



**HAL**  
open science

# **SURATRAM - Système de Transport Intelligent pour la gestion du fret de marchandises en zone urbaine**

Pierre Romet

► **To cite this version:**

Pierre Romet. SURATRAM - Système de Transport Intelligent pour la gestion du fret de marchandises en zone urbaine. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2022. Français. NNT : 2022UBFCA007 . tel-03826751

**HAL Id: tel-03826751**

**<https://theses.hal.science/tel-03826751>**

Submitted on 24 Oct 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.

**UBFC**

UNIVERSITÉ  
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ



**utbm**

université de technologie  
Belfort-Montbéliard

# THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

## PRÉPARÉE A L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBÉLIARD

Ecole doctorale ED-SPIM n°37

Doctorat de Spécialité : Informatique

Par

Monsieur Pierre ROMET

**SURATRAM**

### **Système de Transport Intelligent pour la gestion du fret de marchandises en zone urbaine**

Thèse présentée et soutenue à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,  
le 27 Juin 2022

Composition du Jury :

Pr. Vincent CHEVRIER  
Pr. Yacine OUZROUT  
Dr. (HDR). Romuald AUFRERE  
Pr. Didier FASS  
Pr. Reiner KRIESTEN  
Pr. Sidi-Mohammed SENOUCI  
Dr. (HDR) Daniela CHRENKO  
Pr. Franck GECHTER  
Pr. El-Hassane AGLZIM  
Dr. (HDR) Olivier GRUNDER

Université de Lorraine  
Université de Lyon  
Université de Clermont Ferrand  
Université Lorraine  
Karlsruhe Institute of Technology  
Université de Bourgogne  
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard  
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard  
Université de Bourgogne  
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Invité  
Examineur  
Directeur de thèse  
Codirecteur de thèse  
Invité

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>8</b>
1.1	Contexte général . . . . .	8
1.1.1	Les STI, leur domaine et leur évolution . . . . .	8
1.1.2	Évolution du paradigme du Transport . . . . .	9
1.1.3	Pour une catégorisation des STI . . . . .	10
1.2	Le projet de recherche SURATRAM . . . . .	11
1.3	Les verrous du projet SURATRAM . . . . .	12
1.3.1	Les verrous sociaux . . . . .	12
1.3.2	Les verrous économiques . . . . .	12
1.3.3	Les verrous législatifs . . . . .	13
1.3.4	Les verrous technologiques . . . . .	13
1.3.5	Les verrous écologiques . . . . .	13
1.4	Plan de Thèse . . . . .	14
1.4.1	Chapitre 2 : Système de Transport Intelligent . . . . .	14
1.4.2	Chapitre 3 : Optimisation de tournée de marchandises . . . . .	14
1.4.3	Chapitre 4 : Prise en compte de la dimension énergétique . . . . .	14
1.4.4	Chapitre 5 : Simulateur de Réalité Mixte . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Système de Transport Intelligent de marchandises : de l'expression des besoins vers les verrous scientifiques</b>	<b>15</b>
2.1	État de l'art des Systèmes de Transport Intelligent . . . . .	15
2.1.1	Des systèmes de transport aux systèmes de transport intelligent . . . . .	15
2.1.1.1	Histoire des STI . . . . .	15
2.1.1.2	Les différences internationales . . . . .	17
2.1.1.3	L'ISO comme norme internationale . . . . .	24
2.1.1.4	Les technologies au sein des STI . . . . .	27
2.1.2	De la logistique urbaine au système de management du fret urbain . . . . .	32
2.1.2.1	La logistique urbaine . . . . .	32
2.1.2.2	La Smart City . . . . .	33
2.1.2.3	Les gestions STI pour la gestion du fret . . . . .	34
2.2	SURATRAM et la place des Systèmes de Transport Intelligent . . . . .	43
2.3	Quels verrous scientifiques pour SURATRAM? . . . . .	46
2.3.1	Le véhicule autonome . . . . .	46
2.3.1.1	Reconnaissance et interprétation de la scène . . . . .	46
2.3.1.2	Conduite en convoi . . . . .	46
2.3.1.3	Accroche, décroche et parking en navigation autonome . . . . .	47
2.3.2	Le véhicule électrique et sa batterie . . . . .	47
2.3.3	L'optimisation de tournée de véhicule . . . . .	47
2.3.4	Les outils de test pour les véhicules autonomes . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Optimisation par colonies de fourmis : Une approche basée sur l'environnement pour un critère de fin adaptatif</b>	<b>49</b>
3.1	Introduction . . . . .	49
3.2	De l'agent à la colonie de fourmis . . . . .	50
3.2.1	Système multi-agents . . . . .	50
3.2.1.1	Introduction : Qu'est ce que l'intelligence? . . . . .	50
3.2.1.2	Définitions générales . . . . .	53

3.2.1.3	Les systèmes multi-agents . . . . .	56
3.2.2	Épistémologie des colonies de fourmis . . . . .	61
3.2.2.1	Introduction . . . . .	61
3.2.2.2	Inspiration Biologique . . . . .	61
3.2.2.3	Les techniques d'optimisations . . . . .	63
3.2.2.4	Domaine d'intérêt de la technique . . . . .	68
3.2.2.5	Terminaison de l'algorithme . . . . .	69
3.2.3	Pourquoi travailler sur le critère de terminaison ? . . . . .	70
3.2.3.1	Le besoin de dynamicité dans SURATRAM . . . . .	70
3.2.3.2	Les fourmis comme vecteur de dynamicité . . . . .	72
3.2.4	Le critère de terminaison comme clef de l'ACO dynamique . . . . .	73
3.2.4.1	Introduction . . . . .	73
3.2.4.2	ACO et tournée de véhicule statique . . . . .	74
3.2.4.3	ACO et tournée de véhicule dynamique . . . . .	74
3.3	L'influence de l'environnement comme vecteur de convergence pour l'ACO . . . . .	75
3.3.1	Introduction . . . . .	75
3.3.2	Critère de terminaison . . . . .	75
3.3.3	Repenser l'approche du critère de terminaison . . . . .	77
3.3.3.1	Une approche pragmatique . . . . .	77
3.3.3.2	Un raffinement de l'approche pragmatique . . . . .	78
3.3.3.3	Environnement comme base de connaissance . . . . .	79
3.3.3.4	Expérimentations et résultats . . . . .	80
3.3.4	L'influence de l'environnement sur le critère de terminaison . . . . .	83
3.3.4.1	Introduction . . . . .	83
3.3.4.2	Expérimentation et résultats . . . . .	84
3.4	Conclusion . . . . .	88

<b>4</b>	<b>De l'importance de l'optimisation multi-objectifs pour la planification de tournée dans le dimensionnement des batteries électriques</b>	<b>90</b>
4.1	Introduction . . . . .	90
4.2	Électrique VRP et vieillissement des batteries . . . . .	91
4.2.1	Vers des tournées via véhicule électrique . . . . .	91
4.2.1.1	Le problème du voyageur de commerce . . . . .	91
4.2.1.2	Le problème de tournée de véhicule . . . . .	92
4.2.1.3	Le problème de tournée via véhicule électrique . . . . .	93
4.2.2	Le phénomène de vieillissement des batteries . . . . .	103
4.2.2.1	Quel intérêt pour la batterie lithium dans le transport ? . . . . .	103
4.2.2.2	Les batteries de véhicules électriques et leur dégradation . . . . .	103
4.2.2.3	Quelles grandeurs physiques pour quantifier le vieillissement ? . . . . .	106
4.3	L'optimisation dans SURATRAM : le besoin identifié du vieillissement . . . . .	107
4.3.1	SURATRAM : Une application de tournée de véhicule . . . . .	107
4.3.2	Pour une tournée de véhicule électrique adaptée aux aléas du trafic . . . . .	108
4.3.3	Pour une bonne intégration du véhicule électrique . . . . .	109
4.4	Tournée de véhicule électrique et vieillissement : fondement du dimensionnement . . . . .	110
4.4.1	Introduction . . . . .	110
4.4.2	Quel environnement pour l'application d'optimisation ? . . . . .	111
4.4.2.1	Construction de l'environnement de test . . . . .	111
4.4.2.2	Modèle énergétique . . . . .	114
4.4.2.3	Batterie : état de santé et modèle de vieillissement . . . . .	115
4.4.2.4	Générateur de liste de marchandises à livrer . . . . .	116
4.4.3	Intégration du vieillissement dans le processus d'optimisation . . . . .	116
4.4.3.1	Introduction . . . . .	116
4.4.3.2	Optimisation multi-objectifs . . . . .	117
4.4.3.3	Description du problème . . . . .	118
4.4.3.4	Modélisation mathématique . . . . .	118
4.4.3.5	Méthode de résolution . . . . .	121
4.4.4	Optimisation : base du dimensionnement . . . . .	121
4.4.4.1	Quelle stratégie pour le DOD ? . . . . .	121

4.4.4.2	Dimensionnement de la capacité énergétique d'une batterie . . . . .	122
4.5	Résultats . . . . .	123
4.5.1	Ensemble de solution . . . . .	123
4.5.2	Batterie de véhicule électrique : Quel dimensionnement ? . . . . .	125
4.5.3	Le dimensionnement : Quel impact financier ? . . . . .	126
4.5.4	Discussion . . . . .	127
4.6	Conclusion . . . . .	128
<b>5</b>	<b>Simulateur de réalité mixte : vers la virtualisation des tests en conditions réelles</b>	<b>129</b>
5.1	Introduction . . . . .	129
5.2	Un Simulateur de Réalité Mixte pour SURATRAM . . . . .	130
5.2.1	Quel besoin pour SURATRAM ? . . . . .	130
5.2.2	Qu'est ce qu'un Simulateur de Réalité Mixte ? . . . . .	131
5.2.3	L'évolution des solutions de tests . . . . .	132
5.2.4	Quels intérêts pour de tels systèmes ? . . . . .	134
5.2.5	Les limites de tels simulateurs . . . . .	135
5.3	Solution de test de véhicule autonome en condition réelle et simulée . . . . .	135
5.3.1	Le véhicule de test . . . . .	136
5.3.2	La simulation Unity3D . . . . .	137
5.3.3	Système d'exploitation : ROS . . . . .	138
5.3.4	L'architecture de la solution . . . . .	139
5.4	Expérimentation et résultats . . . . .	140
5.4.1	Les délais internes à la solution de test . . . . .	140
5.4.1.1	Temps de transfert : depuis Unity3D à ROS . . . . .	140
5.4.1.2	Temps de transfert : depuis ROS vers Unity . . . . .	141
5.4.1.3	Les temps de traitements . . . . .	142
5.4.2	Quelle déviation du véhicule virtuel dans son environnement ? . . . . .	142
5.4.3	SLAM : Précision du positionnement dans l'environnement ? . . . . .	143
5.5	Discussions . . . . .	145
5.5.1	Concernant les temps de transfert . . . . .	145
5.5.2	À propos de la précision du SLAM . . . . .	146
5.5.3	Quelle déviation de positionnement pour le véhicule virtuel ? . . . . .	146
5.6	Conclusion . . . . .	147
<b>6</b>	<b>Conclusion Générale &amp; Perspectives</b>	<b>148</b>
6.1	Synthèse des travaux de recherche . . . . .	148
6.2	Perspectives . . . . .	152

# Remerciements

Cette thèse, qui fut mon marathon le plus dur, physiquement, mentalement et psychologiquement, est le fruit de trois ans de travail au sein du laboratoire CIAD de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Bien que la thèse soit un travail de solitaire, cette dernière n'aurait pas pu être concrétisée sans l'aide précieuse des personnes suivantes :

Avant toute chose, je tiens à remercier ma compagne, Szende Kisgyorgy, qui durant ces trois années de thèse a été mon point de repère de bonheur et de bien-être au quotidien.

Merci à mes parents de m'avoir soutenu dans ce choix, de mener une thèse et de m'avoir soutenu tout du long. Merci à ma famille. Merci à mes amis et à Rémy.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Monsieur Franck GECHTER, Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Merci pour son originalité et son ouverture d'esprit. Merci pour son partage de sa vision de la recherche, de ce qu'elle est et de ce qu'elle pourrait être. Merci de m'avoir introduit aux possibilités offertes par la physique dans le monde de l'informatique. Enfin, merci pour les moments partagés autour de la musique.

Je tiens à remercier mon co-directeur de thèse, Monsieur El-Hassane AGLZIM, Professeur des Universités de l'Université de Bourgogne à l'ISAT (Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports de Nevers). Merci pour sa gentillesse et sa bienveillance. Merci pour sa disponibilité et son implication malgré la distance.

Merci à Olivier Grunder, Maître de conférences HDR à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et responsable du projet SURATRAM pour son partage de connaissance et de compétence concernant la problématique de l'optimisation.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Vincent CHEVRIER, Professeur des Universités de l'Université de Lorraine, ainsi qu'à Monsieur Yacine OUZROUT, Professeur des Universités de l'Université de Lyon qui me font l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime également ma gratitude à Monsieur Sidi Mohammed Senouci, Professeur des Universités de l'Université de Bourgogne, à Monsieur Romual AUFRERE, Professeur des Universités de l'Université de Clermont Ferrant, à Monsieur Didier FASS, Professeur des Universités de l'Université de Lorraine, à Monsieur Reiner KRIESTEN, Professeur des Universités au Karlsruhe Institute of Technology en Allemagne, Madame Daniela CHRENKO Maître de conférences HDR à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard qui me font l'honneur d'accepter d'être examinateurs de cette thèse.

Je tiens particulièrement à remercier et à mettre en avant le CrunchLab de l'UTBM, représenté par Monsieur Olivier Lamotte, Chef de projet Innovation Crunch Time et Ingénieur de recherche. Merci à Pierre Laipe, Lucas Romamy, Frederick Zann qui constitue l'équipe d'ingénieurs du CrunchLab. Le CrunchLab est un atout précision pour une Université Technologique, mais également pour les laboratoires et plus particulièrement, leur doctorant. Grâce au CrunchLab, les doctorants bénéficient d'un tiers-lieux pour échanger autour de leur thématique de recherche, les confronter au public ainsi qu'à des professionnels. Mais plus encore, le CrunchLab permet d'intégrer la technique au coeur des thèses pour aider à développer les projets de recherche.

Merci à Romain Tabusse, Doctorant au sein du laboratoire Femto-ST. Merci pour le temps et le travail partagé sur le projet MOOVE. Merci pour sa transmission de connaissance et de compétence sur le domaine des batteries lithium. Compagnon de thèse, cette dernière ne serait pas ce qu'elle est, sans sa précieuse participation.

Merci à Pavani Prem Chand, stagiaire au sein du projet SURATRAM. Merci pour son implication et la qualité du travail réalisé sur le projet. Merci pour sa gentille et sa bienveillance quotidienne.

Merci à Florent Bogacz, étudiant de l'UTBM. Merci pour la création des modèles 3D qui ont servis lors de ce projet de thèse. Merci pour le partage de compétences et de connaissance sur les logiciels Unity3D et Unreal Engine.

Merci à Jacque Pereira, stagiaire au sein du projet SURATRAM qui doit maintenant être diplômé ingénieur informatique.

Merci à mes collègues, Serges Iovleff, Maître de conférences à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Merci à Fabrice Laury, Maître de conférences à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour les parties d'échecs entre deux compilations. Merci à Nicolas Gaud, Maître de conférences à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et directeur du pôle énergie et info de l'UTBM. Merci à Alexandre Ravey, Maître de conférences à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Merci à Denise Simon, secrétaire de la FISE INFO de l'UTBM. Merci à Damien Carrara ainsi qu'à Laurent Kolpinski membres de l'équipe technique de la FISE INFO de l'UTBM.

Un grand merci à la Régie des Transports du Territoire de Belfort pour leur confiance accordée au travers du partage de leurs données concernant leur flotte de véhicules.

Merci à Monsieur Brahim Lahal, ingénieur chez Faar Pronergy pour son partage de connaissance et de compétence concernant le véhicule KONA électrique robotisé par ses soins, pour le projet SURATRAM.

Merci à la Région Bourgogne Franche-Comté pour avoir assuré le financement de cette thèse. Merci à l'UTBM pour avoir financé ce projet au travers d'un poste d'ATER.

J'espère n'avoir oublié personne, mais si tel est le cas j'en suis désolé, mais je vous fais part de tous mes remerciements.

# Glossaire

- **Système Urbain et Rural Autonome de TRansport de Marchandises (SURA-TRAM)**
- **Electronic Route Guidance System (ERGS)**
- **Vehicle Information Communications System (VICS)**
- **Autonomous Land Vehicle (ALV)**
- **Systèmes Intelligents de Véhicule sur Route (SIVR)**
- **Intelligent Vehicle Highway System (IVHS)**
- **Intelligent Transport System (ITS)**
- **Joint Program Office (JPO)**
- **Quartier Général de la Promotion de la Société de l'Information et des Télécommunications Avancées (QGPSITA)**
- **Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety (PROMETHEUS)**
- **Cooperative Vehicle Infrastructure Systems (CVIS)**
- **Global positioning System (GPS)**
- **Dedicated-Short Range Communications (DSRC)**
- **Reconnaissance Automatique des Plaques d'Immatriculation (RAPI)**
- **Reconnaissance Optique des Caractères (ROC)**
- **Logistique Urbaine (LU)**
- **Technologies de l'Information et de la Communication (TICs)**
- **Régie des Transports du Territoire de Belfort (RTTB)**
- **Intelligence Artificielle (IA)**
- **Ant Colony Optimization (ACO)**
- **Ant System (AS)**
- **Transportation Salesman Problems (TSP)**
- **MAX -MIN Ant System (MMAS)**
- **Electrical VRP (EVRP)**
- **Vehicule Routing Problem (VRP)**
- **Capacited Vehicle Routing Problem (CVRP)**
- **Backhauls Vehicle Routing Problem (VRPB)**
- **Time Window Vehicle Routing Problem (TWVRP)**
- **Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem (PDVRP)**
- **Green Vehicle Routing Problem (GVRP)**
- **Véhicule à Carburant Alternatif (AFV)**
- **Véhicules Électriques à Batterie (VEB)**
- **Station de Recharge (CS)**
- **State of Charge (SOC)**
- **Problème Linéaire Entier Mixte (MILP)**

- Electric Time window Vehicle Routing Problem (ETWVRP)
- Gaz à Effet de Serre (GES)
- Problème du Plus Court Chemin Energetic (ESPP)
- TSP Electric (ETSP)
- Constrained Shortest Path Problem (CSPP)
- Vehicule Electric Hybride (VEH)
- Electric recharge Vehicle Routing Problem (ERVRP)
- Battery Swapping Station (BSS)
- Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)
- Mix Fleet Vehicle Routing Problem (FSMVRP)
- Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)
- Hétérogènes Hybrides avec des Fenêtres de Temps et des Stations de Recharge (HHCSVRP)
- Fix Client Vehicle Routing Problem (FCVRP)
- Constant Current (CC)
- Constant tension (CV)
- Routage des Emplacements (LRP)
- State of Charge (SoC)
- State of Health (SoH)
- Depth-Of-Discharge (DoD)
- Principe Fondamentale de la Dynamique (PFD)
- Electric Health Vehicule Routing Problem (EHVRP)
- Centre de Distribution Urbain (CDU)
- Electric Health Autonomous Capacited Load Vehicule Routing Problem (EHA-CLVRP)
- Vehicle in the Loop (ViL)
- Robotic Operating Software (ROS)
- Mixed Reality Simulator (MRS)
- Model Based Design (MBD)
- Model in the Loop (MiL)
- Software in the Loop (SiL)
- Hardware in the Loop (HiL)
- Réalité Augmentée (AR)
- Centrale Inertielle (IMU)
- Distance Ultrasonic (UDS)
- Proportionnel-Intégral-Différentiel (PID)
- Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)
- Filtre de Kalman Etendu (EKF)

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte général

#### 1.1.1 Les STI, leur domaine et leur évolution

*”Les domaines et groupes de services des systèmes de transport intelligents (STI) reflètent l’évolution des pratiques et applications de transport axées sur les Technologies de l’Information et de la Communication (TIC). Cette évolution revêt une importance et un intérêt croissant, car le champ d’application des STI s’étend au-delà de sa gamme initiale de services de gestion du trafic routier, d’information des voyageurs et de systèmes de paiement électronique. On s’attend maintenant à ce que les STI offrent également des services dans d’autres domaines du transport routier, comme le transport de marchandises” [133].*

Depuis les premiers travaux pour la prise en compte de la gestion du trafic par les USA [242] et le Japon [242] au début des années 70, les systèmes de transport intelligent (STI) n’ont cessé d’évoluer de par le développement des technologies, mais aussi grâce à la prise de conscience des possibilités offertes par les STI, dans l’amélioration et le développement du domaine du transport. Ainsi, ces systèmes Intelligents, comme Super entité agrégative et organisatrice pour le domaine du transport, ont évolué et se composent de 13 domaines d’activité, depuis 2015, comme définis par la norme ISO-14813 [133]. De plus, sur ces 13 domaines d’activité, il est possible d’identifier quatre grandes catégories d’activités telles que le service aux usagers, les services de secours, l’analyse de la donnée et l’optimisation, et enfin le trafic routier 1.1.



FIGURE 1.1 – Les catégories d’activités des STI

Les STI tendent également à sortir du cadre du transport routier, pour se généraliser à d’autres domaines du transport, tels que le transport maritime, le transport ferroviaire, le transport aérien et dans l’avenir, le transport spatial 1.2.



FIGURE 1.2 – Les quatre domaines du transport

Enfin, le transport, peu importe le moyen de déplacement mis en œuvre, s'intéresse à la mobilité des personnes, qu'il soit particulier ou professionnel, à la mobilité des masses via des moyens mutualisés et aux transports de marchandises. Que ce soit le transport public de masse ou encore la mobilité personnelle, tous deux ont été la cible d'investissements technologiques massifs (TGV, A380, Véhicule autonome) et de développements législatifs forts (fin des vols d'avion pour des courtes distances, les lois en faveur des travailleurs uber, les lois en faveur du covoiturage). Quant à lui, le domaine du transport de marchandises ne bénéficie pas du même intérêt dans son développement, ce dernier ne profitant qu'indirectement des avancées technologiques précédemment citées. Cependant, sur le plan législatif, il est la cible d'investissements forts pour le rationaliser et limiter son impact sur les centres urbains et péri-urbains.

### 1.1.2 Évolution du paradigme du Transport

Les STI sont nés du besoin de gestion du trafic et sont maintenant tous liés à la recherche de la réduction de la pollution sonore et atmosphérique (CO<sub>2</sub>, Nox, etc..) et à l'optimisation de l'impact du transport sur les espaces urbains et péri-urbains. Les STI traduisent le besoin de repenser le transport, tant dans son fonctionnement et ses méthodes, qu'au travers du paradigme par lequel il est analysé.

Les domaines du transport, qu'ils portent sur le transport de personnes (particuliers ou collectifs) ou qu'ils portent sur le transport de marchandises, ont longtemps été considérés comme deux domaines de recherche différents et n'étant que très faiblement connectés. Ainsi, chacun de ces domaines a développé indépendamment des outils, méthodes et réglementation dans l'objectif de répondre ponctuellement aux problèmes auxquels ils devaient faire face. On peut prendre pour exemple le domaine du transport de marchandises, dans lequel une multitude d'outils d'optimisation ont été développés pour déterminer les chemins les plus à même de garantir la livraison des marchandises, mais qui ne tenaient pas compte de la congestion occasionnée par l'encombrement des véhicules de livraison en zone urbaine. Plus récemment, un autre exemple peut être mis en avant concernant l'impact de la mobilité des particuliers sur la mobilité collective. L'arrivée des services de déplacement comme UBER coïncide avec le besoin de facilitation de la mobilité en zone urbaine, les déplacements personnels et collectifs surchargés, n'assurant plus leur fonction. Dans un premier temps, une diminution du nombre de véhicules en circulation a certes pu être observée, mais cette disponibilité du réseau a rapidement été comblée par la flotte de véhicules de service. De plus, une forte baisse de la fréquentation des transports publics a été constatée [36], ce qui, sur le long terme peut agir comme un frein au développement des transports en commun. Constatant les limites de la réponse ponctuelle dans le domaine du transport, les STI mettent en avant une vision systémique, dans laquelle le plus d'éléments possibles (qu'ils soient en interaction directe ou indirecte) doivent être pris en compte dans l'optimisation d'un domaine donné.

### 1.1.3 Pour une catégorisation des STI

De par la vision systémique du transport, induit par les systèmes de transport intelligents (STI) et des différents domaines gravitant autour, divers projets de recherche ont vu le jour. Les premiers projets mis en place se sont intéressés à la mobilité, au travers des transports publics.

On retrouve ainsi les projets CRISTAL [166] et CATS [80], qui s'intéressent à combler le vide entre les transports publics collectif et le personnel de masse. Pour cela, ces deux projets reposent sur deux principes de fonctionnement simple. Le premier principe consiste en une utilisation en libre-service, louable durant une faible durée, de petits véhicules urbains qui répondent à la problématique du transport à la demande. Le second principe se concentre lui sur la mise en place de service de navette flexible, dans lequel un convoi de véhicules de longueur variable, conduit par un chauffeur professionnel, circule sur une ligne de bus traditionnelle de manière permanente ou au cas par cas. Le caractère STI de ce projet réside dans le fait de considérer le transport de personnes comme composé de la mobilité personnelle et de la mobilité de masse. Ainsi, ce n'est plus aux utilisateurs de s'adapter aux contraintes du système de transport, le rendant plus compétitif face aux véhicules personnels, étant disponible, moins cher et plus durable.

On retrouve ensuite le projet SURATRAM (Système Urbain et Rural Autonome de TRANsport de Marchandises) [104]. Ce projet, développé tout au long de cette thèse, a pour objectif de repenser le transport de marchandises en centre urbain et péri-urbain en intégrant les flux de livraison de marchandises et d'enlèvement de marchandises dans une même application. Pour cela, le projet SURATRAM propose un système basé sur l'utilisation de véhicule électrique et autonome pouvant se déplacer en suivant les bus sur le réseau du système de transport public. Pour être pleinement fonctionnel, il devra répondre à des problématiques liées à la sociologie, aux affaires, à la logistique, à la technique et à l'interaction homme-machine. Le caractère STI de ce projet réside dans le fait que le système proposé soit un agrégateur de flux pour la livraison et l'enlèvement de marchandises. Le modèle d'enlèvement étant supervisé par un moteur de prise de décision pour permettre de dérouter, ou non, un véhicule lors de sa tournée pour récupérer des marchandises. De plus, ce système doit être capable de s'adapter et de se reconfigurer en fonction de la charge sur le réseau, que cela soit en termes de nombre de véhicules déployés, ou que cela soit lié aux chemins empruntés afin d'éviter la congestion du trafic.

