leasing and the third concerns the strategy of acquisition, the subcontracting at the end of missions and resale at the end of the subcontracting contract. The optimization of each strategy is developed to determine the optimal number of vehicles of each type to be exploited, the duration of its use, and the preventive maintenance (PM) policy to be adopted for each type of vehicles. Numerical results show the differences between strategies and prove the robustness of the analytical models developed. We note that the impact of the period of health crisis (COVID-19) on the preventive maintenance strategy has been taken into consideration for the first strategy developed.

Keywords : Logistics, Reliability/Maintenance, electric vehicles, exploitation, environmental impact.

Bibliographie

[AFNOR, 2010] AFNOR NF-EN-13306-X-60-319(2010): “Terminologie de la maintenance”.

[Gouiaa-Mtibaa, et al., 2017] Amal Gouiaa-Mtibaa, *Développement de nouvelles politiques de maintenance intégrée à la qualité en tenant compte de diverses contraintes opérationnelles*. Ph.D. thesis, Université de Lorraine.

[Balcik et al., 2015] Balcik, B., Kunz, N., Van Wassenhove, L. N., McConnell, R., & Hov, K., 2015. Centralized vehicle leasing in humanitarian fleet management: the UNHCR case. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*.

[Barlow, R.E., Hunter, L.C., Proschan, F. 1963] Optimum checking procedures. “*Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*”.11(4), 1078–1095.

[Benoist et al., 2010] Benoist T, Estellon B, Gardi F, and Jeanjean A, 2010. Recherche locale pour un problème d’optimisation de tournées de véhicules avec gestion des stocks. *IN MOSIM*, Hammamet, Tunisia

[Ben Mabrouk et al., 2016a] Ben Mabrouk, A., A. Chelbi, and M. Radhoui, 2019a. Optimal imperfect preventive maintenance policy for equipment leased during successive periods. *International Journal of Production Research*, 54(17), p. 5095-5110.

[Ben Mabrouk et Chelbi, 2020] Ben Mabrouk, A. and A. Chelbi, 2020. Optimal maintenance policy for equipment leased with warranty. 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM’20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco, 58(7), p. 1-7.

[Belin-Munier, 2015] Belin-Munier C., “Logistique, chaîne logistique et SCM dans les revues francophones de gestion : quelle dimension stratégique ? ”. XXIIIème conférence de l’Association Internationale de Management Stratégique (AIMS), Mai 2014, Rennes, France.

[Block et al.1985] Henry W Block, Wagner S Borges, and Thomas H Savits. Age-dependent minimal repair. *Journal of applied probability*, 22(2) :370_385, 1985.

[Brown and Proschan 1983] Mark Brown and Frank Proschan. Imperfect repair. *Journal of Applied probability*, pages 851_859, 1983.

[Chan and Shaw1993] J-K Chan and Leonard Shaw. Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(4) :566_571, 1993.

[Chitrakant et Srinivasu, 2020] Chitrakant Banchhor, Srinivasu N (2020). Analysis of Bayesian Optimization Algorithms for Big Data Classification Based on Map Reduce Framework. *Journal of Big data*. Doi: 10.21203/rs.3.rs-132776/v1

[Colin, 2005] Colin, J. « Le supply chain management existe-t-il réellement ? », *Revue française de gestion*, 2005/3, no 156, p. 135-149.

[Cozé-Bardin, 2009] Gozé-Bardin, I., (2009), « Les défis de la logistique de distribution à l’horizon 2035 », *Management & Avenir*, 2009/4 n° 24, p. 217-236.

[**Christopher, 1992**] M. Christopher, Logistics and supply management: strategies for reducing costs and improving services, London Pitman. 1992.

[**Charkaoui, 2016**] <http://www.acharkaoui.com/la-logistique/histoirelogistique/>

[**Deloux, E. 2008**]. Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant. Ph.D. thesis, Université de Nantes.

[**Dellagi et al., 2007**] Dellagi S., Rezg N., Xie X., “Preventive Maintenance of Manufacturing Systems Under Environmental Constraints”. International Journal of Production Research, vol. 45, Issue 5, p. 1233-1254. 2007.

[**Dhahri et al., 2015**] Dhahri, A., Mjirda, A., Zidi, K., and Ghedira, K. (2016). A vns-based heuristic for solving the vehicle routing problem with time windows and vehicle preventive maintenance constraints. *Procedia Computer Science*, 80:1212–1222.

[**Donateo et al. 2014**] Donateo, T., Ingrosso, F., Licci, F., and Laforgia, D. (2014). A method to estimate the environmental impact of an electric city car during six months of testing in an italian city. *Journal of Power Sources*, 270:487–498.

[**Doyen and Gaudoin 2004**] Laurent Doyen and Olivier Gaudoin. Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age. *Reliability Engineering & System Safety*, 84(1) :45-56, 2004.

[**Gang Quan, 2006**] Gang Quan a, Garrison W. Greenwood b, Donglin Liu c, Sharon Hu c a. Searching for multiobjective preventive maintenance schedules: Combining preferences with evolutionary algorithms. *European Journal of Operational Research*, 177, Pages 1969–1984.

[**Gertsbakh 2013**]. Gertsbakh, I. (2013). Reliability theory: with applications to preventive maintenance. Springer.

[**Hajej et al., 2016**] Hajej, Z., N. Rezg, and A. Gharbi, 2016. An optimal production/maintenance strategy under lease contract with warranty periods, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(1), p. 35-50.

[**Hajej et al., 2020**] Hajej, Z.; Rezg, N.; Askri, T. Joint optimization of capacity, Production and maintenance Planning of leased machines. *Journal of Intelligent Manufacturing* (2020) 31 ; 351-374. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1450-7>

[**H. Chouikhi . A. Khatab .N. Rezg; 2012**] A condition-based maintenance policy for a production system under excessive environmental degradation.

[**Hui et al. 2017**] Hui Xu; Xiang Liu; Jun Su, (2017) An improved grey wolf optimizer algorithm integrated with Cuckoo Search. 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)

[**Iyer 1992**] Srinivas Iyer. Availability results for imperfect repair. *Sankhy a: The Indian Journal of Statistics, Series B*, pages 249_256, 1992.

[**J. Tyworth, J. Cavinato et J. Langley, 1987**] Traffic Management, Addison Wesley. chap 6 & 14.

[**J. Meyer, M J. Peck, J. Stenason And C. Zvvick, 1959**] Competition in the Transportation Industries, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.

[**Jbili et al., 2018**] Jbili, S., Chelbi, A., Radhoui, M., and Kessentini, M. (2018). Integrated strategy of vehicle routing and maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 170:202 – 214.

[**Kamel Fethi, 2001**] Optimisation de la consommation Energétique dans la station de dessalement de Zarzis (12,000 m³/j), 2001, pp.225-231.

[**Kijima et al. 1988**] Masaaki Kijima, Hidenori Morimura, and Yasusuke Suzuki. Periodical replacement problem without assuming minimal repair. *European Journal of Operational Research*, 37(2) :194_203, 1988.

[**Kijima 1989**] Masaaki Kijima. Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied probability*, 26(1) :89_102, 1989.

[**Law et Kelton, 1982**] Law A.M, et Kelton W.D, (1982): “Simulation modeling and analysis». New York:McGraw-Hill.

[**leazeco, 2020**] Leasing Utilitaire Electrique - LOA ou LLD <https://www.leazeco.com/leasing-utilitaire-electrique> (Accessed Septembre 2020).

[**Legipermis 2020**] Décote voiture : le calcul. <https://www.legipermis.com/estimation-cote-voiture/decote-auto.html> (Accessed 30 May 2020).

[**Le Point, 2013**] Voiture électrique : 80 % de décote en 3 ans. https://www.lepoint.fr/automobile/voiture-electrique-80-de-decote-en-3-ans-16-12-2013-1770244_646.php (Accessed 30 May 2020).

[**Lestari et Kurniati, 2017**] C Lestari¹ and N Kurniati¹. Policy for equipment’s leasing period extension with minimum cost of maintenance IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 337 (2018) 012068 doi:10.1088/1757-899X/337/1/012068.

[**Malik1979**] Mazhar Ali Khan Malik. Reliable preventive maintenance scheduling. *AIIE transactions*, 11(3) :221_228, 1979.

[**MEEM, 2017**] Chiffres clés du transport – Édition 2017. Ministère de l’environnement, de l’énergie et de la mer de France en charge des relations internationales sur le climat.

[**Muller, 2005**] Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d’un processus de pronostic. “*Thèse de doctorat*. Université Henri Pointcaré, Nancy”.

[**Mehmet B Y et Farnaz G N, 2014**] Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair “*Int J AdvManuefTechnol* (2014) 74:1419–1430”

[**Makabe and Morimura 1963**] Hajime Makabe and HIDENORI Morimura. A new policy for preventive maintenance. *Journal of Operations Research Society of Japan*, 5 :110_124, 1963.