Nous l'avons vu, les STI ont une place centrale dans le développement et le fonctionnement de chacun de ces projets. Cependant, les STI sont caractérisés par le nombre de domaines interagissant directement ou indirectement avec l'application cible, ainsi que leur intégration dans ladite application. Or, que ce soit le projet CRISTAL [166] ou le projet SURATRAM [104] tous deux omettent la prise en compte du domaine du transport optimisé par l'autre. Le projet CRISTAL se propose d'optimiser le transport de personnes, mais ne considère pas le transport de marchandises. Le projet SURATRAM quant à lui se propose d'optimiser le transport de marchandises en zone urbaine en utilisant le réseau de transport public, mais ne considère pas le transport individuel de personne. Ainsi, tous deux peuvent être considérés comme STI faible, omettant volontairement une partie du Transport. Ces projets projet de recherche sont à considérer comme prémisse à l'apparition des STI fort, intégrant tous les aspects du Transport pour l'optimisation d'un domaine, comme le montre la figure 1.3.

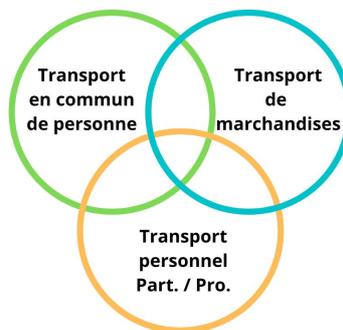


FIGURE 1.3 – Les STI forts

## 1.2 Le projet de recherche SURATRAM

Cette thèse s'intéresse au développement du projet SURATRAM. Le Projet de recherche SURATRAM (Système Urbain et Rural Autonome de TRANsport de Marchandises) [104] s'inscrit dans le développement d'un nouveau système intelligent de transport et de livraison de marchandises en centre urbain. Il s'inscrit dans la feuille de route des objectifs de recherches, concernant le développement des véhicules électriques et autonomes. Plus particulièrement, il s'insère dans la thématique du transport de marchandises dans les couloirs de bus, nécessitant la mise en place d'une autonomisation de niveau 5 (SAE). Ce projet cherche à lever une partie des verrous d'une telle solution et d'envisager à terme le développement de solutions de transition vers le tout autonome. De plus, le développement de ce nouveau genre de système de livraison de marchandises en centre urbain répond à des problématiques actuelles telles que la pollution (sonore et atmosphérique) ou encore l'amélioration des conditions de vie en centre urbain, qui passent par l'atténuation de la congestion ou encore la place accordée à nos marchandises et à leur mobilité.

Ce nouveau système de transport de marchandises se base sur le déploiement d'une flotte de véhicules électriques et autonomes, se déplaçant exclusivement sur le réseau routier, déjà existant, du système de transport public urbain. L'exploitation de ce réseau peu fréquenté doit permettre l'acheminement des marchandises depuis un ou plusieurs centres de distribution urbains (CDU) en périphérie, à destination d'un ensemble de points de livraison, représentés par les arrêts de bus.

L'intégration de la logistique urbaine est primordiale pour garantir le bon déploiement de ce nouveau type de système de livraison, la livraison en zone urbaine étant un domaine de plus en plus réglementé. Pour cela, le système de livraison se base sur l'implémentation d'un ou plusieurs centres de distribution urbains (CDU) en périphérie de la ville. En mettant en place un nouvel acteur indépendant gérant ces entités, on transfère la complexité d'adaptation (financière, matérielle et organisationnelle) aux conditions de livraison des transporteurs vers le CDU, qui a été mis en place en collaboration avec les pouvoirs publics locaux pour garantir le respect des méthodes de livraison. De plus, utilisant le système de transport public de la ville pour effectuer les livraisons, via des véhicules autonomes et électriques, il assure la mise à disposition de ces véhicules capables de suivre un bus, seul ou en convoi, de s'accrocher virtuellement et se décrocher virtuellement pour se stationner de manière autonome sur un arrêt de bus pour assurer la livraison.

Le déplacement autonome des véhicules de transport de marchandises sera conditionné par l'interaction avec les acteurs du transport public urbain, tel que les bus, les trams, les taxis ou encore les navettes de transport léger avec lesquels ils devront pouvoir s'accrocher, se positionner derrière en convoi et se décrocher au moyen d'un système d'encrage purement logiciel. De plus, les interactions ne se limiteront pas aux véhicules, ils devront également être capables d'identifier les usagers de ces services, comme les piétons qui gravitent autour des bus lors de chaque arrêt ou encore les vélos se déplaçant dans le couloir des bus, pour ne pas créer d'accidents. Enfin, une fois le véhicule arrivé à proximité d'un arrêt de bus identifié comme point de livraison, il devra se décrocher pour se stationner de manière autonome sur un emplacement dédié.

Cependant, avant de stationner, le système devra prévenir le client de son arrivée pour que celui-ci vienne récupérer ses marchandises. De plus, afin de réduire l'arrêt du véhicule au strict nécessaire, ce dernier devra communiquer, en avance, au client, un temps donné lui permettant de se déplacer de chez lui jusqu'au point de livraison. Une fois sur place, le système devra pouvoir identifier le client pour lui donner accès au box où sont rangées ses marchandises. La livraison effectuée, il devra se raccrocher au prochain bus passant à proximité de l'arrêt pour finir sa tournée et rentrer au dépôt. Enfin, dans l'éventualité de marchandises non délivrées lors d'une tournée, celui-ci pourra tenter une nouvelle livraison pour ne pas impacter la prochaine tournée, le jour suivant.

Pour finir, l'utilisation de véhicule électrique dans ce système a certes pour objectif de supprimer les pollutions atmosphériques et d'améliorer le cadre de vie urbain, cependant, il vise aussi à proposer une bonne utilisation du véhicule électrique dans ce domaine. Une utilisation adéquate de la technologie des véhicules électriques doit intégrer une étude préalable pour leur utilisation et leur recharge, dans l'objectif de minimiser leurs impacts sur le vieillissement de la batterie. Le

facteur de vieillissement définit la durée de vie de la batterie, qui pour un professionnel du transport représente le nombre d'années durant lesquelles il va pouvoir amortir son achat et exploiter le véhicule de tournée. De plus, la durée de vie de la batterie est un élément central dans l'offre du transporteur, lui permettant d'être plus ou moins compétitif que ses concurrents.

## 1.3 Les verrous du projet SURATRAM

Un système de transport intelligent de marchandises en centre urbain, comme celui introduit en partie 1.2, nécessite un champ d'expertise vaste, qui ne se limite pas au développement des différentes briques technologiques nécessaires au projet. Ainsi, il est nécessaire de considérer le projet selon son aspect social, économique, législatif et de chercher à identifier les freins que ceux-ci peuvent opposer au développement du projet et comment les résoudre. Suite à cela, il est nécessaire d'identifier les briques technologiques indispensables, cependant, comme introduit dans la partie 1.3.1, il est primordial de déterminer la manière dont ces briques vont pouvoir répondre aux contraintes sociales, économiques et législatives. Considérer ce projet comme simple réponse aux problèmes identifiés serait un frein majeur quant à sa généralisation. Enfin, il convient d'identifier l'impact écologique de la solution dans son ensemble.

### 1.3.1 Les verrous sociaux

D'un point de vue social, le déploiement de ce nouveau système intelligent de transport de marchandises va faire face à plusieurs freins quant à son adoption. Dans un premier temps, le principal frein à lever relève du dualisme de la relation des habitants des zones urbaines avec les flux de marchandises. Ainsi, en tant que consommateurs, ils sont générateurs de flux de marchandises à destination des centres urbains, les plateformes de vente en ligne leur permettant de gagner en confort de vie et en pouvoir d'achat. Cependant, en tant qu'habitants et utilisateurs quotidiens du système de transport urbain et de son réseau routier, ils ne veulent pas être confrontés aux conséquences de la mobilité du flux de marchandises comme la congestion du trafic ou encore la pollution générée (sonore et atmosphérique). Ce dualisme pose une des contraintes majeures dans la conception d'un système de transport de marchandises en zone urbaine, à même de s'y adapter.

Ce nouveau système intelligent de transport de marchandises fait également face aux problèmes d'acceptation et d'acceptabilité. Le concept de solutionnisme technologique questionne ce projet de recherche, en cherchant à identifier les usagers et à déterminer leurs besoins face au transport de marchandises en zone urbaine et la manière dont le projet leur offre une réponse technologique. De plus, outre la réponse technologique, il convient de se demander si les besoins identifiés ne peuvent être solutionnés autrement. Le concept d'acceptabilité quant à lui, questionne sur le devenir d'une technologie au sein de la société, sur la manière de la faire accepter et ouvre la voie de la démocratie technique pour l'adaptation de cette dernière aux besoins de la société, qu'ils soient écologiques, législatifs ou économiques.

### 1.3.2 Les verrous économiques

Le cadre économique est également une contrainte forte pour la mise en place de ce nouveau système intelligent de transport de marchandises. Nous l'avons vu, la pérennité d'un CDU passe par une indépendance totale des aspects gestionnaires et économiques, face aux pouvoirs publics locaux et aux acteurs privés gravitant autour de la zone urbaine. Le CDU est donc un intermédiaire public privé, mis en place par ces derniers pour répondre à leurs besoins mutuels. Cependant, cette indépendance implique le besoin de viabilité économique et donc la capacité de la structure à pouvoir s'imposer pour capter l'ensemble des flux de marchandises entrant ou sortant de la zone. Ce qui à son tour pose la question de la mise en place d'un monopole économique, sans libre entrée de concurrent(s) sur le marché. De plus, concernant les concurrents, bien que mis en place par des acteurs privés du transport, ils ne peuvent pas tous être représentés. Ainsi, quant à la captation obligatoire des flux, il est nécessaire de se demander si le CDU peut proposer les mêmes services que le transporteur privé, comme par exemple, s'insérer dans la livraison en 24h des produits Amazon, pour pouvoir prétendre au titre de fournisseur de service. Néanmoins, se pose le problème de l'ouverture des avantages concurrentiels (structures, méthodologie, etc.) d'un client à ses concurrents.

Enfin, du point de vue des acteurs publics locaux, l'aide à la mise en place d'un CDU et à sa viabilité revêt un fort intérêt stratégique, permettant de développer une image de marque, pour attirer l'implantation de nouvelles entreprises et de nouveaux habitants, dans l'objectif d'insuffler un développement économique local fort.

### 1.3.3 Les verrous législatifs

Le cadre législatif est particulier, car il relève d'un dualisme fort vis-à-vis du transport, opposant la qualité de vie au sein des villes à la viabilité économique du transport local. Dans la situation actuelle, les villes disposent d'un arsenal législatif très large pour réglementer le transport de marchandises en zone urbaine, dans l'objectif de solutionner les problèmes de congestion, pollution, etc. Cependant, cette réglementation du transport de marchandises en zone urbaine n'est pas normée, impliquant une mise en place dont l'appréciation est relative à chaque ville, imposant aux acteurs du transport local de s'adapter au cadre légal de chacune.

### 1.3.4 Les verrous technologiques

Outre le vaste domaine de compétence nécessaire au projet, son plan technologique est un système complexe regroupant les domaines de la logistique urbaine, de l'optimisation, du véhicule électrique et du véhicule autonome. De plus, ce système doit permettre l'interconnexion de l'ensemble de ces domaines pour la remontée d'information, afin qu'elles puissent être analysées et partagées au sein du système et ainsi garantir son fonctionnement.

Il est nécessaire de s'appuyer sur le domaine de la logistique urbaine pour définir l'architecture sur laquelle le système va fonctionner, ainsi que d'utiliser les techniques et méthodes développées par des chercheurs et des industriels du domaine. On retrouve ensuite la partie optimisation qui va permettre de déterminer le chemin optimal pour chaque tournée et ainsi permettre de livrer l'ensemble des marchandises en transit. La contrainte supplémentaire va être également de pouvoir intégrer un système d'optimisation temps réel pour la livraison et l'enlèvement de marchandises afin de s'adapter au trafic et de récupérer les colis disponibles pour profiter pleinement du volume disponible dans le véhicule.

L'aspect autonome des véhicules permettra certes le déplacement en convoi derrière les bus sur leur voie de circulation, mais il représente également l'interface du système de transport intelligent pour ré-router un véhicule de son chemin pour éviter de subir le trafic ou encore de récupérer un colis à ramener au dépôt. Enfin, l'aspect électrique a pour objectif d'améliorer le confort de vie en milieu urbain en supprimant la pollution sonore et atmosphérique, mais il intègre lui aussi le système de transport intelligent pour une gestion optimale de l'énergie. Cette brique est une des composantes majeures du système pour la prise de décision quant au re-routage des véhicules, permettant de déterminer si son impact sur les véhicules est tolérable ou non.

### 1.3.5 Les verrous écologiques

Du point de vue écologique, se pose la question de l'évaluation de la viabilité du système dans son ensemble. Le projet se base certes sur l'utilisation de véhicules électriques pour le déplacement, mais le coût de production de cette énergie électrique doit être pris en compte, ainsi que celui de ses batteries et leur durée de vie. De même, le véhicule autonome questionne de par l'énorme besoin en énergie, actuellement nécessaire, pour garantir ses tâches d'autonomisation. Enfin, le réseau de transport urbain étant fini, il n'est pas possible d'envisager le déploiement d'une flotte de véhicules toujours plus grande. Il sera nécessaire d'étudier le seuil de criticité pour définir la charge maximale que le réseau pourra supporter. Toute cette démarche mène à la mise en place d'une analyse du cycle de vie de ce nouveau système intelligent de transport de marchandises en zone urbaine pour évaluer son impact environnemental.

Durant cette thèse, tous les différents types de verrous précédemment cités ne seront pas développés. Seuls les verrous technologiques et une partie des verrous écologiques feront l'objet de notre étude.

## 1.4 Plan de Thèse

### 1.4.1 Chapitre 2 : Système de Transport Intelligent

Le chapitre 2 se concentre sur l'étude du domaine des Systèmes de Transport Intelligent (STI). La première section de ce chapitre est dédiée à l'histoire des STI et leur implantation d'un point de vue national, européen et international. Ce sont ces différences qui ont conduit à l'établissement d'une norme internationale permettant de définir un ensemble de techniques, technologies et méthodes pour le déploiement des STI. La deuxième section quant à elle est dédiée à l'étude de l'intégration des STI au sein du projet SURATRAM. Enfin, sont définis dans la section 3, l'ensemble des verrous scientifiques qui devront être levés pour concrétiser le projet SURATRAM.

### 1.4.2 Chapitre 3 : Optimisation de tournée de marchandises

Le chapitre 3 est dédié à l'algorithme de colonie de fourmis (ACO). L'objectif, ici, est de chercher à déterminer la manière selon laquelle un algorithme d'ACO peut être rendu dynamique. Par dynamique, on entend capable de déterminer ou prédire le nombre d'itérations qui devront être réalisées par l'algorithme d'ACO pour optimiser un problème donné. Pour cela, la première section de ce chapitre est dédiée à l'étude de l'algorithme de colonie de fourmis au travers de sa place dans les systèmes multi-agents ainsi qu'à une étude épistémologique du domaine de l'ACO. Ensuite, un travail de recherche est effectué pour déterminer quels besoins peuvent être identifiés, comme incitant à doter un algorithme d'ACO d'un critère de dynamique. Ainsi, ayant pu mettre en lumière le besoin de dynamique du projet SURATRAM, la deuxième section de ce chapitre est dédiée à notre contribution, identifiant le point clef de l'ACO permettant de rendre l'algorithme convergent, considérant l'environnement comme vecteur de convergence.

### 1.4.3 Chapitre 4 : Prise en compte de la dimension énergétique

Le chapitre 4 est dédié à l'optimisation de tournée de marchandises via véhicule électrique et à son rôle dans le dimensionnement des batteries. Pour répondre à ces questions, la première section est dédiée à la réalisation d'un état de l'art concernant le domaine de l'optimisation, ainsi qu'à celui des batteries électriques au lithium et à leur phénomène de dégradation interne. La deuxième est ensuite dédiée à l'intégration des véhicules électrique et de leur caractéristique intrinsèque, dans le processus d'optimisation de tournée, ainsi qu'à l'étude d'une méthode de dimensionnement de batterie pour des applications de livraison de dernier kilomètre. La dernière section de ce chapitre concerne la contribution apportée par cette thèse dans les domaines précédemment cités, dans laquelle une nouvelle variante d'EVRP est proposé ainsi qu'une nouvelle méthode de dimensionnement permettant de pallier aux problèmes de vieillissement des batteries de véhicule électrique.

### 1.4.4 Chapitre 5 : Simulateur de Réalité Mixte

Le chapitre 5 se concentre sur l'étude et le développement d'une solution de test dédiée à la validation et à la certification du comportement de véhicule autonome pour des applications de livraison de marchandises en centre urbain. Dans ce contexte, la première section est un état de l'art du domaine des simulateurs de réalité mixte et de leur évolution au cours du temps, de par la technique et leur dénomination.

La contribution de cette thèse au domaine des solutions de test, consiste à développer un nouveau simulateur de réalité mixte ayant pour objectif de valider et certifier des algorithmes de conduite en convoi avec des bus de transport public et de partage de la chaussée avec des piétons et des cyclistes. Pour cela, la troisième section est dédiée à la présentation de la solution technique proposée et à son architecture. La quatrième section quant à elle s'intéresse aux expérimentations mises en place pour tester notre simulateur et aux résultats obtenus.

## Chapitre 2

# Système de Transport Intelligent de marchandises : de l'expression des besoins vers les verrous scientifiques

### 2.1 État de l'art des Systèmes de Transport Intelligent

Le concept de systèmes de transport intelligent (STI ou ITS en anglais) est né du besoin des états d'être capables de gérer efficacement et de manière sûre, leur infrastructure routière. Pour cela, informations, communications et technologies sont associées pour interagir de concert et faciliter la gestion de l'infrastructure routière et de ses flux (humains et véhicules).

La création de ce système complexe pluri-dimensionnel répond au besoin d'agrégation d'informations, afin de fournir une meilleure compréhension systémique du transport. Il permet de mettre à disposition de l'utilisateur une synthèse concise et pertinente pour faciliter sa prise de décision et bénéficier d'une utilisation sûre et optimale du système de transport. Ce système complexe, en intégrant les informations et les communications au travers des technologies de l'information modernes, a pour but de manager un système de transport de grande taille, en temps réel, de manière précise et efficace.

L'association "Atec ITS France", qui a pour but de "*favoriser les échanges et les expériences entre les professionnels de la mobilité*" qu'ils soient des entreprises, des institutions ou des acteurs de la recherche, propose la définition suivante des ITS : "*Les STI sont nés du mariage des technologies de l'information et de la communication avec les véhicules et réseaux qui assurent la mobilité des personnes et des biens*". [94]

#### 2.1.1 Des systèmes de transport aux systèmes de transport intelligent

##### 2.1.1.1 Histoire des STI

Pour décrire les avancées au cours de l'histoire qui ont permis le développement des systèmes de transport intelligent (ITS) actuels, nous allons appuyer notre synthèse sur deux articles complémentaires proposant une rétrospective du sujet : [117] et [242].

Si le 19ème siècle vit l'apparition de la mobilité collective grâce à l'innovation de rupture que fut le train à vapeur (1820), le 20ème siècle, lui, a vu se démocratiser et se développer massivement la mobilité individuelle. Cependant, pour s'adapter à son rapide développement, les centres urbains alors dimensionnés pour les déplacements à cheval et à pied doivent adapter leur infrastructure routière existante. Les rues s'élargissent, on multiplie le nombre d'espaces de stationnement, la ville s'étale.

Suivant cette dynamique, le besoin de gestion du trafic est parallèlement devenu primordial pour les territoires. Les premiers outils de gestion du transport furent les feux tricolores mis en place à partir de 1914 aux États-Unis et 1923 en France. On retrouve également les premiers

parcmètres utilisés à partir de 1935. Ainsi, la gestion des transports se concentre dans un premier temps sur la superposition d'innovations centrées sur les infrastructures routières. Post seconde guerre mondiale, la mobilité individuelle, synonyme de liberté, est ainsi devenue centrale dans la société. La voiture, plus souple, plus rapide, devient alors le premier mode de transport pour les déplacements au quotidien [70]. Conséquence directe de cette massification du transport, les états ont besoin de mettre en place la captation d'informations et leurs remontées concernant l'état du trafic, le guidage routier et lancent parallèlement les premiers travaux sur la conduite automatisée.

C'est entre les années 60 et 70 que l'on retrouve les premières traces de système complexe de remontée d'informations et de gestion des infrastructures routières. Les USA développant le concept de "Electronic Route Guidance System (ERGS)" [242] et le Japon, celui de "Vehicle Information Communications System" (VICS) [242]. C'est dans cette logique que sont lancés, au tout début des années 70, les premiers programmes de guidage autoroutier, avec notamment la mise en place des premiers capteurs de vitesse, de débit autoroutier et d'occupation des surfaces routières. Par la suite, seront généralisés les premiers signaux de trafic (Dynamic Message Signs) et les premières cartes numériques d'application de localisation avec l'arrivée du Global Positioning System (GPS), commercialisé fin des années 70. Enfin, c'est au travers des centres de gestion du trafic (CGT) (ou Traffic Management Centers, TMC, en anglais) que l'ensemble des données de l'infrastructure routière sont agrégées et couplées aux données météorologiques. Une fois ces données traitées et analysées, les informations pertinentes sont redistribuées aux voyageurs par le biais de médias spécialisés, dans un souci de rétro-actions sur la gestion du système. C'est de par la vision intégrative des informations au sein des CGT que se développe le concept de "Système de transport" (ou transport systems en anglais). Parallèlement au développement des outils de gestion de l'infrastructure routière, le secteur de l'automobile suit la même logique de développement et d'innovation. De part le développement grandissant de la mobilité, l'automobile devient un secteur économique très attractif, permettant le financement de nombreux programmes de recherche qu'ils soient publics, privés ou mixtes. On retrouve ainsi des programmes fortement innovants dédiés à l'automatisation et l'autonomisation des véhicules. En 1977, le laboratoire de robotique Tsukuba lançait une voiture automatique capable de suivre un marquage sur la chaussée à près de 30 km/h. Puis, les États-Unis menèrent avec la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) leurs premiers travaux sur l'"Autonomous Land Vehicle" (ALV). En 1985, leur premier prototype permettait de rouler à environ 3 km/h sur une route en ligne droite d'environ 1 km. Les années 80 verront également se développer l'idée de systèmes intelligents de véhicule sur route (SIVR) ou "Intelligent Vehicle Highway System" (IVHS). L'objectif étant de pouvoir connecter le véhicule à son infrastructure.

C'est en 1994 que s'est tenu le premier congrès mondial sur les systèmes de transport. Nommé comme "Le premier Congrès mondial sur la télématique avancée des transports et les systèmes intelligents véhicules-autoroutes", il visait à explorer et à organiser les futurs thèmes de recherche "Vers un système de transport routier intelligent". C'est suite à ce congrès que la notion de "système intelligent de transport" (STI) ou "Intelligent transport system" (ITS) est apparue. Ainsi, le deuxième congrès qui s'est tenu à Yokohama en 1995, fut officiellement rebaptisé "The World Congress on Intelligent Transport Systems". Le passage de l'IVHS à celui d'ITS reflète la prise de conscience du besoin d'une vision systémique, considérant l'ensemble des domaines du transport comme un seul système complexe interdépendant. Ces domaines sont répartis selon quatre axes : les véhicules, les infrastructures, le système de management et le conducteur. Ils doivent permettre de répondre aux problèmes de société actuelle, au travers des enjeux économiques (réduction de la consommation des véhicules), écologiques (baisse des émissions de GES), sociétaux (inter-dépendance aux véhicules et à leur impact sur le trafic et sa gestion).

Ainsi, depuis les années 2000, les ITS se sont généralisés parallèlement au développement du numérique et de ces acteurs historiques et nouveaux dans divers segments de l'économie. Les transformations se sont focalisées sur l'amélioration et l'utilisation pour tous des systèmes d'assistance, d'automatisation et d'autonomisation de la conduite. Dans le même temps, les nouveaux acteurs ont convergé sur la gestion du transport. Pour finir, il est important de prendre en compte que les ITS ne se limitent pas qu'au domaine du transport routier, bien qu'il soit le plus développé actuellement. Les moyens de transport basés sur les chemins de fer, le maritime, les airs, ou encore le spatial dans un avenir proche, ont vocation à être gérés au moyen de systèmes de transport intelligent.

### 2.1.1.2 Les différences internationales

Comme introduit précédemment, les Systèmes de transport intelligent STI sont nés du besoin des États d'être capables de gérer efficacement et de manière sûre, leur infrastructure routière. Pour cela, ils utilisaient la détection, l'information et la communication, ainsi que le traitement des signaux et de l'information pour parvenir à une plus grande sophistication du trafic et des transports.

Trois continents sont à l'origine des STI. L'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie au travers du Japon. Cependant, bien que les STI abordent la problématique commune de la gestion de l'infrastructure routière, ils doivent être adaptés localement pour y répondre. Étant donné que les causes du problème de gestion de l'infrastructure et les solutions mises en place sont conditionnés par la culture locale et les politiques de développement du pays, il en résulte une appropriation propre à chacun des STI menant à une vision différente de ces enjeux [242].

#### Les USA

Les États-Unis d'Amérique ont initié leur recherche sur les Systèmes de transport en 1970 avec le projet "Electronic Route Guidance System" (ERGS). Ensuite, en 1991, le Congrès des États-Unis adopte de nouveaux programmes intégrés d'efficacité des transports de surface (ISTEA). Les programmes ISTEA viennent ensuite à évoluer avec la loi TEA-21 pour "Transportation Equity Act for the 21st Century", qui est formulée en 1997. Le passage à la loi TEA-21 fut une rupture dans le développement des technologies pour les STI, de par l'ampleur donnée au projet et des investissements économiques réalisés.

Dans la continuité de la loi TEA-21 et des efforts pour améliorer la sécurité et l'efficacité du système de transport routier des USA, le département du transport (DOTs) étatique et fédéral [194] a coopéré avec les constructeurs automobiles pour développer et concrétiser l'idée de véhicule automobile intégré à l'infrastructure routière ou Vehicle Infrastructure Integration (VII). Évolution logique des STI, ce projet est le fruit de l'évaluation de la faisabilité technique, économique et politique d'un système interconnecté, basé sur un système de communication sans fil. Le projet (VII) fournit une interface de communication entre les véhicules se déplaçant et l'infrastructure, via un équipement spécialisé embarqué ou On-Board Equipment (OBE), mais également entre l'infrastructure routière et les véhicules, via des équipements permettant de couvrir l'ensemble de l'infrastructure ou Roadside Equipment (RSE). Ainsi, on observe que des thématiques modernes telles que le Vehicle-to-X (VTX) ou le Infrastructure-to-X (ITX) sont en plein essor dans le secteur privé, notamment dans le domaine du véhicule autonome, mais que celles-ci sont issues de la recherche sur les Systèmes de Transport Intelligent.