- [**Mori M., M. Fujishima, Y. Inamasu, and Y. Oda. 2011**] A Study on Energy Efficiency Improvement for Machine Tools. *CIRP ‘Annals-ManufacturingTechnology’* 60 (1): 145–148.
- [**Morimura1969**] Hidenori Morimura. On Some Preventive Maintenance Policies for IFR. University of North Carolina, Department of Statistics, 1969.
- [**Miao et al., 2018**] Miao, R., Li, Q., Huang, W., Guo, P., Mi, L., Zhang, Z., & Jiang, Z., 2020. Profit Optimization for Mileage-Based Pricing of Electric Vehicle Lease. *IEEE Transactions on Engineering Management*.
- [**Nakagawa 1979a**] Toshio Nakagawa. imperfect preventive maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, R 28(5) :402, 1979.
- [**Nakagawa 1979b**] Optimum policies when preventive maintenance is imperfect. *IEEE Transactions on Reliability*, 28(4), pp. 331–332.
- [**Nakagawa 1979c**] Toshio Nakagawa. A summary of imperfect maintenance policies with minimal repair. *RAIRO, Recherche Operationnelle*, 14 :249_255, 1979.
- [**Nakagawa 1988a**] Toshio Nakagawa. Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(3) :295_298, 1988.
- [**NF EN 13306**] Terminologie de la maintenance. Edition AFNOR, Octobre 2010.
- [**Ndhaief et al., 2017**] N. Ndhaief, O. Bistorin and N. Rezg, 2017. An Improved Distribution Policy with a Maintenance Aspect for an Urban Logistic Problem. *Applied Sciences* **2017**, 7(7), 703.
- [**Pham and Wang 1996a**] Hoang Pham and Hongzhou Wang. Imperfect maintenance. *European journal of operational research*, 94(3) :425_438, 1996.
- [**Pham and Wang 1996b**] Hoang Pham and Hongzhou Wang. Imperfect maintenance. *European journal of operational research*, 94(3) :425_438, 1996.
- [**Ponish et al. 2017**] Ponsich, A., Azzaro-Pantel, C., Domenech, S., and Pibouleau, L. (2007). Some guidelines for genetic algorithm implementation in MINLP batch plant design problems, pages 293–315. Springer.
- [**Pongpech et Murthy, 2006**] Pongpech, J. and D. Murthy, 2006. Optimal periodic preventive maintenance policy for leased equipment. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(7), p. 772-777.
- [**Prud’homme et Koning, 2012**] Prud’homme, R. and Koning, M. (2012). Electric vehicles: A tentative economic and environmental evaluation. *Transport Policy*, 23:60–69.
- [**Rezg N, Dellagi S, and Hajej Z, 2014**] Maintenance Optimization for Transport Vehicles in a Supply Chain. *Logistics and transport N° 4 (24)*. 7-14.
- [**R Ballou, 1992**] *Business Logistics Management*, 3ième édition, Prentice-Hall, chap 7, 8, 13.

[Rezg et al.,2005] N. Rezg, A. Chelbi, X. Xiaolan. “Modeling and optimizing a joint buffer inventory and preventive maintenance strategy for a randomly failing production unit: Analytical and simulation approaches”. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18 (2-3) (2005), pp. 225–235.

[Sawadogo et al., 2010] Sawadogo M, and Didier A, 2010. Modèle de plus court chemin multi objectif pour le transport intermodal au sein de la chaîne logistique verte. *8e Conférence Internationale de modélisation et Simulation-(MOSIM'10)*, Hammamet, Tunisie, pp. 392–401.

[Schouten et Vanneste, 1995] Van Der Dyun Schouten, F.A., Vanneste, S.G. “Maintenance optimization of a production system with bu_er capacity”. *European journal of Operational Research*: Vol. 82, n 2, p.323-338. 1995.

[Schutz et Rezg, 2013] Schutz, J. and N. Rezg, 2013. Maintenance strategy for leased equipment. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3), p. 593-600.

[Taylor, 2003] Taylor D.A., (2003). “Supply Chain: A manager's guide”. USA: Addison-Wesley.

[Turki et Rezg, 2016] Turki, S. and Rezg, N. 2016. Study of a manufacturing system with transport activities in urban area. (*IFAC*), *International Federation of Automatic Control*, 49-3 (2016) 419-423.

[Terry, 1979] Terry L. Friesz, J. Enrique Fernandez. A model of optimal transport maintenance with demand responsiveness. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 13, Issue 4, Pages 317–339, December 1979.

[Troudi et al., 2015] Troudi A, Dellagi S, and Addouche S-A, 2015. An optimal maintenance policy for transport vehicles in a supply chain under infrastructure / environment constraints. *CIE45 Proceedings, 28-30 October 2015*, Metz, France.

[Vujanović et al. 2018] Vujanović, D. B., Momčilović, V. M., and Medar, O. M. (2018). Influence of an integrated maintenance management on the vehicle fleet energy efficiency. *Thermal Science*, 22(3):1525–1536.

[Wang et Pham 1996] Hongzhou Wang and Hoang Pham. Optimal age-dependent preventive maintenance policies with imperfect maintenance. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 3(02) :119_135, 1996.

[Wang et al. 2018] Wang, X., L. Lishuai, and X. Min, 2018. Optimal preventive maintenance strategy for leased equipment under successive usage-based contracts. *International Journal of Production Research*, 57(18), p. 5705-5724. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542181>

[Zhou et al., 2014] Zhou, X., Y. Li, L. Xi, and J. Lee, 2014. Multi-phase preventive maintenance policy for leased equipment. *International Journal of Production Research*, 53(15), p. 4528-4537.