C'est le département du transport ou United State department of transport (usDOT), qui définit la stratégie du plan de recherche et développement futur dans le domaine des STI. En 2020, le US.DOT a dévoilé son plan stratégique [195] pour la période 2020 – 2025. Ce plan d'action donne le cadre dans lequel les STI doivent évoluer et comment ils peuvent s'intégrer dans la société américaine.

En se basant sur ce rapport, la vision des Systèmes de Transport Intelligent (STI) aux USA est définie comme suivant *"La vision du Intelligent Transport System (ITS) Joint Program Office (JPO) est d'accélérer l'utilisation des ITS pour transformer la façon dont la société se déplace. L'objectif du ITS JPO est de stimuler le développement et l'utilisation des ITS pour déplacer les personnes et les marchandises de manière plus sûre et plus efficace. Le projet envisage un avenir dans lequel les citoyens et les communautés peuvent bénéficier de services de transport sûrs et intégrés de manière transparente. Cet écosystème de transport interconnecté sans fil doit pouvoir s'adapter aux besoins des utilisateurs, à la demande et en temps réel. Le ITS JPO a pour objectif de contribuer à la construction d'un écosystème qui offre des boucles de rétroaction intelligentes permettant d'améliorer continuellement le système. Les progrès technologiques dans le développement du matériel et des logiciels, la marche rapide vers l'Internet des objets et les sauts évolutifs dans la connectivité des dispositifs, des réseaux et des services offrent de nouvelles opportunités pour moderniser les transports. La fusion des systèmes numériques et physiques et l'explosion du volume et des types de données et de renseignements provenant des utilisateurs, des réseaux et des appareils ont créé des opportunités et des risques. Les modes de gestion des institutions et de la technologie ne peuvent souvent pas s'adapter au rythme de l'évolution technologique. L'innovation exige de reconnaître l'impact des perturbations et de renforcer la capacité à s'adapter rapidement à des paradigmes en constante évolution. Fort de son succès dans la recherche et la mise en œuvre des*

politiques et technologies ITS, le ITS JPO dispose d'un point de vue particulier pour encourager les efforts d'adaptation des technologies émergentes et futures afin d'améliorer les transports" [194].

Pour développer sa vision, présentée ci-dessus, le ITS JPO mène des activités de collaboration et d'innovation, de recherche et de développement pour la mise en œuvre de systèmes de transport intelligents afin d'améliorer la sécurité et la mobilité des personnes et des biens.

*"L'amélioration de la sécurité et de la mobilité pour tous les usagers des transports signifie que l'ITS JPO s'engage dans un ensemble rigoureux et complet de processus pour adapter et traduire les technologies et les progrès des STI en applications productives pour l'ensemble du système de transport. Ces activités comprennent :"* [194].

- L'établissement de partenariats entre les administrations modales afin de démontrer et d'évaluer l'efficacité des STI de la prochaine génération en conditions réelles.
- Diriger les efforts transversaux au sein du ministère américain des transports qui encouragent l'utilisation de STI innovants.
- Étudier des méthodes pour protéger et défendre les mises en œuvre des STI et les infrastructures de transport contre les risques probables.
- Travailler avec les secteurs industriels pour aider à identifier, évaluer et développer des technologies et des approches prospectives pour l'utilisation des transports.
- Investir dans les technologies émergentes et en assurer l'incubation en vue de leur développement ultérieur.
- Faciliter l'adoption des STI dans l'ensemble du pays par le transfert de technologie à l'industrie et par la formation et l'élaboration de lignes directrices pour les personnes qui les déploient.

*"Le programme ITS est neutre sur le plan technologique. Les technologies ITS spécifiques sont évaluées en fonction de leur capacité à résoudre efficacement les problèmes de transport du monde réel. Le ITS JPO évalue continuellement la faisabilité, la maturité et les avantages des ITS et guide les solutions de transport, de leur conception à leur mise en œuvre. De 2020 à 2025, le JPO ITS capitalisera sur les investissements passés dans des domaines de recherche clés tels que l'automatisation, la connectivité, l'accès et les échanges de données, et continuera à accroître ces efforts en se concentrant sur les nouvelles technologies émergentes prometteuses."* [194].

*"Le ITS JPO se concentre sur l'ITS en tant que système. Ce système comprend tous les composants de l'infrastructure de transport, les véhicules, les back-offices, les services et les autres outils et mécanismes qui servent tous les utilisateurs des transports, y compris les communautés et les groupes mal desservis, les fournisseurs d'équipements et d'applications technologiques du secteur privé, ainsi que les opérateurs et les responsables de la mise en œuvre des ITS (par exemple, les gouvernements des États, les gouvernements locaux et les gouvernements tribaux). L'engagement avec divers représentants d'agences, du public et de l'industrie garantit que le JPO ITS ne limite pas ses efforts à des technologies spécifiques, mais aligne plutôt son travail sur les objectifs plus larges d'amélioration de la mobilité et de la sécurité pour tous les utilisateurs."* [194].

*"La responsabilité la plus importante du ITS JPO est sans doute son rôle dans la facilitation de la collaboration et de la coordination entre de nombreux groupes disparates des secteurs publics et privés dans le domaine de la technologie et des transports afin d'améliorer nos systèmes de transport. La technologie est de plus en plus intégrée dans tous les secteurs de l'industrie ; la connectivité entre tous les modes de transport augmente. Le JPO ITS s'efforce d'examiner le système dans son ensemble pour apporter des innovations qui amélioreront les transports"*. [194].

Pour conclure sur le modèle américain et plus particulièrement selon la vision des Systèmes de Transport Intelligent proposés par le DOT et les missions identifiées, bien que les STI répondent initialement à un besoin de gestion des infrastructures routières, ce paradigme a évolué au fur et à mesure de l'avancement de la recherche pour arriver à la mise en place d'un système complexe d'interconnexion multi-modale automatisé pour la gestion des flux de transport, étant capable de s'adapter pour répondre localement aux besoins des utilisateurs.

## Le Japon

Le Japon, au même titre que l'Amérique du Nord, a montré un fort intérêt dans le développement des Systèmes de Transport Intelligent (STI). De par les importants investissements de son gouvernement dans le domaine des STI, le développement de ces technologies, ainsi que leur mise en application, a donné lieu à l'un des STI opérationnels les plus avancés au monde, pour la gestion du système routier. Le gouvernement japonais et la société à but non-lucratif "ITS Japan", utilisent "kodo doro kotsu shisutemu", qui signifie "systèmes intelligents de routes et de transports", mais l'Institute of Electronics Information and Communication Engineers, l'Information Processing Society of Japan and l'Institute of Electrical Engineers of Japan utilisent "kodo kotsu shisutemu", qui signifie "systèmes de transport intelligents" [242]. Comme le montre la figure 2.1, le ministère du Territoire, de l'Infrastructure, des Transports et du Tourisme définit un STI comme "un nouveau système de transport construit dans le but d'améliorer la qualité de vie de la population et les problèmes de circulation routière, tels que les accidents et la congestion, en utilisant des technologies de l'information et de la communication de pointe pour créer un réseau d'information basé sur les personnes, les automobiles et les routes" [242].

"ITS Japan" explique le concept comme étant "un système permettant de résoudre divers problèmes liés à la circulation routière, tels que les accidents, la congestion et les mesures environnementales, grâce à l'échange d'informations entre les personnes, les automobiles et les routes. Il tente de coexister avec l'environnement et d'améliorer l'efficacité énergétique en éliminant les accidents et les encombrements, tout en optimisant le réseau routier grâce à des technologies de pointe en matière d'information, de communication et de contrôle. En outre, il a le potentiel de créer de nouvelles industries et de nouveaux marchés avec ses diverses technologies connexes, et promet d'être une force motrice dans le changement du système social" [242].

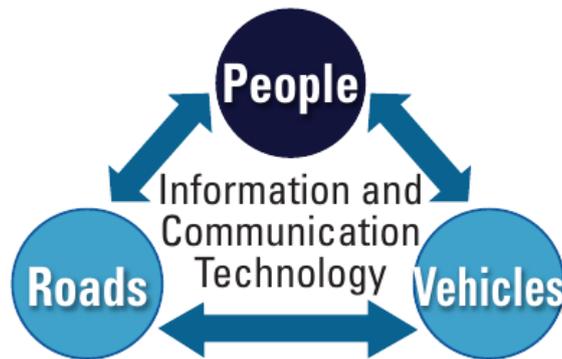


FIGURE 2.1 – ITS Japan - Architecture [242]

C'est suite au premier congrès mondial sur les systèmes de transport "Le premier Congrès mondial sur la télématique avancée des transports et les systèmes intelligents véhicules-autoroutes" que le Japon crée le Quartier Général de la Promotion de la Société de l'Information et des Télécommunications Avancées (QGPSITA), directement administré par le Premier ministre du pays. En février 1995, le Japon, au travers du QGPSITA, publie ses "Directives de base sur la promotion d'une société de l'information et des télécommunications avancées". Ces directives forment le cadre opérationnel de six domaines d'application, pour le développement rapide d'une infrastructure d'information et de télécommunications de haute performance pour accélérer et faire progresser le développement d'une société dans laquelle l'information et les connaissances sont librement générées, échangées et partagées. Les STI sont l'un de ces six domaines d'application.

Suivant ces directives de bases, le conseil interministériel chargé de promouvoir les STI (constitué du ministère des Transports, du ministère de la Construction, du ministère des Postes et des Télécommunications, du ministère du Commerce international et de l'industrie, ainsi que de l'Agence nationale de police) a élaboré les "Lignes directrices gouvernementales de base sur l'information et les communications avancées dans les domaines des routes, de la circulation et des véhicules". Ces lignes directrices, publiées en août 1995, proposent 11 politiques nationales pour la promotion de la recherche et le développement des STI, la normalisation, ainsi que l'intégration des applications individuelles actuelles au sein des STI et la coopération internationale sur le sujet. C'est dans cette perspective que le deuxième congrès mondial des STI s'est tenu à Yokohama en novembre 1995.

En approuvant neuf de ces domaines d'application des STI, le gouvernement définit officiellement l'orientation future des STI au Japon. Les neuf domaines de développement comprennent les systèmes de navigation, la perception automatique des droits, les efforts de conduite sécuritaire, l'optimisation de la gestion du trafic, les méthodes de gestion des routes, le transport en commun, l'exploitation des véhicules commerciaux, les programmes pour les piétons et l'exploitation des véhicules d'urgence.

Enfin, c'est en 1996 que le Japon, au travers du conseil interministériel chargé de promouvoir les STI, publie officiellement son "Grand plan de promotion des systèmes de transport intelligents (STI)". Ce plan d'envergure a posé les fondations pour le développement des STI, leur développement et leur intégration à la société japonaise. La figure 2.2 illustre la chronologie des événements.

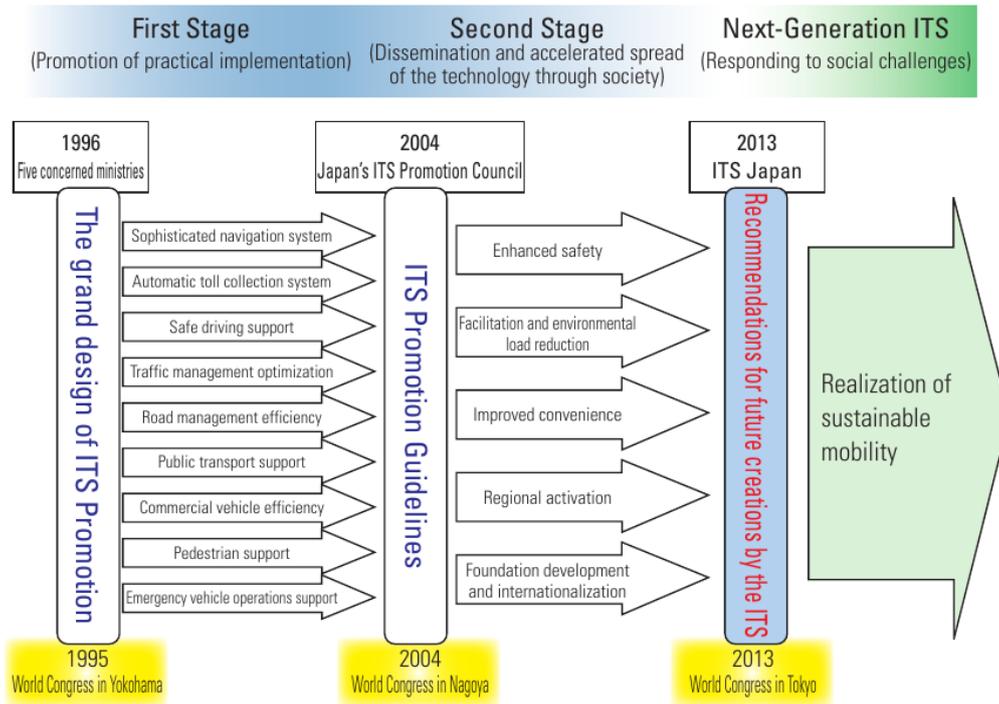


FIGURE 2.2 – ITS Japan - Chronologie [242]

La Première Phase, entre 1996 et 2004, portait sur la promotion des implémentations de service unitaire (ou sous-système) au sein de chacun des neuf domaines retenus par le gouvernement du Japon.

Un ITS étant composé de plusieurs sous-systèmes, ces derniers ont par la suite été regroupés sous une plateforme de gestion, comme l'illustre la figure 2.2.

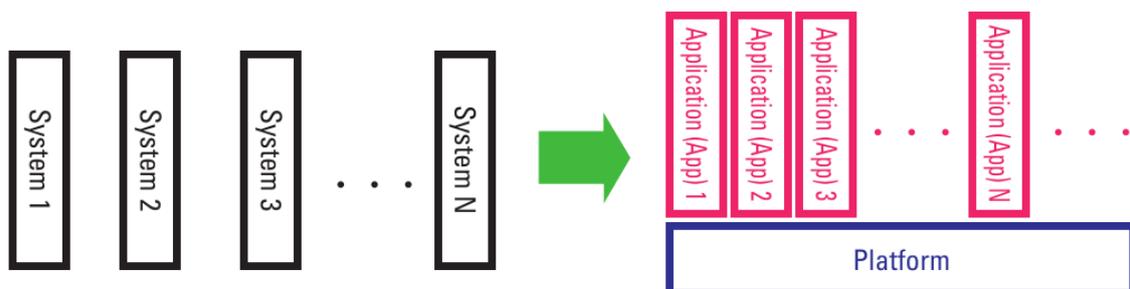


FIGURE 2.3 – ITS Japan - Orienté Plateforme [242]

Pour le congrès mondial des STI de Nagoya en 2004, le conseil japonais de promotion des STI a publié ses "lignes directrices pour la promotion des STI", dont les piliers sont "la sûreté et la sécurité, l'environnement et l'efficacité, ainsi que le confort et la commodité". Ces cinq piliers sont des abstractions des neuf domaines d'application couverte par la "Première Phase". Ils représentent la place que doivent intégrer les STI dans la société japonaise. Pour ce faire, le gouvernement Japonnais a cherché à faciliter et à accélérer leur adhésion par le biais de la technologie.

Depuis 2003, la remontée d'information, sur le trafic et les embouteillages au Japon, est généralisée grâce à l'utilisation de véhicules sondes équipés du système VICS. Le système de communication d'informations sur les véhicules (VICS) fut le premier STI au monde, disponible sur l'ensemble du territoire national, en 2003. Son architecture technique est le fruit direct des recherches menées dans les années 90. Il est reconnu comme la "version 1.0" des systèmes de navigation embarqués au Japon.

Le Japon a ensuite développé "Smartway", présenté comme la "version 2.0" du service de STI de pointe du pays. Sa conception théorique était finie en 2004 et son développement partiellement terminé, pour une mise en place en 2007. Le Japon a ensuite commencé le déploiement national généralisé de Smartway en 2010. Smartway est capable d'avertir les conducteurs lorsqu'ils traversent des zones particulièrement accidentogènes d'une route. Il utilise une unité de bord de route compatible (DSRC) pour agréger des données et envoyer des avertissements appropriés aux conducteurs en présence de véhicules accidentés.

L'aspect environnement écologique n'ayant pas été prévu en 2004, un environnement mobile durable est ainsi promu depuis 2010, par le conseil interministériel chargé de promouvoir les STI, comme nouveau pilier pour la prochaine génération de STI afin de répondre aux problèmes environnementaux et sociétaux à venir. Il propose :

- La construction d'un système de transport sûr et sécurisé.
- La construction d'une société de l'automobile de prochaine génération.
- Une réponse aux besoins environnementaux.
- Une réponse au développement des technologies de l'information et de la communication.
- Une réponse à la circulation des personnes et des biens de nouvelle génération.
- L'introduction et la promotion d'un STI régional intégré.
- La réponse aux catastrophes.
- Une réponse à l'internationalisation.

De plus, en 2014, "ITS Japan" a résumé comme suit les sept domaines prioritaires pour le développement futur des STI :

- La réduction à zéro des accidents de la route et de la congestion routière grâce à des systèmes avancés d'aide à la conduite.
- La résolution des problèmes liés à l'efficacité des transports grâce à une plateforme d'information sur l'aide au mouvement.
- L'innovation du transport multimodal pour soutenir la mobilité à l'intérieur des villes.
- La gestion globale du trafic routier.
- L'augmentation de l'efficacité de la logistique.
- L'optimisation de l'utilisation de l'énergie.
- La promotion de la coopération internationale.

Pour conclure, le modèle Japonnais est basé sur le trio Personne, Véhicule, Route, interconnectés et agissant les uns sur les autres. L'objectif ici, clairement annoncé, est de fournir un système de gestion de l'infrastructure afin d'améliorer la sécurité, d'accroître l'efficacité, de réduire la charge environnementale, d'accroître la commodité et de créer plus de plaisir grâce à la conduite automatisée et au traitement des données. Un tel système de gestion prend tout son sens une fois remis dans le contexte géologique du Japon, avec les conséquences lourdes qu'un séisme peut avoir sur le pays. Il répond donc au besoin de sécurisation pour permettre une bonne gestion des catastrophes naturelles.

## L'Europe

*"Les systèmes de transport intelligent (STI) sont essentiels pour accroître la sécurité et résoudre les problèmes croissants d'émissions et de congestion en Europe. Ils peuvent rendre les transports plus sûrs, plus efficaces et plus durables en appliquant diverses technologies de l'information et de la communication à tous les modes de transport de passagers et de marchandises. En outre, l'intégration des technologies existantes peut créer de nouveaux services. Les STI sont essentiels pour soutenir l'emploi et la croissance dans le secteur des transports. Mais pour être efficace, le déploiement des STI doit être cohérent et correctement coordonné dans toute l'UE."* [84]

Les pays européens ne se sont intéressés au domaine des Systèmes de Transport Intelligent (STI) que bien plus tard que l'Amérique du Nord et le Japon. On retrouve le projet EUREKA [44] à l'origine du développement des STI en Europe. C'est à l'initiative de François Mitterrand et d'Helmut Kohl que le projet EUREKA vit le jour. Le projet, lancé en 1985, avait pour objectif de faciliter la coopération européenne en matière de recherche technologique pré compétitive pour renforcer la productivité et la compétitivité de l'industrie européenne dans les technologies de pointe. Au travers d'appels à projet émis par EUREKA, les entreprises et les laboratoires de recherche, publics ou privés, des 41 États membres, sont invités à proposer des projets de coopération, sur des thèmes et selon des partenariats de leur choix, pour mettre au point des produits, procédés ou services appelés à prendre place à terme sur le marché.

Grâce au programme EUREKA, l'année 1987 voit naître le premier projet de coopération internationale pour la gestion du transport. Le projet Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety (PROMETHEUS) [178] est à l'origine du groupe "Daimler-Benz AG" et sera poursuivi durant huit ans sous la forme d'une coopération entre plusieurs constructeurs automobiles, producteurs et fournisseurs d'électronique, universités et instituts européens. Tout au long de son développement, le projet a cherché à répondre à quatre grandes problématiques : l'augmentation de la sécurité du trafic, l'amélioration de la compatibilité environnementale, la minimisation de la consommation d'énergie et enfin l'amélioration du confort. De par les thèmes abordés, on voit apparaître une première formalisation de STI.

Suite aux problématiques soulevées par le projet PROMETHEUS et au niveau bas d'innovation observé au sein des PME européennes, comparé à celles des États-Unis et du Japon dans le domaine des STI, un nouveau projet de coopération européenne a été mis sur pied. Le projet "Drive for Groth", initié par les pouvoirs publics irlandais et rapidement rejoint par le Royaume-Uni et l'Allemagne, a eu pour but de mettre en réseau la base des connaissances déjà existante au sein des régions de l'UE. C'est grâce au succès du projet Drive for Groth, que l'Europe fonde "ERTICO ITS Europe" en 1991 à l'initiative de 15 chefs d'entreprise et de la Commission européenne pour combler le fossé entre la recherche et le déploiement des services de mobilité sur les routes. ERTICO est une organisation coopérative à but non lucratif établie en Europe sur la base d'une coopération entre les gouvernements et les entreprises privées. C'est notamment ERTICO qui a cofondé le premier "ITS World Congress" à Paris en 1994.

Un nouveau pas est franchi en Europe en 2006, avec le lancement de la technologie ERTICO "Cooperative Vehicle Infrastructure Systems" (CVIS) [149]. La technologie CVIS est axée sur la communication inter-véhicule et véhicule/infrastructure. Chaque véhicule est en mesure de communiquer les dernières informations sur le trafic et les avertissements de sécurité aux opérateurs routiers et aux autres véhicules se trouvant à proximité, par le biais d'une communication sans fil. Cette technologie a pour but d'améliorer la sécurité et l'efficacité du trafic en interconnectant les conducteurs, les véhicules et l'infrastructure routière au travers d'un service ITS.

Les Systèmes de Transport Intelligent ont enfin fait l'objet d'une directive de la part de la Commission européenne. Suite logique des travaux initiés par ERTICO avec la technologie CVIS, la directive 2010/40/UE [67] propose un cadre législatif générique et cohérent pour promouvoir les STI coopératifs et leur adoption par les pays européens, dans l'optique de favoriser l'apparition d'un marché unique de véhicules coopératifs, connectés et automatisés.

Concernant le cadre technologique, le modèle d'architecture européen des STI, connu sous le nom : "FRAME" [211] est le fruit du projet "KAREN", financé par la Commission européenne. Livré en 2000, il est composé d'un ensemble européen de besoins des utilisateurs, d'une architecture fonctionnelle, d'une architecture physique et d'une architecture de communication, ainsi que de modèles de référence, d'un rapport coûts-avantages et de recommandations pour la normalisation et le déploiement des STI. Le projet FRAME propose les premières idées de l'architecture des STI européens, en proposant une :

- Architecture fonctionnelle des STI européens
- Architecture physique des STI européens
- Architecture de communication des STI européens
- Analyse coûts-avantages des STI européens
- Étude de mise en œuvre des STI européens
- Modèles de mise en œuvre des STI

L'architecture cadre des STI européens est conçue pour fournir un cadre flexible que chaque pays peut adapter à ses propres besoins. Les projets STI nationaux basés sur l'architecture européenne, tels que ACTIF (France), ARTIST (Italie), TTS-A (Autriche) et TEAM (République Tchèque), ont donc une approche et une méthodologie communes, mais chacun a pu se concentrer sur l'adaptation locale et les développer plus en détail. Le développement de FRAME s'est poursuivi sous la forme du projet "E-FRAME".

Se pose maintenant la question de la diffusion de ce modèle de STI européen. En 2008, la Commission des Communautés européennes a fourni un plan d'action pour le déploiement des Systèmes de Transport Intelligent. Ce document a permis d'initier un développement fort et plus ciblé des STI dans l'Union européenne [84]. Il introduit un plan d'action s'attaquant à trois défis majeur en constante évolution en Europe :

- La congestion et ses coûts : la congestion routière affecte le réseau routier dans une proportion estimée à 10%, les coûts annuels correspondants étant de l'ordre de 0,9% à 1,5% du PIB de l'UE
- Les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport routier : le transport par la route représente 72% des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux transports, avec une augmentation de 32% de 1990 à 2005
- Les décès sur la route : si le nombre de décès, dus aux accidents de la route, recule (-24% depuis 2000 dans l'UE), leur nombre (42 953 décès en 2006) reste trop élevé de 6 000 unités par rapport à l'objectif d'une division par deux du nombre des décès entre 2001 et 2010

Ces problèmes se posent avec d'autant plus d'importance que le transport de marchandises devrait croître de 50% entre 2000 et 2020, et le transport de passagers de 35% sur la même période. Les principaux objectifs politiques à adopter en conséquence doivent donc viser à rendre les transports et les déplacements plus écologiques et plus sûre pour la population. De par la numérisation toujours plus importante des transports en général, les STI en particulier devraient connaître une forte croissance. Dans ce cadre, la Commission européenne vise à utiliser davantage les solutions STI pour parvenir à une gestion plus efficace du réseau de transport pour les passagers et les entreprises. Les STI seront utilisés pour améliorer les trajets et les opérations sur des modes de transport spécifiques et combinés. La Commission européenne s'efforce également de préparer le terrain pour la prochaine génération de solutions STI, par le déploiement de STI coopératifs, ouvrant la voie à l'automatisation ainsi que l'automatisation dans le secteur des transports [84].

En conclusion sur l'adoption des STI de par le monde, bien que les STI d'une manière générale soient nés du même besoin commun de gestion de l'infrastructure routière, nous avons pu voir au travers de l'analyse du continent nord-américain, du Japon et de l'Europe que leur appropriation des Systèmes de Transport Intelligent est différente. Cette différence est due à leur besoin d'adaptation aux contraintes locales et à une vision propre du futur du domaine du transport. Comme nous avons pu le voir, les USA ont une réponse techno-centré pour répondre à leur problématique de besoin de mobilité grandissant et à la saturation du réseau routier. Au travers des STI, ils proposent un système complexe, inter-connecté, multimodal, automatisé pour la gestion des flux de transport, étant capable de s'adapter pour répondre localement aux besoins des utilisateurs.

Les Japonais, également pionniers dans le développement des STI, ont été les premiers à disposer d'un STI fonctionnel à l'échelle d'un pays. Ils sont cependant restés axés sur la gestion des flux routiers, en constante augmentation, dans l'optique de maximiser leur capacité de réponse aux catastrophes naturelles. En effet, la sécurité de l'infrastructure routière, et donc de personnes y circulant, est un élément central dans leur approche. Ils mettent en avant le développement des STI comme outil de construction d'un système de transport sûr et sécurisé.

Pour finir, dans le cas de l'Europe, bien que les STI soient apparus 15 ans après les travaux lancés par les Américains et les Japonais, ils répondaient aux besoins d'industriels, moteurs dans le développement des nouvelles technologies. Cependant, bien que les retombées aient été importantes sur le moyen terme [178], les innovations sont restées cantonnées au domaine seul du véhicule. De plus, la Commission européenne a pleinement joué son rôle de législateur en proposant un cadre législatif et technologique commun à la Communauté européenne. Seulement, tant qu'aucune ambition d'innovation et de développement ne sera menée par des acteurs publics et privés à l'échelle globale, les STI européens resteront un ensemble de sous-systèmes locaux.

### 2.1.1.3 L'ISO comme norme internationale

Nous avons pu le voir précédemment, les Systèmes de Transport Intelligent (STI) sont développés différemment de par le monde, bien qu'initialement répondant aux mêmes besoins de gestion de l'infrastructure routière. Ces différentes appropriations des STI dépendent de la culture locale, des politiques de développement ainsi que des contraintes géographiques, géologiques, économiques, etc.

Pour répondre à ces besoins locaux, trois modèles d'architectures (indépendantes) sont nés. Le modèle américain (DOT architecture), le modèle européen (FRAME) et le modèle japonais (Inter-connected Subsystems). Cependant, l'organisation internationale de normalisation (ISO) travaille depuis longtemps à proposer un cadre plus global aux STI. Pour cela, elle cherche à déterminer des concepts abstraits, communs aux différentes architectures de STI existantes. La norme ISO-TC204 de 1994 sur les STI fut une première tentative de normalisation. Plusieurs autres normes ISO ont vu le jour depuis, jusqu'à la norme la plus récente : l'ISO 14813-1. Cette norme est une rupture dans l'abstraction des STI car elle propose, pour la première fois, une architecture en trois niveaux, dont les fondements les plus abstraits appelés "Domaine de Service" sont composés de "Groupe de Service", eux-mêmes composés de "Service". Ces trois couches *"servent de cadre à l'élaboration d'architectures STI et de concepts d'exploitation liés aux STI, qui conduisent à leur tour à la définition des exigences, fonctionnalités et normes appropriées nécessaires au déploiement de services de STI spécifiques"* [133].

Les Systèmes de Transport Intelligent, de par les domaines de service qu'ils peuvent maintenant couvrir, reflètent l'évolution des pratiques et des applications du domaine du transport dans le temps. Initialement créé pour répondre aux besoins de gestion du trafic routier, d'informations à destination des voyageurs et d'automatisation des systèmes de paiement électronique, le champ d'application des STI s'est développé pour s'adapter aux nouveaux besoins du domaine du transport, ainsi que son interconnexion à d'autres secteurs d'activités.

Concernant les nouveaux domaines du transport, on peut citer, par exemple, l'exploitation et l'entretien des réseaux, la mobilité du fret et sa connectivité intermodale, le déplacement multimodal, les stratégies de tarification routière variable, la coordination des interventions d'urgence et de réponse aux catastrophes naturelles, les besoins de sécurité nationale ou encore les systèmes informatiques coopératifs, entre autres.

Cependant, dans une démarche STI, ces domaines du transport sont inter-connectés et inter-dépendants, mais également interfacés avec des activités et des environnements hors du domaine du transport. Laissant loin derrière l'ISO-TC204, l'abstraction de l'inter-connexion et de l'interdépendance du STI aux domaines qu'il cible est l'un des points essentiels de l'ISO 14813-1. Elles représentent des influences externes et critiques sur la fonctionnalité des différents services pris en charge par les "domaines et groupes de services STI".

La figure 2.4 illustre les couches de la norme et leur lien de hiérarchie. Cette hiérarchie d'abstraction définit la manière dont le domaine de service ciblé est inter-connecté et inter-dépendant aux sous-groupes qui le composent, ainsi qu'aux autres domaines (hors transport) auxquels il est lié.

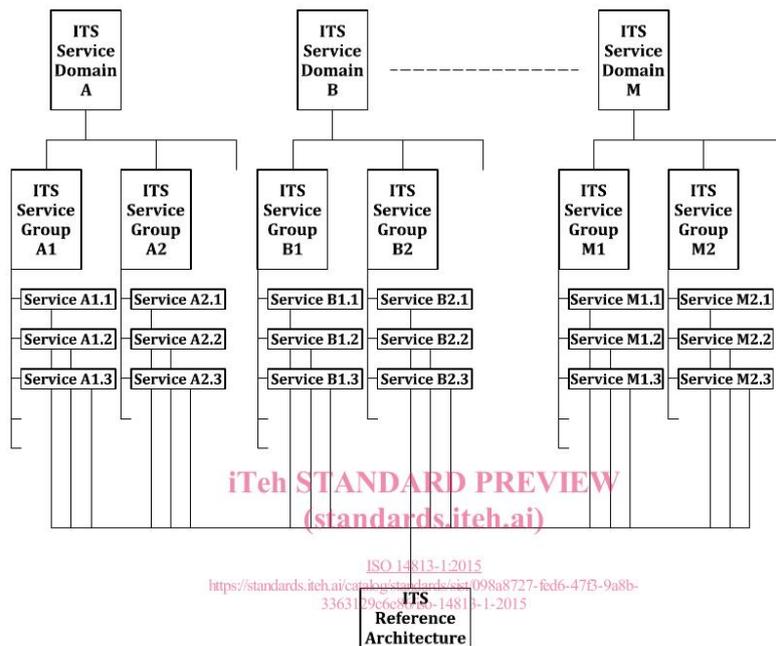


FIGURE 2.4 – ISO 14813-1 [133]

De plus, cette ISO se propose de définir les services d'application contemporains des STI, ainsi que des groupes et des services qui le composent. Enfin, on peut noter qu'avec le développement massif des technologies de l'information et des besoins toujours plus présents de connexion à l'information, les STI sont amenés à sortir du transport routier pour se développer dans le transport maritime, ferroviaire, ainsi que le spatial qui se précise comme nouveau secteur à forte croissance pour le transport de marchandise.

### Les domaines de services

Indépendamment de toute mise en place d'un STI, les services et les groupes de services se retrouvent dans différents domaines d'application (bien souvent liés). Ces domaines d'application sont axés sur un ou plusieurs groupes d'utilisateurs. Ils constituent le plus haut niveau d'abstraction dans une architecture STI et sont appelés domaines de services.

La norme propose de définir le domaine du transport routier selon les treize "domaines de services" suivant :

- L'information aux voyageurs : ce domaine concerne la fourniture d'informations en temps réel sur l'état du réseau routier à destination des usagers.
- La gestion et exploitation du trafic : ce domaine concerne uniquement la gestion des véhicules en mouvement sur le réseau routier. Il comprend à la fois les activités de surveillance et de contrôle automatisées, des processus de prise de décision qui traitent en temps réel les incidents et autres perturbations sur le réseau de transport pour garantir et maintenir la mobilité globale.
- Les services aux véhicules : ce domaine a pour objectif d'améliorer la sûreté, la sécurité et l'efficacité du fonctionnement des véhicules, en avertissant et en assistant les utilisateurs ou en contribuant au fonctionnement du véhicule. Ces services utilisent des informations externes provenant de dispositifs de détection embarqués et/ou de communications sans fil avec d'autres sources.
- Le transport de marchandises : ce domaine de service concerne la gestion de l'exploitation de flottes de véhicules commerciaux et le transport de marchandises. De plus, il gère le processus d'autorisation pour le transport de marchandises au-delà des frontières nationales et juridictionnelles et les transferts intermodaux de marchandises.
- Le transport public : ce domaine concerne la gestion des transports publics pour fournir des services rapides et efficaces.

- Le service d’urgence : ce domaine fournit une réponse à des incidents classés comme urgents et permet de lancer les services d’urgence sur l’ensemble du réseau de transport.
- Le paiement des transports : ce domaine permet de percevoir automatiquement les revenus des services et des installations de transport.
- La sécurité personnelle dans le transport routier : ce domaine est responsable de la protection de la sécurité personnelle des usagers du transport, piétons comme conducteurs.
- La surveillance des conditions météorologiques et environnementales : ce domaine est responsable de notifier les utilisateurs et les gestionnaires du réseau, des conditions météorologiques et environnementales susceptibles d’avoir un impact.
- La gestion et la coordination des interventions en cas de catastrophe : ce domaine concerne les acteurs du transport routier qui gèrent les ressources de plusieurs juridictions dans leurs interventions en cas de catastrophes naturelles, de troubles civils ou d’attaques terroristes.
- La sécurité nationale : ce domaine s’occupe de la surveillance à distance des véhicules pour la détection d’explosifs ou de matières dangereuses, et du contrôle opérationnel de véhicules.
- La gestion des données STI : ce domaine est responsable de la définition et de la gestion des données qui peuvent être utilisées par certains ou tous les autres services décrits dans l’ISO 14813.
- La gestion des performances : ce domaine est responsable de la simulation de l’exploitation du réseau de transport routier, à l’aide de données archivées et/ou en direct, obtenue par la surveillance du réseau de transport routier.

La catégorisation des domaines de services en treize groupes distincts, n’implique pas qu’ils doivent tous être implémentés lors de la conception d’un STI. L’ensemble mis en place doit être le plus adapté à l’utilisateur final et doit être indépendant des services proposés.

### **Les groupes de services**

Un "groupe de services" est composé d’un ou plusieurs types de services, qu’ils soient similaires ou complémentaires pour être fournis aux utilisateurs des STI. Ainsi, les "groupes de services" et les services qu’ils contiennent doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

- Chaque "groupe de services" est dédié à une activité unique, ainsi que chacun de ces services.
- Le nom de chaque groupe de services doit refléter l’activité prise en charge.
- Chaque service au sein du groupe de services doit faire référence à la fois à l’activité du groupe de services et à la nature du service et de ces utilisateurs.
- Chaque niveau de la hiérarchie doit offrir des services à un niveau de granularité équivalent.

### **Les Services**

Un service STI consiste en un produit, ou une activité, qui peut être fourni à un utilisateur spécifique. Les services STI doivent donc être considérés comme les éléments des plus bas niveaux constituant un STI déployé.

L’élaboration de services STI spécifiques doit être entreprise de manière cohérente dans toute architecture spécifique. Il existe plusieurs méthodologies qui facilitent le développement de cette élaboration cohérente. Les normes ISO sur l’architecture des STI n’exigent pas l’utilisation d’une méthodologie spécifique et il est possible d’utiliser le langage de modélisation unifié (UML - voir ISO/TR 24529) ou des techniques orientées processus (voir ISO 26999). Le choix de la méthodologie doit être déterminé par la complexité du STI déployé et le public ciblé. Dans ce cadre, la norme ISO 14813-5 fournit des indications sur les exigences de l’architecture d’un STI. La norme ISO ITS 17452 users fournit quant à elle des indications pour l’utilisation d’UML dans la définition des interfaces.

### **Les Utilisateurs**

La définition générale de l’utilisateur est qu’il représente un "partenaire". C’est donc une personne qui accède à un service par le biais d’une interaction quelle qu’elle soit.

#### 2.1.1.4 Les technologies au sein des STI

Les technologies ont une part prépondérante dans les Systèmes de Transport Intelligent (STI). Développés depuis le début des années 70, les STI sont une évolution logique de la gestion des transports. Les STI ont évolué dans leur manière d'être perçus et mis en place, passant d'une vision de gestion localisée à la vision d'un cadre intégré à l'échelle mondiale réalisant une synergie entre les systèmes auparavant isolés. De plus, l'évolution des STI s'appuie grandement sur le développement constant des avancées technologiques des différents domaines liés au transport.

Ainsi, si les premières avancées technologiques étaient ciblées sur l'infrastructure routière et les véhicules dans l'objectif de répondre localement à des besoins d'optimisation de la gestion du trafic, elles ont ensuite évolué pour permettre le développement des communications. Grâce à l'arrivée des technologies de communication sans fil, de nombreuses avancées dans la gestion du trafic ont été permises, rendant par exemple possible le fait de sonder le trafic et de faire parvenir en temps réel, les informations captées à une unité de gestion centralisée du trafic. Par la suite, avec l'arrivée des véhicules autonomes pour le transport de personne et la livraison de marchandise, le besoin de transmission de l'information en temps réel, pour le bon fonctionnement des véhicules et le contrôle de l'état de la marchandise est devenue une contrainte majeure. C'est grâce au déploiement généralisé des nouvelles technologies de l'information et de la communication (TIC) qu'une telle infrastructure a pu être mise en place pour assurer le transfert et le stockage des données.

Dans cette partie, l'objectif est de proposer une vue d'ensemble des technologies ayant un rôle important (passé, actuel ou à venir) dans le développement et l'établissement des STI. Pour cela, [193] met en avant une classification des technologies liées aux STI organisés selon les points suivants :

- Le véhicule avec système électronique embarqué dédié au STI
- La communication
- Le positionnement
- La cartographie
- La détection

#### Les technologies historiques

Suivant cette classification, [242] présente les technologies "historiques", ayant permis le développement et la mise en place des STI. Ces dernières sont principalement présentes dans les communications, le positionnement et la détection.

Historiquement, la technologie ayant permis un tournant majeur dans le développement et l'adoption des STI est le "Global positioning System" (GPS), répondant au besoin de connaître la position des véhicules en temps réel durant leur déplacement. Cela nécessite des lignes de vue vers les satellites, ce qui peut freiner l'utilisation du GPS dans les centres-villes en raison des effets de "canyon urbain". La localisation est réalisée avec une incertitude moyenne de 10 mètres. Le GPS est la technologie de base de nombreux systèmes de navigation et de guidage routier embarqués. Des pays comme les Pays-Bas et l'Allemagne utilisent des équipements embarqués équipés de dispositifs GPS par satellite pour enregistrer les kilomètres parcourus par les automobiles et les camions afin de financer leurs systèmes de transport.

Ensuite, avec le développement des technologies de communication sans fil, outre le fait de pouvoir répondre au besoin de transmission de l'information en temps réel sur de longues distances, elles ont ouvert la porte à l'interconnexion des sources pour l'agrégation et le partage d'information.

On retrouve, les "dedicated-Short Range Communications" (ou DSRC). *"Le système DSRC (Dedicated-Short Range Communications) est un canal de communication sans fil unidirectionnel ou bidirectionnel qui fonctionne dans le spectre sans fil de 5,8 ou 5,9 GHz et qui est spécifiquement conçu pour les utilisations automobiles. La technologie DSRC permet des communications sans fil bidirectionnelles entre le véhicule et les équipements routiers. Il joue un rôle essentiel dans de nombreux systèmes de transport intelligents, notamment l'intégration véhicule-infrastructure, la communication véhicule-véhicule, la synchronisation adaptative des feux de circulation, le télépéage, le péage urbain, la tarification routière électronique, la fourniture d'informations, etc. Le DSRC*

est un sous-ensemble de la technologie d'identification par radiofréquence (RFID). La technologie destinée aux applications des ITS fonctionne sur la bande 5,9 GHz aux États-Unis et sur la bande 5,8 GHz au Japon et en Europe. Aujourd'hui, les systèmes DSRC en Europe, au Japon et aux États-Unis ne sont généralement pas compatibles. En 2004, la Commission fédérale des communications (FCC) des États-Unis a prescrit une norme commune pour la bande DSRC, à la fois pour promouvoir l'interopérabilité et pour décourager la limitation de la concurrence par des technologies propriétaires" [242].

Viennent ensuite les "Radiowave or Infrared Beacons". "Le système japonais Vehicle Information Communications System (VICS) utilise des balises à ondes radio sur les voies rapides et des balises infrarouges sur les routes principales pour transmettre des informations sur le trafic en temps réel. Le VICS utilise la technologie sans fil DSRC de 5,8 GHz (les artères sont des routes de capacité modérée, juste en dessous des autoroutes en termes de niveau de service, la principale différence étant que les artères ont tendance à utiliser des feux de circulation. Les routes artérielles transportent de grands volumes de trafic entre les zones des centres urbains)" [242].

Ces dernières sont renforcées par la communication par téléphonie mobile. "Les réseaux de téléphonie mobile standard de troisième ou quatrième génération (3G ou 4G) peuvent être utilisés pour transmettre des informations aux STI. Les réseaux mobiles présentent des avantages, comme leur grande disponibilité dans les villes et le long des grands axes routiers. Une capacité de réseau supplémentaire peut être nécessaire si les véhicules sont équipés de réseaux mobiles, et les opérateurs de réseau pourraient devoir couvrir ces coûts. Cependant, la téléphonie mobile peut ne pas convenir à certaines applications STI critiques pour la sécurité, car elle peut être trop lente" [242].

Pour finir, l'interconnexion de l'ensemble des sources d'information, supporté par les technologies précédemment introduites, est assurée par la technologie "Wireless networks". "Les réseaux sans fil sont accessibles pour des communications rapides entre les véhicules et le bord de la route, ce qui est similaire à la technologie couramment utilisée pour l'accès à l'Internet sans fil, mais ils ont une portée de seulement quelques centaines de mètres. Néanmoins, cette portée peut être étendue pour transmettre des informations au véhicule ou au nœud suivant par chaque véhicule ou nœud routier successif. Le WiBro, basé sur la technologie WiMAX, est de plus en plus utilisé en Corée du Sud comme infrastructure de communication sans fil pour transmettre des informations sur le trafic et les transports publics dans l'ensemble de son réseau de transport" [242].

Enfin, de par l'essor des technologies de communication sans fil, la mise en place des activités de prise de mesure sur l'état du trafic routier s'en est retrouvé renforcé. "Des véhicules sonde (souvent des taxis ou des véhicules appartenant à l'État équipés de la technologie DSRC ou d'une autre technologie sans fil) sont déployés par plusieurs pays. Ces équipements transmettent la vitesse et l'emplacement des véhicules à un centre de gestion des opérations de circulation, où les données des sondes sont assemblées pour générer une image du flux de circulation à l'échelle de la zone et évaluer les endroits encombrés. Des recherches approfondies ont également été menées pour utiliser les téléphones portables que les conducteurs portent souvent sur eux afin de générer des informations sur le trafic en temps réel, en utilisant la localisation du téléphone par GPS lorsqu'il se déplace avec le véhicule. Par exemple, à Pékin, plus de 10 000 taxis et véhicules commerciaux ont été équipés de puces GPS qui envoient des informations sur la vitesse de déplacement à un satellite, qui les transmet ensuite au centre d'information sur les transports de Pékin, puis les données sont converties en vitesses de déplacement moyennes sur toutes les routes de la ville" [242].

Ces technologies de communication sans fil ont également permis le développement d'outil local de captation avancé tel que les caméras de reconnaissance. "Les systèmes basés sur des caméras ou des étiquettes peuvent être utilisés pour les systèmes de tarification de la congestion par zone (comme à Londres), ainsi que pour la tarification sur des routes spécifiques. Les caméras placées sur les routes sont utilisées lorsque les conducteurs entrent et sortent des zones de congestion dans de tels systèmes. Les caméras utilisent la reconnaissance automatique des plaques d'immatriculation (RAPI) pour identifier les plaques d'immatriculation des véhicules, qui est basée sur la technologie de reconnaissance optique des caractères (ROC); les serveurs de back-office évaluent et facturent les conducteurs pour leur utilisation des routes dans la zone de congestion. De plus, il est capable de transmettre l'information numériquement" [242].

## Les nouvelles technologies

Nous avons pu le voir, le développement des technologies de la communication sans fil a été une étape importante dans le développement des STI, qui a ouvert la voie au développement des TICs pour la mise en réseau des sources de données, la captation et le stockage d'informations. Portées par les nouvelles entreprises de la technologie, très largement représentées par les GAFAM ( Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft), ces dernières sont responsables de l'essor des nouvelles technologies dans le développement actuel des STI.

Chacune de ces entreprises de la technologie est responsable d'un pan du paysage numérique actuel. Cependant, depuis plus de dix ans, un domaine des STI, le véhicule autonome, représente un champ de recherche et de développement, d'opportunités et de développement majeur pour l'ensemble de ces entreprises. La course au véhicule autonome a été le terrain propice au développement de nouvelles technologies, autant dans le domaine de la communication, de la perception des véhicules, de l'analyse de la donnée ou encore de la planification du transport.

Suivant cette logique, [279], propose une revue des nouvelles technologies clef dans le domaine des STI, qui répondent au développement du véhicule autonome pour le transport de personne et le transport de marchandise comme futur clef de voûte de l'activité des STI. La classification suivante est axée autour de :

- La communication
- La perception
- L'extraction de l'information
- L'exploitation et la planification des transports

### La communication

*"Dans le domaine des STI, la technologie de communication se concentre principalement sur la communication sans fil, qui est la base de l'interconnexion entre chaque élément du système de transport. Parmi les technologies de communication sans fil les plus prometteuses, citons la communication mobile et la communication à courte portée. De plus, la recherche sur la technologie de communication implique l'architecture du réseau, l'optimisation, le protocole et la sécurité. On retrouve également l'architecture du Vehiculaire Cloud, qui évolue à partir de véhicules connectés à Internet. D'autre approche de communication innovante cherche à rendre possible les communications véhiculaire, par la mise en œuvre de communications véhiculaires sur des réseaux cellulaires. D'autre étudient l'encombrement des canaux dans les réseaux véhiculaires basés sur la norme IEEE 802.11p. Ils proposent un ensemble d'algorithmes de contrôle pour réduire la perte de paquets et promouvoir les performances des applications. Afin de résoudre les vulnérabilités de sécurité du CAN-FD. proposent une architecture de sécurité pour le CAN-FD à bord des véhicules comme mesure de prévention "* [279].

De plus, une nouvelle technologie se présente comme tournant majeur dans les communications sans fil, la 5G. [110] introduit la 5G pour les STI comme *"une technologie qui s'engage à relier les véhicules individuels en développant des systèmes de transport intelligents coopératifs (TICS). Les TICS compatibles avec la 5G peuvent rendre les villes intelligentes et aider les systèmes de transport automatisés plus sûrs et plus efficaces que les réseaux de transport existants. Cela aide également le système de transport public à faire face aux principaux problèmes de transport dans les grandes villes, notamment les embouteillages, la pollution et les collisions. La 5G peut résoudre ces problèmes en permettant un système de transport véritablement intelligent. Avec un accès Internet haut débit dans les transports publics. Un Cloud de trafic connecté qui agrège et analyse les données en temps réel provenant des véhicules, des infrastructures et des appareils connectés pour aider à la prise de décision opérationnelle, à une meilleure navigation, à l'efficacité des ressources en carburant et en temps, etc. Les premiers essais du TICS ont permis d'accroître de 20 % l'efficacité de la charge de travail et de réduire de 15 % les accidents et les embouteillages. Les principales transformations en cours dans l'industrie automobile se concentre sur la conduite automatisée, les services de sécurité routière et d'efficacité du trafic, la navigation intelligente, la société de l'information sur la route"* [279].

Enfin, de par les progrès considérables des TICs et les nouvelles possibilités permises par les débits très élevés de la 5G, le véhicule autonome (VA) se voit offrir une généralisation plus aisée dans le monde. Les VA équipés de capteurs embarqués capables de détecter leur environnement pour naviguer tout en effectuant les opérations de conduite, ont besoin d'échanger avec des unités de calcul distant pour assurer leur bon fonctionnement. *"L'industrie et d'autres organisations*

ont mené d'importantes recherches sur les capacités de communication des véhicules et les infrastructures de transport. Le 3GPP définit quatre types de cas d'utilisation de la communication entre véhicules : Véhicule-véhicule (V2V), Véhicule-infrastructure (V2I), Véhicule-piéton (V2P) et Véhicule-réseau (V2N), qui sont tous désignés collectivement par le terme V2X. Les communications V2V et V2P se font essentiellement entre les véhicules ou entre les véhicules et les usagers vulnérables de la route (par exemple, les piétons, les cyclistes) pour fournir des informations sur la localisation, la vitesse et la direction afin d'éviter les accidents. Les communications V2I comprennent les communications directes entre les véhicules et les infrastructures routières telles que les unités de bord de route (RSU). La RSU est utilisée pour étendre la portée des messages reçus d'un véhicule en agissant comme un nœud d'acheminement. La transmission V2N se fait entre un véhicule et un serveur d'applications V2X, pour prendre en charge des services tels que la diffusion de médias en continu pour le divertissement et la connectivité pour la gestion dynamique des itinéraires." [110]

### La Perception

La technologie de la perception artificielle est un point clef dans l'autonomisation des véhicules autonomes et leur intégration au STI en milieu urbain. Cependant, dans la mise au point d'un STI, la perception ne concerne pas uniquement les véhicules, chaque entité intégrée dans un STI doit pouvoir percevoir et identifier des éléments précis de son environnement.

Comme dit précédemment, les véhicules sont les premiers concernés par le besoin de vision artificielle pour répondre aux critères les plus avancés d'autonomisation. *"Les progrès récents en matière de communications, de contrôles et de système embarqué ont fait du véhicule une formidable plate-forme de capteurs. La perception basée sur le véhicule permet à ce dernier de surveiller son état et de détecter son environnement. L'état du véhicule comprend l'état cinématique, les attributs du véhicule et l'état de maintenance. Les informations sur l'environnement et l'état cinématique d'un véhicule peuvent être perçues par des capteurs embarqués, tels que l'accéléromètre, le GPS, la caméra, le Lidar. De nombreuses recherches ont été menées pour améliorer la précision de la perception dans différents scénarios d'application (détection des piétons positionnement basé sur la vision)"* [279].

En intégrant l'infrastructure routière dans un STI, l'objectif est de pouvoir connaître l'état du trafic ou encore des conditions météo pour garantir un usage sûr et sécurisé aux usagers et répartir au mieux la charge sur le réseau routier. *"L'infrastructure, de par sa perception, recueille diverses informations, telles que les conditions météo ou encore des données sur l'état du trafic"* [279]. Pour cela, diverses sortes de capteurs sont réparties sur l'ensemble de l'infrastructure afin de capter les informations requises. Concernant les conditions météo, on retrouve, par exemple, des capteurs de température, d'humidité ou encore de pression atmosphérique. Pour connaître l'état du trafic, on retrouve des capteurs toriques, des tubes à pression d'air, des capteurs basés sur la technologie de détection par micro-ondes, la vidéo, l'infrarouge ou encore les ultrasons. De plus, on retrouve également des véhicules équipés de capteurs mesurant la vitesse instantanée, les accélérations/décélérations, les coordonnées GPS. Plus spécifiquement dans le cas de véhicule électrique, les mesures effectuées doivent permettre d'analyser l'impact du déplacement sur les batteries et leur vieillissement. Ensuite, l'ensemble des informations mesurées sont transmises sur des serveurs distants au moyen d'une communication sans fil pour être stockées et mises à disposition pour analyses. Les systèmes IOT pour les STI [190], [262] se généralisent étant compacts, faciles à utiliser, de plus en plus riches en fonctionnalité et intelligents et connectés à Internet. De plus, la grande variété de capteurs disponibles et abordables, couplés au développement des TICs dédié à l'IOT, a offert un milieu pérenne pour l'adoption de la technologie.

Enfin, *"dans les STI, le voyageur est représenté par de l'équipement, comme le téléphone mobile et le vérificateur automatique de billets. Les informations sur le voyageur concernent principalement les besoins et l'historique du voyage. Une partie de ces informations provient des applications des téléphones portables, qui sont liées au voyage ou au trafic, d'autres proviennent de l'infrastructure de transport. Grâce à l'historique GPS, à l'enregistrement de la demande de recherche de voyage ou à l'enregistrement de l'arrivée, les STI peuvent obtenir des informations sur les voyageurs et les utiliser pour un traitement et une utilisation ultérieurs. D'autres proposent une solution pour surmonter l'inconvénient des véhicules et des capteurs routiers, qui sont incapables de saisir les événements de la circulation. Ils proposent un système appelé CrowdITS. Tout événement de trafic*

qui se produit dans le monde réel peut être enregistré par les conducteurs ou les piétons en utilisant l'application CrowdITS dans leurs téléphones mobiles” [279].

### **L'analyse des données**

L'analyse des données est un champ d'étude des big data qui permet de découvrir les informations qui se cachent derrière les données brutes. Ces données brutes sont collectées par les biais des capteurs précédemment présentés dans la partie "Perception". Selon la méthode de traitement et le type de données brutes, la recherche sur l'analyse d'information peut être classée en plusieurs grandes catégories.

L'analyse de la vision. *”En raison de leur coût relativement faible et d'autres considérations pratiques, les technologies axées sur la vision sont largement utilisées dans le scénario ITS. Dans l'analyse de la vision, les données sont recueillies à partir de capteurs vidéo et les résultats sont utilisés pour des applications liées aux STI. La détection, le suivi et la reconnaissance des objets du trafic sont l'une des applications représentatives. Elle est largement utilisée dans la gestion du trafic et la conduite automatisée. Par rapport à d'autres approches, telles que la détection de véhicules à l'aide d'un détecteur de boucles de véhicules ou d'un radar à ondes millimétriques, la méthode basée sur la vision est plus efficace et adaptative”* [279].

La fusion de données. *”Afin de fournir un état précis et plus complet du trafic sur un réseau routier, de multiples capteurs de trafic sont de plus en plus utilisés pour compléter l'information. En raison des limites des différents capteurs, les données d'un seul capteur ne reflètent pas l'état global du système. La fusion de données de sources multiples peut fournir des données complémentaires, et la fusion de données peut produire une meilleure compréhension de l'état en diminuant l'incertitude des données des capteurs”* [279].

L'exploration de données. *”L'observation précise des conditions ne suffit pas pour la gestion des transports. Le dernier développement des STI montre une nouvelle tendance au contrôle passif et à la gestion. Il est donc indispensable d'acquérir des connaissances sur le mécanisme du système de transport. Il est nécessaire d'utiliser des méthodes d'exploration de données pour découvrir le principe qui se cache derrière l'apparence avec des données en temps réel et historiques. En se basant sur la fusion et l'exploration des données du trafic, la technologie actuelle peut prendre en charge de nombreuses applications du trafic, telles que la prédiction du flux de trafic et l'estimation de la destination du trafic”* [279].

### **Exploitation et planification des transports**

Les opérations de transport résolvent principalement l'affectation et la dispersion du trafic afin de maximiser l'efficacité du système. Contrairement à l'exploitation, la planification des transports met l'accent sur l'allocation de ressources statiques, qui ne changent pas fréquemment, et n'a pas d'exigences strictes en matière de performance en temps réel.

*”La recherche sur l'exploitation des transports se concentre principalement sur la stratégie de contrôle du trafic ou la modélisation du trafic, qui vise à guider le flux de trafic pour promouvoir la performance du système. Papageorgiou et al. passent en revue les stratégies macroscopiques de contrôle du trafic routier. La signalisation routière est la principale mesure de contrôle dans les réseaux routiers. Afin de garantir la sécurité de la traversée des flux antagonistes et l'efficacité du réseau, il doit exister une stratégie optimale de contrôle des signaux menant à notre objectif. L'entrée de l'opération de transportation est l'état du trafic sur l'ensemble du réseau routier. La sortie est une stratégie de contrôle des signaux de circulation”* [279].

*”Dans la recherche sur la planification des transports, peu d'applications sont répertoriées. Pour résoudre le problème du placement efficace des capteurs afin de maximiser l'information recueillie et de minimiser le coût monétaire, Contreras et al. présentent une nouvelle approche pour étudier ce problème sur des segments d'autoroute en utilisant la dynamique linéaire du trafic sur les flux en régime permanent. Pinelli et al. présentent une méthode de conception de réseaux de transport en commun basée sur des données qui s'appuie sur un large échantillon de données de localisation des utilisateurs disponibles sur les réseaux de télécommunication des téléphones mobiles”* [279].

## 2.1.2 De la logistique urbaine au système de management du fret urbain

Nous avons pu le voir précédemment, les Systèmes de Transport Intelligent (STI ou ITS en anglais) sont une solution éprouvée pour la mise en place d'un système complexe interconnecté permettant l'obtention, le traitement et la distribution d'informations aux acteurs du transport. Initialement développés dans l'optique d'améliorer la gestion du trafic routier, ils ont vu leur champ d'action évoluer au fur et à mesure de l'avancée des technologies de la communication et de l'information. Ils se sont également adaptés à l'évolution des besoins dans le domaine du transport routier tels que la coordination des services d'urgences, le suivi des conditions météorologiques et des catastrophes climatiques ou encore l'interconnexion multimodale et l'information aux voyageurs pour faciliter les déplacements, ainsi que dans le cas qui nous intéresse, le transport de marchandises.

Ayant fait ses preuves dans le domaine du transport routier, on voit apparaître le STI au sein de nouveaux domaines du transport, tels que le ferroviaire, le maritime, l'aéronautique et bientôt peut être, le spatial. Le transport de marchandises étant défini par l'INSEE comme *"tout mouvement de marchandises à bord d'un mode de transport, quel qu'il soit. Il se mesure en tonnes-kilomètres ou, sur un trajet donné, en tonnes"* [129], ces nouveaux domaines sont d'autant plus d'opportunités de renforcer l'obtention, le traitement et la distribution des informations sur les marchandises en transit au sein d'un STI.

La livraison de marchandises ou plus généralement la logistique est un domaine d'activité qui a connu de multiples changements et évolutions au cours des dernières années pour s'adapter aux nouveaux modes de consommation survenus avec l'essor des plateformes de vente en ligne et leur stratégie de développement. De plus, il est très probable que ce domaine d'activité continue de muter, de par la hausse générale des prix du carburant (diesel) survenue fin 2021, proche de 9% par rapport au prix observé en situation pré-covid [130] ainsi qu'avec l'essor des nouvelles technologies telles que le véhicule autonome et le drone pour la livraison de marchandises [2] ou encore les batteries électriques pour la mobilité propre [224].

Le transport de marchandises longue distance (principalement sur autoroute) devrait être le premier secteur impacté par la démocratisation des camions autonomes. Le transport sur autoroute offre un cadre de conduite peu complexe, permettant une mise en place plus aisée des verrous technologiques tels que le positionnement du véhicule, la détection des obstacles, la modélisation du comportement dynamique du véhicule, la compréhension de la scène et de son évolution, la planification de trajectoire, la tenue de situation ou encore la connaissance de l'état du conducteur [76]. On peut prendre l'exemple du camion autonome "Semi" de chez Tesla, utilisé par la firme pour ses besoins de logistique interne entre son usine de Fremont (Californie) et sa Gigafactory dans le Nevada, représentant un trajet de plus de 400 km [172].

Cependant, c'est dans le domaine de la logistique urbaine, pour la messagerie classique et de dernier kilomètre, que ces verrous technologiques, techniques (fiabilité, test et validations) et non techniques (acceptabilité personnelle et juridique) sont le plus à même de freiner le développement et la mise en place à grande échelle du véhicule autonome.

### 2.1.2.1 La logistique urbaine

La livraison de marchandises en ville est un sujet qui mobilise de plus en plus l'opinion publique, les pouvoirs publics ainsi que les acteurs du privé, qu'ils soient du domaine du transport ou non. Étudiée depuis plus de 20 ans maintenant, la "logistique urbaine" (L.U.) a été introduite pour la première fois par [225] et [148] puis généralisée par [257] comme :

"Un processus d'optimisation global des activités d'entreposage et de transport dans les différentes zones urbaines, en tenant compte des contraintes du respect de l'environnement, de la congestion, de la sécurité, de la consommation d'énergie dans le cadre d'une économie de marché et de la diversité des parties prenantes de la ville".

À ce jour, il n'existe pas d'organisme de normalisation, qu'il soit institutionnel ou privé, caractérisant la L.U. Ainsi, chaque acteur du domaine (public ou privé) définit la logistique urbaine selon ses besoins. Concernant les communes, celles-ci disposent d'un large panel de possibilités pour restreindre l'accès aux centres urbains, mais en l'absence d'un cadre normatif, elle n'en exploite qu'une faible partie. À cela, se rajoute un effet néfaste, étant que chaque commune peut mettre en place sa propre réglementation, conduisant à des situations pénalisant les transporteurs privés qui ne peuvent s'adapter à chaque réglementation.

Selon la vision la plus largement rependue, la L.U. est associée à la livraison du dernier kilomètre. Elle est la dernière étape de la chaîne logistique en centre urbain et péri-urbain. Elle caractérise les opérations d'acheminement, de traitement, de livraison et de gestion des flux retour.

De plus, en tenant compte du phénomène d'urbanisation, avec plus des trois quarts de la population de la France habitant en ville en 2010 [72], le réseau routier de ces dernières se voit appliquer une double contrainte. La première étant due à l'afflux de nouveaux résidents et la deuxième à l'augmentation du transport de marchandises pour l'approvisionnement des villes. Il apparaît donc nécessaire de rationaliser les flux (qu'ils soient de marchandises ou d'humains) afin de palier au problème de congestion du trafic.

Enfin, la L.U. se doit d'être durable pour contribuer à l'amélioration de la qualité de vie et au respect de l'environnement [73]. Le développement de la L.U. doit avoir comme objectif la diminution de la pollution sonore et de la pollution atmosphérique (CO<sub>2</sub>, Nox, particule Fine). Pour cela, de nouveaux moyens de transport urbain de marchandises sont expérimentés ou mis en place, tels que le transport : par cycle, par voie fluviale, par tramway ou encore par l'utilisation de véhicule électrique et/ou autonome, comme identifié dans le premier article référencé dans [73].

Dans ce contexte, le problème de tournées de véhicules (Vehicule Routing Problem - VRP) doit être adapté pour répondre aux exigences et aux contraintes spécifiques de ces nouvelles technologies.

À cette fin, [265] présente une vue d'ensemble complète sur le problème de routage des véhicules électriques (EVRP). Il commence par une introduction des problèmes EVRP liés aux différentes technologies de batterie. Ensuite, l'étude présente un travail de recherche non-exhaustif sur les variantes possibles de l'EVRP, telles que le problème du plus court chemin énergétique [176], le problème du vendeur itinérant électrique, la flotte de véhicules hétérogènes ou mixtes [141], les véhicules hybrides [265], la recharge partielle, les technologies et stratégies de recharge [141], l'échange de batteries, le problème de routage à deux échelons, le calendrier de recharge et les conditions de trafic dynamique.

### 2.1.2.2 La Smart City

*"Une ville intelligente est définie comme un environnement intelligent qui intègre les technologies de l'information et de la communication et crée des systèmes interactifs. Le système apporte la communication avec le monde physique pour résoudre les problèmes des habitants dans leur agglomération urbaine et assure une meilleure gestion des ressources et de l'espace public. Dans cette perspective, une ville intelligente, plus généralement appelée espace intelligent, désigne un environnement physique dans lequel les technologies de communication et d'information, ainsi que les systèmes de capteurs sont imperceptibles, car ils sont intégrés de manière transparente dans les objets physiques et l'environnement dans lequel les gens vivent, se déplacent et travaillent." [223]*

Le domaine de la logistique continue d'évoluer de par les développements sociétaux et technologiques actuels. Le véhicule autonome est le levier d'innovation qui marquera une rupture majeure autant pour le déplacement des populations que pour le transport des marchandises, et cela, principalement dans les centres urbains. La population urbaine devant croître de manière significative au cours des prochaines décennies, passant de 3,9 milliards d'habitants en zone urbaine à 6,3 milliards en 2050, il apparaît primordial de faire évoluer le transport urbain afin de minimiser son impact sur l'environnement pour que celui-ci soit plus durable.

Nous l'avons vu dans la partie précédente, l'augmentation de la population des centres urbains impacte, selon plusieurs aspects, la mobilité urbaine. Les habitants toujours plus nombreux génèrent, à l'échelle d'une personne, du trafic selon leur besoin de déplacement qu'il soit personnel et/ou professionnel, mais également pour leur besoin d'alimentation en nourriture, ainsi que par leur besoin de marchandises tierces achetées sur des plateformes de vente en ligne.

La mobilité urbaine, dont la congestion est l'indicateur de performance, se dégrade continuellement année après année. Ce phénomène de congestion met en exergue la saturation d'un système ne pouvant s'adapter et croître à l'infini pour répondre aux besoins de nouveaux utilisateurs. De plus, on observe que traditionnellement, le transport des marchandises et des personnes sont abordés séparément. Cependant, en zone urbaine, la route reste le moyen le plus efficace pour assurer le déplacement des personnes et des marchandises, menant les personnes à être en concurrence directe avec les marchandises qu'ils génèrent pour l'accès aux infrastructures routières. La situation actuelle traduit donc que la vision macroscopique de la mobilité urbaine n'est plus appropriée, aussi perfectionnée localement qu'elle soit et qu'une approche systémique doit être envisagée.

La mobilité urbaine, pour évoluer vers une mobilité responsable et durable, doit mettre en avant la mobilité collective comme moyen de transport de base pour les populations urbaines. Cependant, pour qu'une mobilité collective puisse répondre de manière efficace aux besoins globaux de la population, elle doit, paradoxalement, pouvoir s'adapter localement à ces utilisateurs. On peut prendre pour exemple UBER, qui avec une flotte réduite, assure les besoins de déplacement des populations des hyper-centres urbains ou encore du projet CRISTAL [166] qui propose d'utiliser des convois de petits véhicules autonomes pouvant se séparer pour répondre aux besoins de déplacement et ainsi s'adapter à la charge du réseau.

Cependant, dans un environnement aussi complexe, les technologies de l'information et de la communication (TICs ou Information and Communication Technologies – ICTs) sont la clef de voûte dans l'amélioration de la durabilité des transports en contrôlant les systèmes plus efficacement, en facilitant les changements de comportement tout en réduisant la consommation d'énergie. Pour assurer le fonctionnement de telles infrastructures, les TICs qui collectent et assurent la diffusion d'une grande quantité de données s'intègrent à la vision systémique de la mobilité urbaine au travers des Systèmes de Transport Intelligent (STI). Les STI permettent, quant à eux, l'agrégation d'une multitude de sources de données, leur analyse, l'aide à la décision et le formatage des informations à destination des utilisateurs du système pour qu'ils puissent interagir ensemble de manière dynamique.

Suivant cette dynamique de système complexe interconnecté, les STI évoluent dans un contexte technologique fort et varié dans l'objectif de résoudre un large éventail de problèmes auxquels la mobilité urbaine doit faire face. De par les informations cumulées du système, de sa connaissance en temps réel et à la collaboration de l'ensemble des éléments le constituant (véhicule, capteur, personne, objet connecté, etc.), les STI peuvent proposer une réponse appropriée à tout événement modifiant l'état du système.

De plus, outre la remontée d'information permettant d'assurer les besoins de mobilité urbaine des usagers du système, les STI sont à même d'agréger de nouvelles sources de données provenant d'autres parties prenantes évoluant dans le système, dans le but d'assurer sa pérennité. Le transport de marchandises en est le parfait exemple. Concurrençant le transport de personnes dans l'accès et l'utilisation de l'infrastructure routière, l'intégration des données le concernant (au sein d'un STI) ouvre la voie à une gestion efficace de la charge du fret sur le réseau de transport.

### **2.1.2.3 Les gestions STI pour la gestion du fret**

Le transport de marchandises en centre urbain est un secteur d'activité qui, chaque année, prend de plus en plus d'ampleur. Ainsi, les conséquences du transport de marchandises sont la congestion du réseau routier et la dégradation de l'environnement local en terme de pollution sonore et de pollution atmosphérique (CO<sub>2</sub>, Nox, particule Fine). De plus, depuis le début des années 2010, le fret de marchandises en centre urbain connaît une très forte augmentation [73], principalement due au développement des plateformes de vente en ligne.

La Messagerie [71], qu'elle soit classique ou de dernier kilomètre, est le secteur du transport qui est en charge de réaliser les livraisons en centre urbain et péri-urbain. Cette dernière observe une augmentation de 5% [220] du nombre de colis en transit chaque année, qu'il est intéressant de comparer avec le pourcentage du nombre de colis livrés avec succès lors d'une tournée [188]. Ainsi, bien que la quantité de marchandises en transit en centre urbain ne fasse qu'augmenter, le nombre de colis livrés avec succès, ne fait lui, que décroître.

Cette situation interroge certes sur l'évolution du mode de consommation actuel de la population, mais plus encore sur la dégradation de la coexistence entre le citoyen et le flux de marchandises qu'il génère. On observe ainsi se mettre en place un rapport de concurrence au sein du couple Citoyen/Marchandises, mais aussi dans le couple Marchandises/Marchandises, pour l'accès et l'utilisation du réseau routier. De plus, une situation paradoxale se développe, dans laquelle le citoyen dégrade indirectement sa qualité de vie locale, tout en cherchant à l'améliorer.

Les consommateurs ne souhaitent plus se déplacer en magasin pour réaliser leurs achats. Au contraire, ils cherchent à gagner en praticité en achetant en ligne et en se faisant livrer à domicile ou en point relais le plus proche. Cependant, suivant cette logique, les habitants des zones urbaines se retrouvent confrontés à l'augmentation du trafic routier, contraignant leur déplacement ainsi que celui de leurs marchandises. La congestion n'est cependant pas la seule contrainte à laquelle ils doivent faire face, l'augmentation du nombre de véhicules en circulation impliquant une dégradation de l'environnement urbain et de sa qualité de vie intrinsèque, au travers de la pollution (sonore et atmosphérique).

### **Système de gestion de fret**

Nous l'avons vu précédemment, les STI sont un axe fort d'innovation pour le domaine du transport. Mettant en avant une vision systémique de celui-ci, il cherche à répondre aux besoins de mobilité des populations de centres urbains en proposant un système complexe multimodal interconnecté, dans lequel le transport public se reconfigure et s'adapte localement à la charge du réseau [166]. De plus, en intégrant le transport en tant que système, le fret de marchandises est identifié comme co-consommateur de la ressource critique, le réseau routier, au même titre que la mobilité des personnes.

L'intégration du fret de marchandises au sein d'un STI vise à assurer la pérennité et la durabilité du réseau. Pour cela, un système de gestion de fret a pour objectifs de réduire l'impact des marchandises sur la congestion, de faire diminuer la pollution qu'elle soit sonore ou atmosphérique, ainsi que d'optimiser la consommation énergétique. De plus, en s'interconnectant au transport de personnes, il doit permettre de fiabiliser les livraisons et d'améliorer la satisfaction du client, ainsi que la valeur de ce dernier pour le vendeur (un client non satisfait de la livraison ne revenant que rarement sur le site de vente).

[92] proposent de classer les systèmes de gestion du fret selon deux catégories : les systèmes d'exploitation des véhicules commerciaux (CVO) et les systèmes avancés de gestion de flotte (AFMS). Les CVO sont destinés aux échanges d'informations sur la sécurité, la gestion des certificats électroniques et le contrôle électronique en bord de route. Les AFMS, quant à eux, sont conçus pour informatiser et interconnecter les opérations de gestion du fret et de la flotte (au niveau du transporteur) pour automatiser les opérations de transport de marchandises.

Ces deux catégories de système de gestion du fret de marchandises nécessitent l'utilisation de technologies avancées pour assurer les communications entre le(s) véhicule(s), le système de gestion et les tiers. Historiquement, les échanges d'informations ont été assurés grâce au système "inter-organisationnel, d'ordinateur à ordinateur, de documentation commerciale dans un format standard" ou EDI [78] défini au début des années 90. Actuellement, avec l'essor des nouvelles technologies et du numérique ainsi que du développement massif de la quantité d'information transmise de par le monde, ce sont les technologies de l'information et de la communication (TICs) qui ont pris la charge d'assurer leur transfert. Concernant les informations transmises, [183] on identifie sept types d'informations différentes :

- Informations sur le trafic et les infrastructures : Les informations sur le trafic en temps réel améliorent efficacement la fluidité du trafic et l'utilisation efficace des routes CHAP2-38. Les informations concernant l'emplacement des routes, l'état des routes (par exemple, la qualité des routes ou les constructions temporaires), les types de véhicules qui peuvent utiliser la route, les limitations et la congestion et les collisions ou autres incidents sont liées à ce type d'informations sur le transport.

- Information sur la localisation des véhicules et des marchandises : Ce type d'information sur le transport permet le suivi et la localisation du fret à travers le réseau de transport [184]. Ces informations comprennent les notifications concernant l'arrivée du fret chez un acteur, les informations de chargement et de déchargement pour l'expédition du fret, la localisation géographique du fret accessible par les systèmes de localisation et de surveillance de l'état des véhicules et la localisation du fret dans les entrepôts, les terminaux et les ports.
- Informations sur l'état du fret : Ces informations sont liées aux attributs physiques du produit pendant les opérations de transport, y compris lorsque le produit est stocké dans des entrepôts ou lorsqu'il est expédié par des véhicules entre les acteurs du réseau de transport. Les informations en temps réel concernant le niveau de température, le niveau de pression, l'impact, l'humidité ou le niveau de lumière dans le véhicule pendant le transport constituent les sous-catégories de ce type d'information sur le transport. Récemment, les autorités gouvernementales en Europe ont exprimé des préoccupations en matière de sécurité et de qualité concernant la disponibilité de ces informations pour les produits alimentaires [254].
- Informations sur le positionnement du fret : Ces informations sont liées au placement et au séquençage des produits lorsqu'ils sont stockés ou expédiés. Il s'agit par exemple d'informations relatives au positionnement des produits dans les entrepôts, présentées sur une grille à trois axes, et d'informations relatives au placement des conteneurs dans les navires Ro-Ro [168]. Il est essentiel de disposer de telles informations pour assurer la fiabilité et l'efficacité des opérations d'entreposage et de manutention [208].
- Informations sur les opérations d'entreposage et les stocks : Ces informations sur le transport comprennent des informations relatives au nombre d'articles dans les entrepôts, aux commandes des clients pour différents articles, aux temps de chargement et de déchargement pour différentes commandes et des informations sur le contenu des différents entrepôts. L'exactitude du nombre et des types d'articles stockés dans les entrepôts est un paramètre important pour ce type d'information. Différentes études ont évalué la valeur des données d'inventaire pour les acteurs de la chaîne d'approvisionnement [16].
- Informations sur la cargaison : Les informations concernant les types d'articles expédiés, leurs attributs (tels que le modèle, la classe, la taille, la couleur, le poids, le prix et le numéro d'identification, ainsi que d'autres types de données qui dépendent du type d'articles), les informations sur l'expéditeur, les informations sur le destinataire et les informations concernant la quantité d'articles expédiés constituent un facteur important pour le contrôle et la gestion des opérations de transport. Ces informations sont utilisées par les opérateurs de transport tels que les sociétés de transport, les ports et les terminaux, les expéditeurs et les destinataires des marchandises, ainsi que par les autorités telles que les services douaniers aux frontières et la police. Les nouvelles technologies et les nouveaux équipements sont utilisés pour contrôler le fret lors des procédures d'inspection menées par les autorités [68]. Les systèmes de numérisation et d'auto-identification des produits contribuent à la prise en charge de ces informations et à la réduction des erreurs qui y sont associées.
- Informations sur l'identité des véhicules : Les informations telles que le type et la classe des véhicules, leur numéro d'immatriculation et d'autres informations d'identification sont utilisées dans différentes opérations de transport pour la gestion des ressources de transport. Ces informations sont également utilisées par les autorités pour contrôler la sécurité des opérations de transport. La reconnaissance des plaques d'immatriculation est un domaine de recherche important dans le transport et a été largement étudiée au cours des deux dernières décennies [264].

## Les Technologies de l'Information et de la Communication

Les technologies de l'information et de la communication (TICs ou Information and Communication Technologies – ICTs) représentent une amélioration notable dans l'informatisation et l'interconnexion des opérations de gestion du fret et de la flotte. En outre, elles améliorent la sécurité et l'efficacité des opérations de transport de marchandises de par l'amélioration des échanges d'informations entre les acteurs des chaînes d'approvisionnement [106] et citeCHAP2-47. De plus, en favorisant l'intégration du transport intermodal entre les acteurs de la chaîne logistique, elles favorisent également le développement des centres de distribution urbains.

En 2004 [106] propose une catégorisation des fonctions des TIC pour les opérations de transport de marchandises. Selon celle-ci, les TIC influent sur la gestion des ressources de transport, la gestion des opérations des ports et des terminaux, le repérage et le suivi. Concernant la gestion des ressources de transport, cette fonction est liée au contrôle des ressources telles que les unités de charge, les camions, les trains, les navires et les conteneurs. Cette catégorie comprend les TIC destinées à améliorer le flux d'informations utilisées pour les systèmes de gestion des ressources, les systèmes d'information sur le fret pour les terminaux de fret et les systèmes intégrés de planification des itinéraires avec communication en ligne. L'application de ces systèmes a permis de réduire les délais de livraison aux clients et de diminuer les erreurs [106]. Ensuite, la gestion des opérations des ports et des terminaux permet de contrôler le flux de matériel dans les ports et les terminaux. Elle s'appuie sur des systèmes d'optimisation des performances des ports et des terminaux, des TIC pour les terminaux intermodaux et des systèmes d'échange de données. Différentes technologies visent à améliorer cette fonction dans l'objectif de diminuer les taux d'erreur et d'augmenter la vitesse de chargement [74] et [125]. Enfin, au travers du suivi et du repérage du fret et des véhicules, l'objectif recherché est de surveiller et de contrôler l'emplacement des véhicules et des marchandises dans le réseau de transport. Différents systèmes d'information existent pour contrôler et réguler l'emplacement, la condition physique, la position et la sécurité des marchandises et des véhicules [32].

## Le fret intelligent ou Smart Transportation Systems

Le nombre croissant de participants aux opérations de transport a conduit à une complexité accrue des réseaux logistiques, avec une demande accrue de flux d'informations entre les participants aux installations de distribution [246]. En outre, la prise de conscience des limites de capacité des systèmes de transport actuels a été un élément moteur dans la recherche de méthodes permettant une utilisation plus efficace des capacités des infrastructures actuelles. Cette demande a été à l'origine de l'élaboration d'un nouveau type de système de gestion des transports, à savoir le système de transport intelligent (ITS), qui permet de transférer plus efficacement les données et les informations entre les partenaires, d'accroître la visibilité du fret, de mieux surveiller les activités concernées et d'augmenter les interactions avec les informations de l'infrastructure logistique [246]. L'application des STI crée de plus grandes opportunités pour améliorer la performance de tous les modes de transport [207]. [40] ont défini les STI comme "les technologies, les infrastructures et les services les plus récents ainsi que les méthodes d'exploitation, de planification et de contrôle qui sont utilisés pour le transport de passagers et de marchandises". Différents domaines technologiques, tels que les communications, le matériel informatique, les systèmes de positionnement, les télécommunications, les technologies des véhicules, l'électronique et les capteurs, se sont intégrés et ont façonné le concept des STI. Ce support permet d'améliorer le rendement des opérateurs de transport. Les STI sont utilisés dans différents domaines liés au transport de marchandises, tels que la gestion et contrôle de la flotte, contrôle de la position, de l'état, du placement et de l'identification des marchandises et des véhicules, et logistique urbaine. Ces systèmes peuvent accroître la fluidité de la circulation des camions, offrir des passages frontaliers sans faille et assurer des niveaux de contrôle et de signalement adéquats qui conduisent, à leur tour, à des niveaux de sécurité plus élevés et à une plus grande efficacité des systèmes de transport [150] et [39]. Ils ont également le potentiel de créer des services à valeur ajoutée pour les entreprises et les consommateurs [237].

## STI comme outil de gestion du fret

Toujours de par l'étude menée par [183], celui-ci identifie 9 types différents de STI dédié au transport de marchandise.

- Systèmes de contrôle et de surveillance du trafic : Ces systèmes sont créés pour contrôler et gérer le flux de trafic en fournissant des informations sur les situations de trafic, telles que les collisions, les encombrements, la vitesse du flux de trafic et les véhicules sur les routes, à utiliser par les autorités ou par les prestataires de services logistiques. Ces informations sont utilisées pour contrôler la sécurité et la sûreté des opérations de transport. Différentes technologies telles que les feux de signalisation intelligents, les panneaux de signalisation variables et les caméras pour la reconnaissance des plaques et la mesure de la vitesse équipées de capteurs sont utilisées dans ces systèmes d'information. Ces systèmes peuvent avoir une incidence sur la planification et la gestion des ressources des véhicules en améliorant la sécurité et l'efficacité des opérations de transport. En utilisant de tels systèmes, les acteurs peuvent envoyer des mises à jour sur leur heure d'arrivée ou des notifications de retard, ce qui améliore l'efficacité des camions, des ports et des opérations terminales. La performance environnementale des opérations de transport est améliorée par la diminution du temps de transport et se traduit par un flux de trafic plus harmonisé [162].
- Systèmes de poids en mouvement (WIM) : Ces systèmes sont créés pour contrôler et peser les véhicules afin d'accroître la sécurité des transports et de réduire les dommages causés par les véhicules en surpoids. Les systèmes WIM peuvent améliorer les performances en éliminant les temps d'arrêt des camions sur les systèmes statiques de contrôle du poids. La législation, la réglementation et l'administration des transports sont quelques-unes des applications de ces systèmes. Outre le coût de l'entretien des routes, les dommages causés aux infrastructures entraînent des menaces pour l'environnement. [134] ont identifié les avantages des systèmes WIM et leur importance pour améliorer les opérations de transport. Selon leur étude, les systèmes WIM réduisent le risque d'accidents impliquant des véhicules surchargés, les dommages causés aux infrastructures telles que les routes ou les ponts, et font gagner du temps aux conducteurs de camion et à la police.
- Systèmes de réservation d'espaces de livraison : Ces systèmes permettent de réserver l'espace de stationnement pour un véhicule spécifique afin de charger ou de décharger des marchandises pendant une période donnée. Ces systèmes sont très utiles dans les zones urbaines où l'espace est limité en raison de la présence de détaillants dans les grands centres urbains. Ils peuvent également être utilisés pour les terminaux. Ces systèmes contribuent aux dimensions de performance environnementale et d'efficacité/efficience en éliminant le temps passé, sans valeur ajoutée, à chercher des places de stationnement. [259] ont discuté de la nécessité de systèmes intelligents de réservation de places de stationnement et ont proposé des stratégies pour la conception de tels systèmes. Selon leur étude, l'application de ces systèmes réduit le nombre total de déplacements de véhicules pendant une période donnée (ce qui contribue à la performance environnementale) et maximise l'utilisation de l'espace de stationnement (ce qui contribue à l'efficacité des infrastructures de transport).
- Systèmes de localisation et de surveillance de l'état des véhicules : Ces systèmes fournissent des informations en temps réel sur la position des véhicules sur la carte en transmettant les informations par satellite. Ces informations sont mises à la disposition des utilisateurs via l'Internet. En installant des capteurs sur le conteneur du véhicule, le système peut fournir des informations en temps réel sur l'état du fret pendant le transport. Il a la capacité de contrôler en temps réel, que la porte du conteneur soit verrouillée ou déverrouillée. Il permet une meilleure gestion de la flotte et un meilleur suivi et repérage des marchandises et des véhicules. Par exemple, le fait de disposer d'informations en temps réel sur l'emplacement des camions sur les routes permet aux prestataires de services douaniers d'identifier l'heure d'arrivée des véhicules et de préparer les documents aux frontières, ce qui réduit le temps d'attente des camions derrière les frontières. Grâce à ces informations, les opérateurs portuaires peuvent envoyer des mises à jour de l'heure d'arrivée prévue aux camions lorsque les navires sont retardés. En outre, ces systèmes permettent aux conducteurs d'identifier les zones de stationnement sûres et dangereuses. Ils conduisent à l'amélioration de la sécurité et de la sûreté des transports. Les dimensions du transport prises en charge par ces systèmes sont l'efficacité/efficience et la sécurité/sûreté. Selon [167], l'application de systèmes intégrés

de suivi des véhicules est utile en tant que dimension des systèmes d'aide à la décision pour la gestion des ressources de transport et la gestion logistique.

- Systèmes de planification d'itinéraires : Ces systèmes sont utilisés pour planifier les itinéraires de transport en fonction des situations routières. Ainsi, l'efficacité des opérations est accrue en fournissant un meilleur niveau de service aux clients grâce à la réduction des risques de retard. Grâce à la réduction des temps d'attente sur les routes, les opérations deviennent plus écologiques. L'utilisation de tels systèmes permet une meilleure planification des ressources pour les opérateurs de transport. Selon [258], le routage et la programmation dynamiques des véhicules profiteront aux transporteurs en réduisant leurs coûts, aux clients en offrant un meilleur niveau de service et à l'environnement en réduisant la congestion du trafic.
- Systèmes de surveillance et de contrôle du comportement de conduite : Ces systèmes la vitesse et l'accélération des conducteurs pendant les opérations de transport et fournissent des informations en retour pour améliorer la conduite. Ce retour d'information permet de réduire la consommation de carburant des véhicules et donc de rendre les transports plus écologiques. Il contribue donc à la gestion des ressources de transport. En outre, l'utilisation de technologies permettant d'améliorer la concentration des conducteurs entraîne une réduction des accidents et une amélioration de la sécurité des opérations [173].
- Systèmes de prévention des collisions : Des technologies telles que les capteurs sont utilisées dans ces systèmes pour réduire la probabilité d'accidents. Par exemple, des capteurs installés sur une voiture peuvent avertir les conducteurs lorsqu'ils se rapprochent d'un objet. Un autre type de système de prévention des accidents peut détecter des objets et fournir des informations sur la probabilité d'accidents en mesurant la distance entre les véhicules via l'infrastructure de transport. Si un piéton saute devant un véhicule, un signal est envoyé à l'autre véhicule et permet d'éviter un accident. Ces systèmes augmentent la sécurité des opérations de transport en réduisant la probabilité d'accidents. Les systèmes de détection des piétons, la nuit, sont un exemple de ce groupe. [266] ont décrit comment la structure des systèmes intelligents véhicules/autoroutes (IVHS) augmente la sécurité des transports. En outre, [31] ont démontré que l'application de systèmes de régulation de vitesse entraîne une réduction du nombre d'accidents de la circulation.
- Systèmes de surveillance de la localisation du fret : L'application d'étiquettes RFID (identification par radiofréquence) sans contact direct avec la lumière pour la lecture a créé un avantage pour les opérations de transport. L'installation de lecteurs RFID sur les véhicules ou les portes des entrepôts permet de contrôler automatiquement les mouvements de marchandises et de les enregistrer dans les bases de données des systèmes d'information. L'utilisation de systèmes d'identification automatique (auto-ID) a apporté de nouvelles capacités telles que la lecture d'un grand nombre d'étiquettes en même temps, et a réduit le nombre d'erreurs causées par la saisie manuelle des données. Elle a également permis de réduire les inexactitudes concernant le nombre d'articles dans les stocks pendant l'entreposage ou dans les véhicules pendant l'expédition [119]. L'utilisation de systèmes de suivi et de localisation basés sur l'identification automatique permet de localiser facilement les articles dans les grands entrepôts, les ports et les terminaux. L'utilisation de ces systèmes pour réduire le temps de chargement et de déchargement et pour augmenter la précision des informations sur les marchandises permet une meilleure gestion des ressources. Ces systèmes améliorent la sûreté et la sécurité des articles transportés en augmentant la visibilité de la localisation du fret. Par exemple, les technologies d'identification automatique peuvent contribuer à réduire le nombre d'articles volés ou à distinguer les faux articles des articles originaux. De même, l'utilisation de tels systèmes pour la gestion des déchets contribue à une meilleure performance environnementale. Selon [33], l'application de ces systèmes aux opérations d'entreposage permet d'améliorer l'efficacité du travail, de réduire le coût des opérations, d'accroître la satisfaction des clients et de gagner du temps dans les activités de gestion des ressources.
- Systèmes de surveillance de l'état du fret : L'application de différents capteurs pour mesurer les attributs physiques des marchandises, tels que la température, l'humidité, le niveau d'impact, le niveau de lumière et le niveau de vibration, peut créer des améliorations dans les opérations de transport. Récemment, on a constaté une augmentation de l'application de ces systèmes pour le contrôle des médicaments, des marchandises dangereuses et des aliments frais. La combinaison des capteurs avec des technologies d'identification automatique telle que la RFID offre de nouvelles possibilités pour un meilleur contrôle et une meilleure surveillance

du flux de matériel entre les différents acteurs des chaînes d’approvisionnement. [137] ont montré que l’application de la technologie RFID combinée à des capteurs permet d’améliorer la qualité des aliments transportés. L’application de tels systèmes permet d’améliorer l’efficacité des opérations de transport. Leur utilisation pour contrôler l’expédition de produits chimiques, d’explosifs et d’autres marchandises dangereuses peut se traduire par un transport plus sûr et plus écologique.

Les STI de transport de marchandises utilisent différents types d’informations concernant les véhicules, les infrastructures de transport et les marchandises transportées. Ces informations sont enregistrées dans les bases de données des systèmes d’information de différents acteurs des réseaux de transport, et les autorités et les acteurs partagent ces informations à des fins différentes. En outre, les STI de transport de marchandises prennent en charge différents types d’informations concernant les opérations de transport. Ce soutien peut prendre la forme d’une augmentation de la disponibilité, de la visibilité, de l’opportunité, de la rapidité et de la précision des informations relatives au transport des produits. Cela permet d’améliorer les opérations de transport en soutenant différentes fonctions de transport et en améliorant différentes dimensions de la performance des transports.

### **Performance des STI**

L’évaluation des performances d’un STI pour les opérations de transport de marchandises en zone urbaine, se concentre sur son impact économique, social et environnemental. Afin de pouvoir mesurer l’impact d’un STI sur chacun de ces domaines, [11], [260], [268], [134] proposent trois critères d’analyses, définis comme ”efficacité et efficience”, ”prévention et sécurité” et ”performance environnementale”. Le premier critère ”efficacité et efficience” évalue le déploiement d’un STI quant aux moyens mis en œuvre (véhicules, humain, etc.) pour répondre de manière optimale et appropriée aux besoins de l’infrastructure routière. Par exemple, l’augmentation de l’efficience et de l’efficacité peut entraîner des avantages économiques, tel que la réduction du temps de déplacement des camions. Le deuxième critère ”prévention et sécurité” évalue la manière dont un STI va permettre d’améliorer la protection des marchandises et des personnes transportées. Enfin, le troisième critère ”performance environnementale” évalue la réduction de l’impact du fret de marchandises (sonore et atmosphérique) sur son environnement. L’amélioration de la performance environnementale peut également amener l’amélioration des aspects sociaux et économiques.

### **Les données dans les STI**

Le développement d’un système de transport intelligent pour le fret de marchandises, et particulièrement en centre urbain, repose sur l’utilisation d’une grande quantité de données provenant de multiples sources, diverses et variées, qui génère des flux de données brutes, temps réel et ininterrompus que le STI peut agréger, stocker et utiliser pour assurer le fonctionnement de ce système complexe.

L’étape primordiale avant toute mise en place d’un STI de fret de marchandises en zone urbaine est de s’assurer de la disponibilité de données et que celles-ci ont correctement été identifiées comme indispensables au projet. [217] met en avant l’importance des sources de données ainsi que des données qu’elles génèrent pour les planificateurs : ”De nombreuses organisations de planification métropolitaine (MPO) ont identifié le manque de données robustes et précises sur le fret comme une contrainte majeure dans la conduite d’une planification significative du fret.”

Dans cette recherche de disponibilité de la donnée, [97] proposent un ensemble de recommandations générales pour palier au problème de disponibilité de la donnée dans l’objectif d’analyser et de planifier le trafic urbain :

- *”Les problèmes abordés doivent être clairement définis. Les objectifs de planification et/ou de modélisation doivent être clairement définis avant toute autre étape. Ensuite, ceux-ci doivent être confrontés aux sources de données disponibles afin d’indiquer les ressources manquantes, suivies par le développement d’un plan de collecte de données organisant les efforts à venir et fournissant un point de référence pour l’équipe impliquée.”*
- *”Seules les informations directement nécessaires doivent être collectées. On a tendance à obtenir n’importe quelle information disponible. Il est également conseillé d’évaluer les capacités internes d’analyse et de traitement des données afin d’éviter d’obtenir des résultats périmés du potentiel d’analyse qui sont inadéquats. Ceci est particulièrement important lorsque des mises à jour régulières des données sont prévues.”*

- *”Il est conseillé de rechercher de nouveaux partenaires ou de nouvelles sources de données. De nombreuses initiatives réussies en matière de fret urbain reposent sur un partenariat public avec des organisations de détaillants, des chambres de commerce, des opérateurs logistiques, des organisations, etc. Un exemple de ce type de partenariat peut être les partenariats Transport for London Freight Quality et d’autres formes de coopération publique et privée”* [165].

De plus, outre le besoin de disponibilité de la donnée et son caractère bloquant, [271] insistent également sur le besoin crucial d’identification correcte du type de données nécessaires et les plus demandées, lors du déploiement d’un STI. Pour cela, ils ont mené une enquête auprès de 40 acteurs majeurs du domaine, afin d’identifier leur besoin en données de fret urbain. Au travers de cette enquête, l’objectif secondaire était aussi d’évaluer le niveau de déploiement des technologies STI et de l’utilisation des données dans leurs activités de planification urbaine. Ainsi, grâce aux réponses de 18 MPO qui ont répondu à l’enquête, ils ont pu identifier les besoins suivants :

- ”26% d’entre eux ont intégré les composantes passagers et fret dans leur planification”
- ”Entre 49% à 94% ont indiqué avoir besoin des déplacements ”origine-destination” et de détails sur les itinéraires, de détails sur les expéditions et d’informations sur les types de marchandises, tandis que la disponibilité des données sur le fret variait de 6% à 46%”
- ”Entre 51% et 100% ont indiqué qu’ils avaient besoin de données sur les autoroutes et les camions, les chemins de fer, l’air et l’eau”
- ”Entre 0% et 40% ont indiqué avoir à disposition des données sur leurs modes de transport”
- ”Entre 82% et 97% ont indiqué avoir besoin de données sur les installations de transfert terminal/intermodal, alors que la disponibilité de ces données variait de 3% à 18%”

Cette étude permet donc de confirmer le manque de données disponibles et la difficulté des MPO à se les procurer. Cependant, les STI peuvent répondre d’eux-mêmes à leur besoin de données. Ils peuvent jouer un rôle primordial dans la collecte et la mise à disposition d’informations sur l’état du système routier. Au moyen d’outil embarqué pour enregistrer les informations sur l’état du trafic, la météo ou encore les données GPS. Celles-ci peuvent toutes être remontées sur un sous-système d’un STI pour être stockées et mises à disposition d’entreprises et/ ou collectivités locales.

[217] a identifié un ensemble de STI qui mesurent et fournissent des données. [118] ont étudié différents STI qui fournissent des données sur le flux des camions dans l’État de Washington, notamment l’information sur le temps de déplacement au niveau du corridor, estimé par des transpondeurs de suivi le long des ports, des autoroutes et à la frontière entre l’État de Washington et la Colombie-Britannique, cinq dispositifs GPS installés dans les camions et le vaste système de surveillance et de contrôle des autoroutes en boucle du WSDOT. Ils ont noté qu’il est difficile d’obtenir des quantités suffisantes de données GPS de manière rentable. Comme ces sources ne mesurent pas la même chose au même moment, il peut y avoir des incohérences entre les résultats, même pour un même tronçon d’autoroute. Ils ont conclu que l’intégration des données provenant de toute la gamme de dispositifs STI offre potentiellement une description globale plus complète et plus précise des flux de marchandises et de camions. [245] ont étudié les méthodologies d’extraction et d’application des données spécifiques au fret dans l’analyse comparative des projets de fret dans l’État de Washington. Le Freight Mobility Strategic Investment Board (FMSIB) de l’État de Washington a déployé des technologies de systèmes de transport intelligents (STI), à savoir le système mondial de localisation (GPS) et l’identification automatique des véhicules (AVI), dans le but déclaré de recueillir des données spécifiques au fret. Un examen des données recueillies pour le test d’évaluation comparative du FMSIB révèle que les deux sources de données peuvent soutenir le processus de planification du fret. Les temps de parcours et l’analyse préliminaire des itinéraires sont possibles en utilisant les données GPS et CVISN-AVI. Les mesures de volume n’ont pas été possibles avec les deux sources de données. Les deux sources de données posent également des problèmes pour assurer un ensemble de données statistiquement significatif - avec le GPS, il est souvent difficile de recruter des transporteurs routiers prêts à participer, et avec le CVISN-AVI, le nombre de points de données est lié au nombre de véhicules équipés de transpondeurs.

Un autre exemple de STI pour la captation et la remontée de données sur l'état du transport est la "Régie des Transports du Territoire de Belfort" (RTTB) qui a choisi d'équiper l'ensemble de ces bus de système de géolocalisation et de prise d'information temps réel de l'état du véhicule (vitesse, accélération) ainsi que des informations météorologiques. L'ensemble de ces informations brutes sont remontées sur un système sur lequel les informations sont centralisées pour être utilisées en interne et mises à la disposition de ses partenaires.

Enfin, l'exemple de la RTTB met en avant l'un des principaux freins à la disponibilité de la donnée, son partage, de par son caractère public ou privé. Selon [201] *"les caractéristiques des flux de trafic et autres informations connexes sont le domaine naturel des organismes du secteur public responsables de la planification des transports. Cependant, les données détaillées sur la chaîne d'approvisionnement appartiennent, dans la plupart des cas, au secteur privé : détaillants, opérateurs logistiques, entreprises de transport, etc. La fusion de ces deux sources peut être bénéfique pour tous les acteurs souhaitant prendre part et développer le domaine du transport"*.

Une fois les sources de données identifiées et les types d'informations correctement sélectionnés, il est nécessaire de se pencher sur la qualité des données. Selon [201], *"la qualité des données d'entrée du système de planification du fret est cruciale, elle permet de concevoir des mesures robustes, basées sur des prédictions fiables et des résultats quantifiables"*.

Bien identifier les sources et sélectionner les types de données sont la première étape. Cela fait, il est possible de remonter de l'information en grande quantité, rapidement et de la stocker sur le long terme, notamment grâce aux TICs. La qualité de la donnée se mesure au travers de ses caractéristiques intrinsèques, telles que l'exactitude, l'exhaustivité, la cohérence, la validité, l'actualité, l'intégrité, la clarté ou même sa sécurité. La qualité des données peut être dégradée selon plusieurs axes étant la description des données, avec des conflits entre noms d'objets ou des imprécisions sur la définition des objets ou selon la donnée en elle-même, avec des valeurs nulles, des doublons, des valeurs anormales, des données obsolètes ou des données mal agrégées. La gestion de la donnée en interne peut également être source de dégradation de la qualité de celle-ci.

Cependant, outre la qualité intrinsèque des données, il faut également prendre en compte que celles-ci peuvent volontairement être détériorées, dans le bien commun du respect de la vie privée. Ainsi, toujours selon [201] *"les sources de données publiques utilisées pour l'estimation des modèles comportent un nombre considérable d'observations qui sont supprimées en raison des politiques de divulgation des données. Ces informations manquantes sont donc imputées synthétiquement, plutôt qu'estimées sur la base d'un échantillonnage de données. De même, l'estimation des réponses des transporteurs de fret aux mesures politiques mises en œuvre par la municipalité est difficile pour les modélisateurs en raison du comportement de ces acteurs dans le cadre de la coordination et de la concurrence dans l'économie de marché"*. Ainsi, la disponibilité et la qualité des données sont des facteurs critiques influençant la planification du fret urbain dans la mise en œuvre des STI.

## 2.2 SURATRAM et la place des Systèmes de Transport Intelligent

Soucieux de développer le transport de marchandises en centre urbain pour que celui-ci s'intègre dans la démarche de développement social, économique et écologique des villes, le projet SURATRAM (Système Urbain et Rural Autonome de TRansport de Marchandises) innove en promouvant le transport de marchandises tout électrique et autonome, couplé aux dernières avancées de la logistique urbaine.

Le projet SURATRAM pose les bases d'un nouveau système de transport intelligent de marchandises à destination des habitants des centres urbains et péri-urbains, ainsi que des professionnels opérant dans ce secteur. Ce nouveau système est dit complexe, car il repose sur plusieurs niveaux de briques technologiques.

Le premier niveau, dit élémentaire, regroupe un ensemble de briques technologiques dites primordiales, qui correspondent aux technologies en connexion directe avec l'environnement et les utilisateurs du système. Cet ensemble de briques pluridisciplinaires, nécessite des compétences variées dans des domaines comme celui du véhicule électrique et de l'intelligence artificielle au travers de l'optimisation et du véhicule autonome.

Le deuxième niveau traite de l'interconnexion du système. Pris indépendamment, chacune des briques primordiales assure le bon fonctionnement de sa mission. Cependant, elles doivent aussi assurer une remontée d'informations constante et temps réel vers la brique de stockage de la couche intermédiaire, jouant le rôle d'entrepôt de données. Cette remontée d'informations doit être sécurisée et le stockage certifié pour ne pas compromettre la viabilité du système.

Le troisième niveau est défini comme couche de haut niveau. Il a affaire à la gestion de l'information et à la prise de décision. Il définit la manière dont les données de l'entrepôt doivent être filtrées pour être mises à disposition de la brique d'analyse et d'interprétation, alimentant à leur tour des algorithmes de prise de décision. Ces algorithmes doivent aider à la gestion du système de livraison et d'enlèvement des marchandises en temps réel.

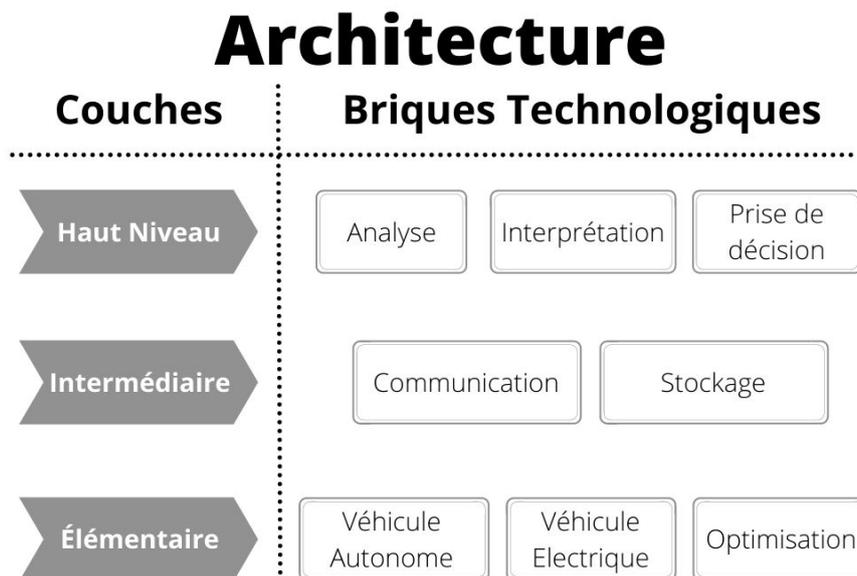


FIGURE 2.5 – SURATRAM - Architecture

En abordant le transport de marchandises en zone urbaine et péri-urbaine, sous l'angle des Systèmes de Transport Intelligent (STI), on cherche à développer une vision systémique du domaine afin de prendre en compte l'ensemble des sous-systèmes avec lesquels il interagit directement ou indirectement. L'objectif, derrière cette approche, est de pouvoir optimiser le transport de marchandises en ayant une connaissance globale du système, et non seulement centrée sur un aspect donné. Ainsi, avant de pouvoir prendre une décision quant à l'optimisation du système, il faut que chacune des briques technologies de la couche élémentaire assure leur bon fonctionnement.

Concernant le domaine de l'optimisation, le système développé a pour but d'intégrer les flux de livraison et d'enlèvement de marchandises en une seule application. Dans cette optique, il doit permettre la cohabitation d'un système d'optimisation traditionnel avec un système d'optimisation dynamique, temps réel, pour assurer la livraison et l'enlèvement de marchandises.

Le système d'optimisation traditionnel, qui se base sur l'utilisation de méta-heuristique, aura la charge de déterminer une tournée permettant de livrer l'ensemble des colis. Cette tournée sera déterminée grâce à une optimisation multi-critère. Les critères en jeux seront issus du système routier et de la qualité de son trafic, ainsi que du domaine des batteries de véhicule électrique. Enfin, la tournée sera réalisée par la flotte de véhicule électrique autonome.

Le système d'optimisation dynamique intervient sur deux aspects différents du VRP. Le premier aspect concerne le véhicule, lorsque celui-ci est en tournée. L'optimisation dynamique, en temps réel, doit permettre l'adaptation aux conditions de circulation, grâce à l'ensemble des informations collectées (passé et présent), pour prendre la décision de re-router ou non le véhicule, afin de minimiser l'impact de la congestion sur les performances du système. Le deuxième aspect concerne le système en charge de l'enlèvement des marchandises. Il doit permettre de répondre dynamiquement à leur mise à disposition, pour que celles-ci soient enlevées lorsque les véhicules sont en tournée. Pour cela, en fonction du résultat d'un algorithme de prise de décision, un des véhicules de la flotte sera dérouté vers le colis à enlever afin de maximiser l'utilisation de l'espace de stockage dudit véhicule.

De plus, l'aspect véhicule autonome du projet met en avant des besoins d'autonomisation élevés (niveau 5 du système SAE) pour un déploiement sûr et sans encombre en zone urbaine et péri-urbaine. Bien que le projet s'appuie sur des technologies déjà établies et qui sont déjà déployées sur les véhicules de série, comme le parking automatique ou le maintien à distance et en ligne, d'autres techniques et technologies sont toujours en cours de recherche et de développement telles que la conduite en convoi ou encore la reconnaissance d'image pour l'interprétation de la scène dans laquelle le véhicule évolue et la prise de décision. De plus, à l'instar de systèmes de transport intelligent, forts, (comme celui de l'entreprise Tesla), ils revêtent une complexité importante qui n'a toujours pas été démontrée comme fonctionnelle. Ainsi, les verrous autour du véhicule autonome, pour ce projet, se concentrent tout d'abord sur l'interaction avec les acteurs du transport public urbain (bus, tram, etc.), ainsi qu'avec l'ensemble des autres utilisateurs du transport public urbain. Si l'analyse de l'image pour l'identification de l'acteur auquel s'attacher n'est plus un problème, au vu de l'état de la technique actuelle, l'interprétation globale de la scène pour identifier et suivre les piétons (adultes, enfants), animaux ou encore cyclistes, pour appliquer les bonnes décisions est actuellement un problème auquel font face les plus grosses entreprises technologiques comme Tesla ou encore Google. La conduite en convoi (ou platooning) et la multi-configuration font également partie des techniques développées en laboratoire, dans l'objectif de déterminer des mises en œuvre simples, dynamiques et auto-adaptatives à une situation donnée. Au sein du CIAD à l'UTBM, trois thèses ont été menées entre 2010 et 2017 sur la conduite multi-véhicule, la conduite en convoi et enfin la prise de décision pour la conduite en convoi. L'objectif ici était de développer un ensemble, de techniques et méthodes, basé sur l'utilisation d'agent réactif pour une adaptation dynamique à la scène. Enfin, en se basant sur les travaux déjà réalisés, il reste à établir les techniques et méthodes pour réaliser un décrochage purement logiciel d'un véhicule à un autre et le retour à la navigation autonome totale du véhicule, pour ensuite se stationner ou inversement, sortir de stationnement et réaliser un accrochage sur un véhicule à l'arrêt ou en mouvement.

Pour finir, le véhicule électrique comme moyen de déplacement est certes un concept qui remonte au 19e siècle, cependant sa généralisation en tant que véhicule de transport journalier est une problématique actuelle. Initialement, le principal frein au développement des véhicules électriques était leur batterie, limitée par une capacité énergétique faible et un coût de fabrication et de vente élevé, qui n'offrait ni l'autonomie nécessaire, ni un prix abordable pour leur adoption. Cependant, l'arrivée des batteries au lithium a révolutionné le domaine apportant une capacité énergétique élevée à bas coup. Suite à cela, le frein à l'adoption de la technologie des véhicules à batterie, s'est déplacé sur l'utilisation de cette dernière. En effet, les constructeurs prônent une utilisation du véhicule électrique comparable au véhicule thermique, calquant l'utilisation de la batterie sur le modèle du réservoir d'énergie fossile que l'on peut vider et remplir aux besoins. Cette considération occulte complètement le phénomène de dégradation des batteries chimique, qui diffère selon le scénario de décharge, mais aussi suivant le scénario de recharge, ainsi que selon la manière dont le véhicule est utilisé. Cette situation participe ainsi actuellement à la dégradation de millions de batteries de par le monde, que l'on ne peut actuellement pas recycler dans la majorité des cas, soit de par le coup économique toujours élevé du recyclage ou tout simplement de par les connaissances liées aux différentes technologies de batteries existantes. Au travers de ce projet de recherche, l'objectif est de développer une méthodologie complète pour dimensionner au mieux la taille de la batterie, en fonction du cas d'utilisation auquel elle doit faire face, en considérant le phénomène de vieillissement. Ainsi, à l'aide d'outils d'optimisation et en considérant un scénario de décharge donné et un scénario de recharge donné, il est possible de réaliser un dimensionnement de batterie qui minimise le phénomène de vieillissement pour une utilisation donnée, permettant ainsi de maximiser la durée de vie de cette dernière.

La remontée d'informations est le point clef des Systèmes de Transport Intelligent. Elle permet la mise à disposition de données sur l'état courant du système, puis une fois stockées, elles permettent l'analyse de l'antériorité du système. Cependant, les données transmises par l'ensemble des blocs technologiques de la couche élémentaire, pour être utilisables, doivent avoir été transmises de manière sécurisée et certifiée. La sécurisation des données se joue autant au niveau du véhicule que du système d'information (SI). Concernant le véhicule, les données captées doivent être exactes, donc correspondre à l'équipement à bord du véhicule. De plus, l'accès au véhicule, aux équipements et à l'ordinateur de bord doit être sécurisé pour éviter les accès non autorisés, la modification non désirée ainsi que la disparition de données. La transmission est également un sujet sensible, les données pouvant être perdues par le protocole de communication en lui-même, ou encore captées par un tiers pour être altérées dans le but de polluer la base de données ou encore de déclencher des réponses critiques de la part du système. Enfin, au sein du SI lui-même, la donnée doit être certifiée (rendue impossible à la modification) pour garantir le bon fonctionnement du système, ainsi que son contrôle éventuel.

Enfin, si le point clef d'un STI est la transmission d'informations en provenance des sources de données vers l'entrepôt de données, leur utilisation dans un système de prises de décisions pour optimiser un domaine en considérant toutes ses composantes, reste la motivation première dans la conception et le déploiement d'un STI. Pour être capable de re-router un véhicule durant sa tournée, il faut être capable d'agréger les données en provenance de l'ensemble du réseau routier de la zone exploitée. De plus, cela requiert des données stockées sur le long terme, pour que l'analyse de ces dernières aide à déterminer des schémas de congestion du trafic en fonction de critères comme les heures d'affluence de la journée, les jours de forte affluence ou encore selon la saisonnalité. Suite à cela, étant capable de prédire les conditions de circulation auxquelles le véhicule devra faire face, le système devra prendre la décision de re-router ou non le véhicule sur une autre voie de bus. La prise de décisions concerne également l'enlèvement de marchandises durant la tournée du véhicule. Pour cela, le véhicule devra transmettre les données sur son état courant, comme son volume de transport de marchandises libre, ainsi que sa quantité d'énergie restante. Ces informations permettront au système de savoir s'il peut être dérouter à un instant donné ou si attendre, qu'il soit plus loin dans sa tournée, peut être un avantage. De plus, la gestion de l'énergie étant un élément critique pour le phénomène de vieillissement de la batterie du véhicule, le système de prise de décisions devra être capable d'identifier si le fait de dérouter le véhicule, pour récupérer des marchandises, a un impact acceptable sur le vieillissement de la batterie.

## 2.3 Quels verrous scientifiques pour SURATRAM ?

Le développement d'un nouveau système de transport intelligent de livraison et d'enlèvement de marchandises en zone urbaine est un réel défi, complexe, qui répond à des contraintes technologiques multiples et pluri-disciplinaires, telles que l'optimisation du flux de marchandises, l'utilisation de véhicules autonomes couplée à la gestion énergétique d'un véhicule électrique. Ce projet s'intègre dans une vision systémique du transport. De par ce fait, outre le développement de chacune de ces briques technologiques, elles doivent aussi s'intégrer dans un système général pour alimenter des algorithmes de prise de décisions pour assurer le bon fonctionnement du système.

### 2.3.1 Le véhicule autonome

*"La conception et le développement de véhicules autonomes et connectés, d'un niveau d'autonomie de plus en plus élevé, posent de formidables défis technologiques et scientifiques. Les mathématiques, le génie logiciel, l'intelligence artificielle ainsi que la cybersécurité sont parmi les principaux domaines des sciences du numérique impliqués."* [128]

Le projet SURATRAM vise le déploiement d'une petite flotte de véhicules autonomes se déplaçant en convoi, en suivant les bus, le long de leurs voies réservées. Une fois à proximité d'un arrêt de bus, ils auront la possibilité de stationner de manière autonome sur un espace dédié, pour assurer leur mission de retrait ou d'enlèvement de marchandises. Un tel projet nécessite de déployer des techniques de navigation autonome avancées pour répondre à la problématique de la conduite en convoi, de l'accrochage pour la mise en convoi, du décrochage pour sortir du convoi et aller se stationner. De plus, bien que les véhicules évoluent à distance des bus, ils sont tout de même confrontés au flux de personnes qui montent et qui descendent à chaque station et qui évoluent autour afin de changer de trottoir. Enfin, les vélos et les taxis sont d'autres usagers des voies de bus avec qui il faudra pouvoir interagir en bonne intelligence. Ainsi, de par les contraintes précédentes identifiées, on conclut sur le besoin d'autonomisation de haut niveau nécessaire au projet. Au minimum, un SAE de niveau 4 est requis, mais vu que SURATRAM ne prévoit aucun humain aux commandes des véhicules, un niveau de SAE 5 est indispensable, ce qui représente un frein certain au projet et qui est source de verrous technologiques.

#### 2.3.1.1 Reconnaissance et interprétation de la scène

Les véhicules n'étant pas les seuls à exploiter le réseau routier, ils doivent le partager avec les piétons et les cyclistes. Dans ce cadre, rendre le véhicule autonome capable d'identifier les humains dans la scène pour interpréter leur mouvement et donc leur direction, est un verrou scientifique essentiel au déploiement du véhicule autonome en centre urbain. Cependant, au vu des avancées ressenties dans le domaine, notamment celles réalisées par les chercheurs de l'entreprise Tesla, qui est maintenant en mesure d'afficher en temps réel la position et la direction des personnes détectées en reproduisant leur démarche [212], on peut considérer le verrou comme en passe d'être levé.

#### 2.3.1.2 Conduite en convoi

La conduite en convoi est un ensemble de véhicules, pilotés ou bien autonomes qui se déplacent ensemble, en maintenant une organisation spatiale prédéfinie. Cette organisation spatiale est la configuration du convoi, donnée par les positions relatives des véhicules qui le forment. Les premiers travaux ont été initiés en 1997 à San Diego par le projet PATH et en 2012 à Barcelone dans le cadre du projet SARTRE. De ces projets, un ensemble de techniques et méthodes ont été développées et mises à disposition. De plus, entre 2008 et 2017, trois thèses ont été réalisées au sein du CIAD [93], [38], [281] dans l'objectif de porter les modèles orientés agents à la conduite en convoi, en exploitant des agents réactifs d'inspiration physique pour la prise de décisions. Il apparaît que ces travaux sont transférables au projet SURATRAM, ce qui permet de déclassifier la conduite en convoi de verrou technologique, dans notre cas.

### 2.3.1.3 Accroche, décroche et parking en navigation autonome

Outre la conduite en convoi, les véhicules doivent assurer des tâches d'accrochage dynamique (en sortie de stationnement) ainsi que de décrochage dynamique (pour stationner ou changer de voie de bus). Bien qu'actuellement des techniques existent, comme le "Park assist" de chez Volkswagen ou encore de chez Ford, ces dernières évoluent dans un contexte très précis du stationnement urbain. Le verrou technologique lié peut être défini comme le fait de doter un véhicule de la capacité de se garer en totale autonomie. Cependant, dans le cas du projet SURATRAM, le parking automatique s'inscrit dans la dynamique d'un véhicule en mouvement suivant un bus, qui repasse en conduite entièrement autonome après s'être décroché et qui doit être capable d'identifier son espace de stationnement dédié. Une fois identifié, il doit pouvoir calculer la trajectoire pour lui permettre d'entrer en stationnement et être capable d'interagir avec la scène pour ne pas risquer d'écraser un usager à proximité, tout cela, sans humain à bord pour reprendre le contrôle. Un tel verrou technologique nécessite le cadre d'une thèse pour être étudié. Dans la lignée des travaux menés au CIAD, l'utilisation d'agent réactif apparaît prometteur pour lever un tel verrou technologique.

### 2.3.2 Le véhicule électrique et sa batterie

L'utilisation de batterie comme source d'énergie électrique pour mettre en mouvement des véhicules, pour tout type de tâche, n'est plus en soi un verrou technologique à proprement parler. De par les avancées permises par la technologie Lithium dans les batteries, le transport sur plusieurs centaines de kilomètres a été rendu possible. L'agrandissement de l'autonomie des véhicules relève d'une activité de R&D qui se développe dans l'objectif d'étendre l'autonomie des véhicules électriques pour rejoindre celle des véhicules thermiques actuels. Le principal frein actuel, au développement des véhicules électriques (et qui n'est pas adressé par l'industrie), est la dégradation de la batterie, due au phénomène de vieillissement. De plus, cette auto-dégradation est amplifiée en fonction de l'usage du véhicule et de la méthode de recharge utilisée (super charger, hyper charger). Le phénomène de vieillissement est donc une source de verrous technologiques qui nécessitent d'être levés. On se propose de le définir comme : "Concevoir une méthode de dimensionnement de la batterie dans l'objectif de répondre au mieux au cas d'utilisation du véhicule, pour minimiser la dégradation de la batterie et donc la doter d'une durée de vie la plus longue possible".

### 2.3.3 L'optimisation de tournée de véhicule

Dans le cadre spécifique du projet SURATRAM, l'optimisation est la source d'un verrou technologique. Exploré depuis 1950, le champ de recherche de l'optimisation a produit un ensemble vaste de techniques et méthodes pour optimiser les flux de marchandises et assurer la livraison de ces dernières, en étant le plus compétitif possible. Si au sein des méta-heuristiques, les techniques de colonies de fourmis ont fourni de bons résultats approchés à 5% près pour un temps de calcul très court, comparativement aux méthodes exactes, leur mise en œuvre nécessite toujours une pré-connaissance du problème que l'on cherche à résoudre. Ce besoin de connaissance pré-établi va totalement à l'encontre de la philosophie de la méthode de résolution par colonies de fourmis. Dans la nature, les fourmis étant capables de s'adapter au terrain pour faire émerger un meilleur chemin. En l'état actuel des choses, il est obligatoire de spécifier aux fourmis quand stopper la recherche, impliquant que l'on ait effectué un nombre conséquent de simulations pour acquérir la connaissance permettant d'évaluer une solution comme bonne. Ce besoin d'intervention humaine traduit une méthode dont la convergence du critère de terminaison n'est pas automatique et n'a donc pas été identifié. Lever ce verrou technologique consiste à trouver une méthode qui permettrait à la colonie de fourmis de faire émerger un critère de terminaison pour terminer sa phase d'optimisation, en se basant sur les caractéristiques de son environnement.

### 2.3.4 Les outils de test pour les véhicules autonomes

*”Avec un grand nombre de véhicules connectés qui sillonnent les routes et les rues, la modélisation du trafic va pouvoir s’enrichir des données collectées par les véhicules jouant le rôle de capteurs en mouvement. L’évolution de la circulation sur un réseau routier peut être décrite par des modèles microscopiques (où l’on suit la trajectoire de chaque véhicule, la formation de bouchons, etc.), mésoscopiques ou encore macroscopiques (prédiction du trafic)” [128].*

Le projet cherche à ouvrir les voies de circulation actuellement réservées aux véhicules de transport en commun de l’aire urbaine, impliquant le besoin d’interaction entre les véhicules autonomes et les bus. Un frein direct au projet est la réalisation de tests en condition réelle avec de vrais bus, comme intervenants. Ce genre de test reste difficile à mettre en place, de par une organisation conséquente, ne disposant pas de bus et de la multitude d’acteurs à mobiliser pour y remédier. Dans l’optique de pouvoir valider le comportement des véhicules autonomes, les tests en condition réelle peuvent être assimilés à un verrou technologique. Celui-ci peut être résumé comme le développement d’un simulateur de réalité mixte pour la validation du comportement des véhicules autonomes suivant un bus. Au travers de ce simulateur, il est possible de déployer un véhicule autonome physique, qui se déplacera en suivant un bus qui lui, sera virtuel. De plus, outre la réalisation de tests spécifiques, ce simulateur ouvre la voie à la simulation de l’ensemble du système SURATRAM avec un véhicule, ou une flotte.

## Chapitre 3

# Optimisation par colonies de fourmis : Une approche basée sur l'environnement pour un critère de fin adaptatif

### 3.1 Introduction

Comme dit précédemment 2.2, le projet SURATRAM est une application de gestion (livraison et enlèvement) de marchandises en centre urbain qui intègre les Systèmes de Transport Intelligent (STI). Cette intégration des STI est caractérisé par une vision systémique du problème de gestion des marchandises en centre urbain, réunissant au sein d'une même application l'utilisation de véhicule électrique et autonome, ainsi qu'une adaptation en temps réel aux conditions du trafic du système routier urbain.

Le chapitre précédent 2 fut consacré à l'étude des Systèmes de Transport Intelligent (STI). Pour cela, nous avons retracé l'histoire des STI, de leur début (au début des années 70) jusqu'à aujourd'hui, dans l'objectif de comprendre leur implantation au niveau national, européen et international. La suite de chapitre fut dédié à l'identification et l'intégration des STI au sein du projet SURATRAM. Enfin, se sont l'ensemble des verrous technologiques liés au projet SURATRAM qui ont été présenté.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser plus spécifiquement à l'algorithme à la base de la solution d'optimisation développée pour le projet SURATRAM. Dans le cas de l'adaptation aux conditions du trafic routier, si un véhicule est amené à être bloqué ou ralenti, il est primordial de pouvoir recalculer, en temps réel, le chemin entre le véhicule et son prochain point de livraison. Pour cela, la convergence de l'algorithme de colonie de fourmis (ACO) doit pouvoir être démontré pour permettre une ré-évaluation de la solution, dans un temps court, sans supervision humaine. Ainsi, nous allons, tout au long de ce chapitre, tenter de montrer d'où vient la convergence des ACO est comment l'implémenter au sein d'un algorithme d'ACO.

Pour cela, ce chapitre est dédié à l'étude de l'algorithme de colonie de fourmis au travers de sa place dans les systèmes multi-agents et d'une étude épistémologique. De plus, le projet SURATRAM ayant mis en lumière un besoin de dynamique dans le calcul d'optimisation de solution, la dernière partie de ce chapitre sera dédiée à l'étude de l'environnement des fourmis comme vecteur de convergence pour l'ACO.

## 3.2 De l'agent à la colonie de fourmis

### 3.2.1 Système multi-agents

#### 3.2.1.1 Introduction : Qu'est ce que l'intelligence ?

##### Quelques définitions

L'intelligence est la faculté de comprendre, de saisir par la pensée. L'aptitude à s'adapter à une situation, à choisir en fonction des circonstances, capacité de comprendre [152].

Pour Jules Michelet *"L'intelligence pour remonter au sens étymologique, "inter legere", "intelligere", l'intelligence agit lorsqu'elle tire de ce qu'on a senti quelque chose qui ne tombe point sous le sens"* [180].

##### Le concept d'intelligence

Pour les Grecs, l'ensemble des étymologies dont émerge le concept d'intelligence renvoie toutes vers une indication commune : la perception. Ainsi, l'intelligence serait une qualité de la perception, et qui permettrait de pouvoir fuir une situation dangereuse. Progressivement, cette définition évolue pour progressivement définir la manière dont les individus se sentent liés, évoluent entre eux, conditionnés par la justice. Suite à cela, le concept d'intelligence continue d'évoluer et s'éloigne de la notion purement pratique pour devenir protéiforme, pour devenir une faculté sensorielle, expressive, éthique, décisionnelle, cognitive, logique, douée d'empathie visuelle et kinesthésique et de maîtrise par rapport aux autres membres de la société humaine [107].

Notre mot "intelligent" nous vient du XVe siècle [153], issu du préfixe latin "inter", préposition signifiant au milieu, entre ou encore parmi [98] et du latin "lego" [99], du verbe "legere" [52], signifie discerner, lui-même issu du grec "legô" signifiant "recueillir".

Depuis 1905, de par les travaux de Théodore Simon débouchant sur l'invention du Test de QI, notre compréhension de l'intelligence et notre rapport à cette dernière est fortement lié à l'individu, coupé des autres membres de la société humaine, caractérisé par son QI comparant ses performances cognitives par rapport à ses pères du même âge. Ce test, bien que discutable, s'attache à quantifier la capacité de cognition d'une personne, son niveau de conscience, traduisant la qualité d'un raisonnement en lien avec un problème.

##### Le concept d'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle moderne telle que nous la connaissons actuellement est née en 1956 dans le New Hampshire, lors de la conférence d'été donnée au Dartmouth College. Lors de cette conférence, John McCarthy, Marvin Minsky, Claude Shannon, Alan Newel, Arthur Samuel, Herbert Simon et Nathon Rochester proposent de convenir du terme d'"Intelligence Artificielle" (IA), pour désigner un programme informatique capable de résoudre une tâche spécifique désignée comme complexe, aussi bien qu'un être humain.

Ferber, dans son ouvrage de 1995 [91] propose une critique de l'évolution de l'IA en tant que système expert appliqué à la résolution de tâches spécifiques.

##### De la machine copiant l'humain

La définition de l'IA du Collège de Dartmouth, qui est devenue une nouvelle discipline académique, a ancré l'intelligence artificielle (IA) dans une rivalité profonde entre l'humain et la machine, dans une course à la performance pour la résolution de tâches complexes. Cette rivalité a également conduit à conceptualiser ces programmes comme des entités individuelles, des programmes experts, penseurs individuels capables de surpasser l'humain dans des domaines bien précis. Partant de ce postulat, l'intelligence serait l'apanage de l'individu isolé, capable de résoudre un problème complexe seul, sans intervention extérieure. Cependant, cette conceptualisation de l'IA se heurte à plusieurs obstacles, qu'ils soient théoriques ou pratiques.

D'un point de vue théorique, l'IA s'est engagée sur une voie à la fois trop optimiste et trop réductrice. L'intelligence, comme définie par [154] [160], ne peut pas être séparée du contexte dans lequel elle s'exprime, comme un être humain ne peut pas se développer convenablement si il n'est pas entouré d'autres membres de son espèce, impliquant un développement cognitif très limité. Ainsi, évoluer dans un environnement constitué d'autres membres de son espèce apparaît indispensable pour assurer le bon développement d'un humain. De par cette analogie à l'humain, on peut donc conclure que l'intelligence n'est pas uniquement due aux prédispositions de la génétique, mais qu'elle dépend aussi des interactions qu'une personne peut entretenir avec les membres de la société humaine et le monde extérieur.

D'un point de vue pratique, la conception de ces programmes experts s'est confrontée à la complexité grandissante de leur conception, notamment en terme d'architecture, ces programmes devant être capables de résoudre des tâches de plus en plus complexes. Pour cela, il fut nécessaire de se rapprocher du génie logiciel, pour s'inspirer des travaux qui y étaient menés sur la conception orientée objet. Ce rapprochement du concept d'objet a permis d'opérer un changement de paradigme dans l'approche de la conception des programmes experts, en proposant de découper ces blocs monolithiques en modules "faiblement couplés". Par faiblement couplé, on entend qu'un module est en charge d'une tâche donnée et qui pour la résoudre, pourra interagir localement avec un ensemble d'autres modules. Cette conception implique donc que les modules se limitent à une vision locale du problème, correspondant à la résolution de la tâche qui leur incombe, sans aucune compréhension globale du problème complexe à résoudre. Ce changement de paradigme impliqua le basculement de la notion de programme à celle d'organisation, ouvrant la voie d'une résolution de problème dite distribuée.

En conséquent, dès les premiers travaux menés à la suite de la conférence d'été de Dartmouth par Newell et al. [191] en 1957, le projet cherchant à développer un système-expert capable de démontrer de manière automatique des théorèmes, l'émulation de l'intelligence dans le domaine de la vie numérique ne pouvait pas être atteinte. Ce qui est dû, selon [66] et [239], *"au manque d'incorporation des programmes et donc de leur incapacité à interagir de manière significative avec leur environnement et avec leurs semblables"*.

Ainsi, il en vient naturellement à se poser la question de la desindividualisation des programmes experts de l'intelligence artificielle (IA) et de la manière de proposer une conceptualisation de l'IA comme un ensemble d'entités, évoluant au travers d'un collectif, dont l'intelligence pourrait émerger.

### **A l'organisation artificielle**

Dans cette poursuite du paradigme de l'organisation en tant que colonne vertébrale structurant l'intelligence, Ferber, en 1994, développe un projet scientifique nommé la Kinétique [90]. Au travers de la Kinétique, il cherche à définir le cadre de la science des organisations artificielles, comme un ensemble structuré de connaissances qui se rapportent à des faits obéissant à des lois objectives (ou considérés comme tels) et dont la mise au point exige systématisation et méthode [199]. De plus, la Kinétique doit fournir un ensemble de méthodes et techniques permettant la mise en application de la science des organisations artificielles, de sa connaissance scientifique ou théorique, dans les réalisations pratiques et/ou les productions industrielles et économiques [200].

De la science des organisations artificielles naît le besoin de conceptualiser un module "faiblement couplé", caractérisé par son comportement autonome et indépendant, interagissant localement avec les autres modules de son environnement dans l'objectif de concrétiser sa tâche. Cette conceptualisation passe par la mise en place d'entités nommées "Agent", que Ferber définit comme *"entités relativement autonomes et indépendantes, qui travaillent au sein de communautés selon des modes parfois complexes de coopération, de conflit et de concurrence, pour survivre et se perpétuer. De ces interactions émergent des structures organisées qui, en retour, contraignent et modifient les comportements de ces agents"* [91]. La notion d'organisation traduisant la méthode selon laquelle un ensemble est structuré, la science de la Kinétique conceptualisa l'agent en tant que système au travers de Système Multi-Agent, modèle informatique définissant comment les agents communiquent et agissent dans un environnement.

*”les activités simples ou complexes, tels que la résolution de problèmes, l'établissement d'un diagnostic, la coordination d'action ou la construction de systèmes, sont le fruit d'une interaction entre entités relativement autonomes et indépendants, appelées agents, qui travaillent au sein de communautés selon des modes parfois complexes de coopération, de conflit et de concurrence, pour survivre et se perpétuer.*

...

*De ces interactions émergent des structures organisées qui, en retour, contraignent et modifient les comportements de ces agents.*

...

*C'est ainsi, en mettant l'accent sur les interactions et plus exactement en analysant les systèmes d'interactions qui existent entre les agents, que les systèmes multi-agents (ou SMA) se distinguent des approches systémiques plus classiques en prenant le parti de l'émergence et en considérant que l'action et l'interaction sont les éléments moteurs de la structuration d'un système dans son ensemble.*

...

*C'est par une analyse fine des différents types de systèmes multi-agents que l'on sera à même de classer les différentes formes d'interaction et les différents comportements distribués qui peuvent être mis en œuvre pour résoudre des problèmes de coopération ou de compétition. C'est surtout à partir d'expérimentations, c'est-à-dire à partir de la construction d'artefacts collectivement organisés, que l'on sera en mesure de mieux analyser les composants nécessaires à la description des organisations et l'évolution des sociétés d'agents.*

...

*Cependant, en être l'auteur ne signifie pas que toutes les évolutions de l'univers puissent être prédites. Elles ne sont pas soumises à un déterminisme simple qui permettrait de prévoir toutes les configurations futures à partir d'une situation initiale. Au contraire, les systèmes multi-agents obéissent aux principes des phénomènes chaotiques.*

...

*Ces systèmes ne sont pas pour autant soumis à aucune loi. Il est possible au contraire d'observer des effets d'auto-organisation et d'apparition de structures émergentes dont les évolutions sont parfaitement maîtrisées. De fait, il est possible, avec un peu d'expérience, de construire des systèmes qui manifestent des comportements voulus dans une situation stable, tout en se montrant capable de s'adapter à des perturbations non prévues initialement” [91].*

Ainsi, pour Ferber et au travers de la Kinétique, l'agent et le fondement du concept d'organisation, dont les interactions entre agent et avec l'environnement sont la source dont émerge un nouveau comportement complexe, imprévisible, mais non sans règle, modifiant le comportement de l'agent pour lui permettre de réaliser sa tâche.

### **Au besoin de distribuer l'intelligence ?**

L'intelligence, comme définie par le collège de Dartmouth, ne peut aboutir à l'émulation de l'intelligence, au sens où elle réduit l'intelligence à l'individu, comme penseur isolé du groupe et à sa seule capacité à produire un raisonnement de qualité en lien avec un problème.

De ce manque de connexion et d'interaction entre les individus et avec leur environnement est né le concept d'agent, entité autonome et indépendante, mais qui au sein d'un système peuvent interagir localement pour modifier leur comportement, s'adapter dans l'objectif de réaliser leur tâche. Ce concept permettant de proposer une résolution distribuée d'un problème complexe donné.

Cependant, maintenant que la méthodologie est posée, il en vient de se poser la question sur la nature d'un problème complexe, de savoir si cette vision distribuée de la résolution peut être appliquée ou non. Un problème complexe est-il distribuable, ou un moyen doit-il être trouvé pour réduire ce bloc monolithique en un sous-ensemble de problème de complexité réduite. Pour répondre à cette question, Ferber [91] fait une analogie aux systèmes informatiques de gestion qui, toujours actuellement, vont de pair avec une complexité toujours croissante. Il l'identifie à un système constitué de nombreux sous-systèmes autonomes et interagissant avec d'autres sous-systèmes ou avec des humains. Chacun de ces sous-systèmes n'ayant qu'une vision partielle du problème, mais qui dans leur globalité réagissent de manière coordonnée et adaptée.

Pour Ferber, la nature même d'un système complexe est d'être une organisation de sous-système de complexité inférieure, dont émerge le comportement souhaité. Il identifie les systèmes complexes distribués comme suivant : [91]

- *”Les problèmes sont physiquement distribués*
- *Les problèmes sont fonctionnellement très distribués et hétérogènes.*
- *Les réseaux imposent une vision distribuée.*
- *La complexité des problèmes exige une vision locale*
- *Les systèmes doivent pouvoir s'adapter a des modifications de structure ou d'environnement*
- *Le génie logiciel va dans le sens d'une conception en termes d'unités autonomes en interactions.”*

### 3.2.1.2 Définitions générales

#### Les Agents

##### Le concepts d'agent

Le domaine de l'intelligence artificielle ne dispose pas aujourd'hui encore d'une définition hégémonique claire, concernant le concept d'agent. Le mot "agent" n'étant pas propre au domaine de l'intelligence artificielle (IA), provenant du domaine de la finance, ces concepts de base qui forgent son utilisation ont besoin d'être clairement énoncés. Dans ce domaine, la définition de Russel et Norvig [226] fait foi dans le domaine. D'après celle-ci, est considéré comme agent tout élément capable de percevoir l'environnement dans lequel il évolue, de par tout type de capteur(s) et pouvant également agir sur ce dernier à l'aide d'actionneur(s). Tout élément perçu par un agent à un instant donné et appelé "percept" et donc, une séquence de perceptions correspond à un ensemble de percepts, perçu en fonction du temps. Enfin, d'un point de vue mathématique, le comportement d'un agent est défini par la fonction agent qui, à une séquence de perceptions, fait correspondre une action. Cependant, ce niveau de raffinement, relativement grossier, du concept d'agent ne peut pas être amélioré. Les systèmes multi-agents couvrant des domaines très variés comme la robotique, la simulation avec les serious games ou encore l'optimisation en général.

##### Wooldridge l'agent Intentionnel

Dans leur article de 1995 [277], Wooldridge Jennings, définissent un agent comme Intentionnel. *”Un agent est un système qui est décrit de la manière la plus commode par la position intentionnelle ; un système dont la description cohérente la plus simple requiert la position intentionnelle. Avant de poursuivre, il convient d'examiner exactement quelles attitudes sont appropriées pour représenter les agents. Dans le cadre de cette étude, les deux catégories les plus importantes sont les attitudes d'information et les pro-attitudes :*

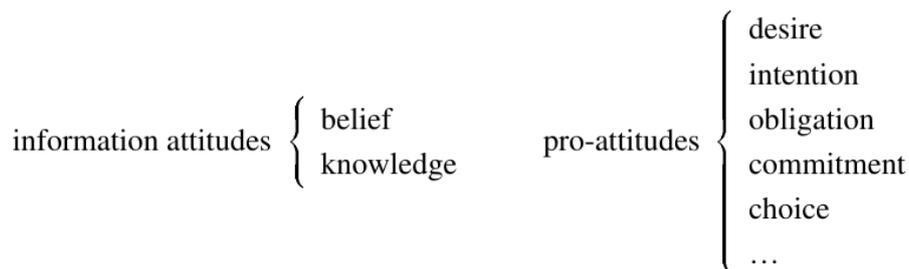


FIGURE 3.1 – Informations attitudes

*Ainsi, les attitudes informationnelles sont liées à l'information dont dispose un agent sur le monde qu'il occupe, tandis que les attitudes pros sont celles qui, guident les actions de l'agent. La combinaison d'attitudes la plus appropriée pour caractériser un agent est sujet de débat. Cependant, il semble raisonnable de suggérer qu'un agent doit être représenté en termes d'au moins une attitude d'information et d'au moins une attitude pro. Notez que les attitudes pros et informatives sont étroitement liées, car un agent rationnel fera des choix et formera des intentions, etc. sur la base des informations dont il dispose sur le monde. Une grande partie du travail en théorie des agents consiste à déterminer exactement la relation entre les différentes attitudes.*" [277].

Wooldridge définit un agent intentionnel comme une volonté consciente incarnée, dont le but est de réaliser son ou ses objectif(s). Une fois positionné dans l'environnement, il prendra l'initiative de manière totalement autonome pour réaliser son ou ses objectif(s), s'il perçoit une possibilité. Les agents intentionnels internalisent une représentation fidèle et actualisée de leur(s) objectif(s). C'est cette conscience du niveau d'accomplissement de son ou ses objectif(s) qui influe le comportement de l'agent.

De plus, l'agent, internalisant la tâche, est capable de réaliser par lui-même son objectif, même si pour cela il peut avoir des interactions limitées avec les autres agents présents dans l'environnement. Concernant l'environnement, ce dernier pouvant évoluer dans le temps, il est capable d'adapter son comportement pour réaliser son ou ses objectif(s).

Enfin, les agents intentionnels revêtent un aspect social, pouvant communiquer entre eux et coopérer à la réalisation d'une tâche, de par l'utilisation de langage dédié. Ces langages se basent sur la théorie de l'acte de la parole, initié par (Austin, 1962), qui identifie l'émission de message comme une action, au même titre qu'une action physique. On retrouve ainsi, les quatre piliers de la définition officielle [276] : l'autonomie, la réactivité, la proactivité, la sociabilité.

Lors de l'année 1995, Jacques Ferber propose lui aussi une définition, volontairement large, du concept d'agent, dans son livre *"Vers une intelligence collective"* [91]. Ferber, au travers des Systèmes Multi-Agents (SMA), propose un changement de paradigme dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA).

L'IA classique, définie en 1956 à Dartmouth, propose la création de système informatique capable de résoudre une tâche spécifique dite complexe, aussi bien qu'un être humain. On retrouve ici un concept qui puise ses origines dans la psychologie cognitive individuelle, donnant lieu à un programme informatique auto-centré, internalisant toutes les ressources nécessaires à la réalisation d'une tâche et ne communiquant pas. Cette conceptualisation rejoint la notion de système expert, capable de reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert dans un domaine particulier. Cette vision de l'IA rejoint la vision de Wooldridge, dans laquelle un agent va agir de manière autonome et sans l'intervention d'un autre agent pour réaliser son objectif.

Au contraire, pour Ferber, *"l'Intelligence, comme la science, n'est pas une caractéristique individuelle que l'on pourrait séparer du contexte social dans lequel elle s'exprime"* [90]. L'intelligence naît de la caractéristique physiologique de base de l'humain, mais également de par les interactions de ce dernier avec son environnement, qui est composé d'autres systèmes complexes équivalent. Ainsi, une tâche, qu'elle soit simple ou complexe, est résolue grâce aux interactions entre les entités (ou agent) constituant l'environnement, permettant de faire émerger un comportement à même de résoudre un objectif, qu'il soit extrinsèque ou intrinsèque. Considérant cette vision de l'agent, Ferber le définit comme suivant :

- "On appelle agent une entité physique ou virtuelle :*
- *qui est capable d'agir dans un environnement,*
  - *qui peut communiquer directement avec d'autres agents,*
  - *qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),*
  - *qui possède des ressources propres,*
  - *qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,*
  - *qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),*

- qui possède des compétences et offre des services,
- qui peut éventuellement se reproduire,
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit" [91]

### Les agents réactifs et agents cognitifs

La résolution d'un objectif, qu'il soit simple ou complexe, nécessite-t-il la mise en place d'une approche experte agentifiée ou d'entité capable de s'adapter aux évolutions de leur environnement ? Dit autrement, l'intelligence déployée dans une application doit-elle être, l'apanage d'individus discrets au sein de l'environnement, ou naît-elle des interactions locales d'individu dépourvu d'intelligence et ne réagissant qu'à des stimulus ?

#### Agent cognitif

*"Le concept d'agent cognitif est le plus représenté dans le domaine que l'on appelle "intelligence artificielle distribuée" (IAD) car elle trouve son origine dans la volonté de faire communiquer et coopérer des systèmes experts classiques. Dans ce cadre, un système multi-agents est composé d'un petit nombre d'agents "intelligents". Chaque agent dispose d'une base de connaissance comprenant l'ensemble des informations et des savoir-faire nécessaires à la réalisation de sa tâche et à la gestion des interactions avec les autres agents et avec son environnement. On dit aussi que les agents sont "intentionnels", c'est-à-dire qu'ils possèdent des buts et des plans explicites leur permettant d'accomplir leurs buts" [91].*

Le concept d'agent cognitif est caractérisé par deux critères majeurs, sa capacité de représentation et sa capacité de cognition. Ces deux caractéristiques permettent aux agents de travailler indépendamment à la réussite de leur objectif ou de se comporter comme des individus se limitant à l'échange des informations nécessaires pour coopérer et résoudre leur conflit.

#### Agent réactif

Contrairement au concept d'agent cognitif, celui d'agent réactif met en avant que ces agents n'ont pas besoin d'être dotés d'une intelligence individuelle pour que le système global puisse résoudre un problème complexe. De plus, ils n'ont pas une connaissance explicite de l'environnement, ni du problème à résoudre, ou encore des autres agents.

C'est de par des réactions à des événements préalablement identifiés, mais non prévisibles, que l'ensemble ou une partie des agents du système peuvent réagir pour produire une action permettant au système de s'adapter. De cette adaptation peut émerger la résolution du problème, ou encore amener à s'en rapprocher.

La première trace d'un tel système date de 1986 dans un des laboratoires du MIT [21], dans son expérience, un ensemble de petits robots, aux caractéristiques simples, doivent travailler ensemble pour réaliser une tâche donnée. Les comportements émergeant des réponses aux événements propres à ce projet, ont montré que cet ensemble de petits robots est plus efficace qu'un seul robot spécialement conçu pour réaliser la tâche.

Dans le domaine biologique, on retrouve par exemple, les colonies de fourmis qui sont une parfaite démonstration de système multi-agents réactif. Lors de leur recherche de nourriture, qui leur permet d'alimenter la colonie, les fourmis, qui n'ont aucun lien de hiérarchie entre elles, se déplacent de manière aléatoire dans leur environnement. Lorsque l'une d'entre elles trouve une source de nourriture, elle va suivre son chemin effectué à l'aller en y déposant des phéromones. Phéromones qui sont perceptibles par les autres fourmis, ce qui leur permet de trouver la nouvelle source de nourriture et à leur tour d'alimenter leur chemin en phéromones pour permettre à un plus grand nombre de fourmis de trouver et rapatrier la nourriture.

La résolution d'un problème via la mise en place d'un système multi-agents réactif, est basée sur l'apparition de phénomènes émergents. Ces phénomènes émergents peuvent être simples et prédictibles, comme la réaction de fuite à un message d'alerte, ou encore complexes et non prédictibles, résultant d'autres phénomènes émergents simples. Ces phénomènes émergents confèrent au système un comportement global intelligent, résultant de comportements individuels locaux.

### Agent mixte

Les concepts d'agent cognitif et réactif n'étant pas antinomique, des conceptions hybrides ont été explorées dans l'espoir d'allier l'efficacité du système cognitif, à l'adaptabilité du système réactif. Un agent hybride se compose de trois composantes : une composante cognitive, une composante réactive et une composante dite de contrôle. Bien qu'intéressante sur le papier, cette approche apporte avec elle toute la complexité de conception du système cognitif et introduit un problème de superposition d'interaction entre les composantes cognitive et réactive, devant manuellement définir quel module doit être activé.



FIGURE 3.2 – Agent mixte

#### 3.2.1.3 Les systèmes multi-agents

Un système multi-agents (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents autonomes évoluant dans un environnement, qui interagissent et communiquent entre eux ou avec leur environnement.

Ferber [91] définit l'agent comme *"une sorte "d'organisme vivant" dont le comportement, qui se résume à communiquer, à agir et éventuellement, à se reproduire, vise à la satisfaction de ses besoins et de ses objectifs à partir de tous les autres éléments (perceptions, représentations, actions, communications et ressources) dont il dispose."* Ainsi, dans l'objectif de proposer une organisation multi-agents, il propose la définition suivante : *"on appelle système multi-agents (ou SMA), un système composé des éléments suivants :*

- *Un environnement "E", c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.*
- *Un ensemble d'objets "O". Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.*
- *Un ensemble "A" d'agents, qui sont des objets particuliers ( $A \subseteq O$ ), lesquels représentent les entités actives du système.*
- *Un ensemble d'opérations "Op" permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.*
- *Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers." [91]*

Concernant Wooldridge, il définit un système multi-agents comme un système constitué d'un ensemble d'agents qui interagissent les uns avec les autres, en communiquant au travers de message. Les agents au sein du système vont se représenter ou se comporter en tant qu'utilisateurs au travers de leurs tâches et motivations. Enfin, pour garantir les interactions du système, les agents doivent intégrer les capacités de coopération, de coordination et de négociation les uns avec les autres [275].

## Environnement

L'environnement est une représentation abstraite du milieu dans lequel évolue un ensemble d'agents. De par une approche humano centrée, les agents ont une représentation partielle de leur environnement, se limitant à une sphère de perception autour d'eux.

Si l'on prend l'exemple d'un système multi-agents réactif, l'environnement est l'élément central indispensable pour garantir la bonne coordination des actions entre un ensemble d'agents. Ainsi, pour un groupe de robots, noté "A", l'environnement, noté "E" est abstrait à un espace euclidien dans lequel les robots évoluent. Notre environnement étant composé des agents "A", ainsi que d'un ensemble d'objets "O" avec lesquels ils peuvent interagir.

L'environnement peut donc être défini comme la première couche d'abstraction, dans laquelle sont définies les règles conditionnant leur existence. De plus, l'environnement sert d'intermédiaire pour permettre aux agents d'interagir entre eux ou avec leur ressource.

## Perception

Les informations collectives qui parviennent aux capteurs des agents d'un SMA sont généralement distribuées : les agents peuvent observer des données qui diffèrent sur le plan spatial (apparaissent à des endroits différents), temporel (arrivent à des moments différents) ou sémantique (nécessitent des interprétations différentes). Le fait que les agents puissent observer différentes choses rend le monde partiellement observable pour chaque agent, ce qui a diverses conséquences sur la prise de décision des agents [273].

## Connaissance

Concernant la mise en application d'un SMA, le degré de connaissance d'un agent de l'ensemble "A", à propos de son environnement, est l'image de l'exploration de l'environnement de ce dernier. Cependant, en fonction du type de SMA mis en place, cognitif ou réactif, la connaissance peut être partagée ou non. Dans un SMA réactif, les agents ne collectent pas la connaissance de leur environnement lors de leur déplacement, les limitant à adapter leur comportement aux changements de leur environnement. Un SMA cognitif, lui, outre la conservation de la connaissance de l'environnement déjà visité, un agent "A" peut être amené à partager cette connaissance à l'ensemble "A" présent, par le biais d'un échange directionnel. Cet échange peut aussi être bidirectionnel, lui permettant de mettre à jour sa représentation interne de son environnement.

## Interaction

Au sein d'une application SMA, les interactions sont l'élément essentiel, leur permettant de se déplacer, d'agir en prenant des décisions ou de réagir en formant des comportements collectifs pour résoudre des problèmes. Morin définit les interactions comme "des actions réciproques modifiant, par la présence ou l'influence, le comportement ou la nature des éléments, corps, objets", ce qui permet de différencier une collection d'agents d'un SMA, les agents pouvant interagir entre eux pour résoudre des problèmes, qu'ils soient communs ou non.

Deux types d'interaction sont identifiés, les interactions directes (inter-agents) et les interactions indirectes (agents-environnement). Dans le premier cas, les informations sont directement transmises d'un agent à l'autre, traduisant un SMA cognitif. Puis dans la seconde, elles circulent par le biais de l'environnement, impliquant que les agents se limitent à réagir aux variations de leur environnement, selon un modèle de SMA réactif.

### Les types d'interactions

Chez Ferber et Wooldridge, on retrouve 3 types d'interactions dans un système multi-agents.

- La collaboration / coopération

Pour Ferber, la collaboration est "*La collaboration complexe suppose que les agents doivent coordonner leurs actions pour pouvoir disposer de la synergie de l'ensemble de leurs compétences*" [91]. Pour Wooldridge, coopération est "*nécessaire à la réalisation d'une tâche, car aucun agent n'a les compétences, l'expertise ou les ressources suffisantes pour résoudre un problème. Seul un ensemble d'agents peuvent, en réunissant leurs ressources, réussir à résoudre ledit problème*" [275].

— Encombrement / coordination

Pour Ferber, l'encombrement est *"caractéristique de toutes les situations dans lesquelles les agents se gênent mutuellement dans l'accomplissement de leurs tâches alors qu'ils n'ont pas besoin les uns des autres"* [91]

Pour Wooldridge, la coordination est *"Le problème de la coordination est celui de la gestion des interdépendances entre les activités des agents : un mécanisme de coordination est essentiel si les activités que les agents peuvent entreprendre peuvent interagir de quelque manière que ce soit."* [275]

— Conflit / négociation

Pour Ferber, le conflit naît "lorsque les ressources ne peuvent être partagées, on se trouve dans une situation caractéristique de conflit dont les ressources sont l'enjeu, chacun voulant les acquérir pour lui seul" De plus, elle peut être collective, *"combine la compétition collective aux conflits individuels pour des ressources. Les coalitions luttent les unes contre les autres pour obtenir le monopole d'un bien, d'un territoire ou d'une position."* [91]

Pour Wooldridge, la négociation est "un ensemble de technique permettant la répartition des ressources entre agents, lorsque celles-ci sont en trop faible nombre comparé aux agents et que lesdits agents doivent trouver une manière de se répartir les ressources, selon leur intérêt mutuel." [275]

### Interactions d'inspiration biologique

Les interactions d'inspiration biologique reposent sur l'étude, l'analyse et la compréhension des sociétés animales, dans l'espoir de porter les briques de base de leur comportement dans le domaine de la simulation numérique. La bio-inspiration a permis de développer de nouveaux champs de recherche, donnant lieu à de nouvelles techniques nées du comportement des insectes. La compréhension du comportement fourmis, comme les abeilles ou encore les termites, a permis de proposer de nouvelles approches à des problèmes connus d'optimisation (Travelling salesman problem ou Vehicule routing problem) ou encore de contrôle distribué (routage d'informations dans un réseau informatique, équilibrage de charges dans un réseau de stations de travail).

Ces approches reposent sur le concept de stigmergie CHAP3-115, qui fait toute leur force. Ce concept, défini comme le travail guidant l'ouvrier, propose que la coordination des tâches et que l'organisation des constructions ne dépendent pas directement de l'ouvrier, mais de la structure émergente elle-même. Ainsi, un ensemble d'individus incapable de communiquer entre eux directement, mais seulement au travers de leur environnement, et dont le comportement constitué d'action(s) simple(s) locale(s) permet(tent) de produire une tâche globale très complexe.

### Interactions d'inspiration physique

Les interactions d'inspiration physique trouvent leur origine dans le domaine de la synthèse d'image. En 1987, Reynolds propose une toute nouvelle approche pour aborder la représentation des mouvements de foule à l'écran. Son objectif est de pouvoir modéliser, en image de synthèse, les mouvements de volées des étourneaux, tout en évitant de précalculer ou de définir à la main la trajectoire de chaque individu. Ce qui, pour une large population d'individus, est soit une tâche très fastidieuse, soit une tâche très coûteuse en termes de ressource informatique.

Pour cela, Reynolds propose une approche caractérisée par une absence de leader, dont la coordination du groupe est régit par des phénomènes locaux élémentaires simples et dont la synchronisation locale pour l'évitement d'obstacle ou le changement de direction impacte le groupe dans son ensemble.

Pour ce faire, Reynolds commence par représenter ses étourneaux artificiels, ou boïds (oiseauïde), dans une simulation dans laquelle il leur confère une forme d'autonomie. Chaque boïd est doté d'une sphère de perception, le rendant capable de voir les autres boïds gravitant, plus ou moins, proche de lui et de réagir en fonction de trois comportements de base. La séparation maintient une distance minimale entre un agent et un autre objet et/ou à proximité. La cohésion définit l'attraction des agents en direction d'un centre de masse des agents perçu. L'alignement permet à un agent de se déplacer à la même vitesse qu'un autre agent proche de ce dernier et de corriger aussi sa trajectoire en orientation et en amplitude. Ces trois comportements de base sont définis à l'aide de force, comme décrite dans le domaine de la physique.

Les interactions d'inspiration physique puisent leur motivation dans l'adaptation des phénomènes physiques régissant notre monde. Que ce soit les forces régissant l'interaction des planètes entre elles, celles définissant le comportement des électrons ou encore les phénomènes physiques de champs, ils décrivent tous un comportement induit, qui dans les bonnes conditions permettent de stabiliser un système. Dans la volonté de développer la vie artificielle et de mettre en place des mécanismes d'adaptation dynamique dans des simulations numériques, sans supervision humaine, il apparaît normal de se tourner vers les phénomènes physiques de notre monde, pour les porter au monde virtuel.

### **Communication**

La communication au sein d'un SMA peut être de deux types, indirect ou direct. Dans le premier cas, la communication est le fruit des interactions de l'agent avec son environnement, traduisant la présence d'un SMA réactif, comme présenté précédemment. A l'inverse, en présence d'une application de SMA cognitif, la communication directe est considérée comme un processus bidirectionnel, où tous les agents sont en capacité d'émettre ou de recevoir des messages.

*"La communication peut être utilisée dans plusieurs cas, par exemple pour la coordination entre agents coopératifs ou pour la négociation entre agents intéressés. Cela soulève, en outre, la question des protocoles de réseau à utiliser pour que les informations échangées arrivent en temps voulu et en toute sécurité, et du langage que les agents doivent parler pour se comprendre (surtout s'ils sont hétérogènes)" [273].*

### **Organisation et l'auto-organisation**

Dans sa thèse, DAFFLON CHAP3-110 définit l'organisation comme : *"un terme ambigu, car il renvoie à la fois à l'action d'organiser et au résultat de cette action. Néanmoins, nous pouvons déduire que l'organisation est directement liée à la division du travail, à la répartition des rôles, des tâches et des responsabilités entre les membres d'un groupe" [41].*

Ferber définit l'organisation comme : *"Une organisation peut être définie comme un agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité, ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. L'organisation lie de façon inter-relationnelle des éléments ou événements ou individus divers qui dès lors deviennent les composants d'un tout. Elle assure solidarité et solidité relative, donc assure au système une certaine possibilité de durée en dépit de perturbations aléatoires" [91].*

Les systèmes multi-agents sont indissociables de l'organisation de la structure dans laquelle les agents évoluent. Les SMA mettent en jeu de nombreuses interactions entre les agents et l'environnement et ces interactions ne sont possibles que dans le cadre d'un système organisé, qui, de manière réciproque, nécessite existence de ces interactions. De plus, c'est de l'organisation que peut émerger le comportement plus complexe et imprédictible d'un agent ou d'un groupe d'agents pour réaliser un objectif.

### **De l'organisation à l'auto-organisation**

L'auto-organisation fait référence au processus dans lequel un système, sans intervention extérieur à celui-ci, adapte son organisation aux changements survenant dans l'environnement [240]..

Si maintenant on cherche une définition plus humano-centrée au terme automatique, on trouve qu'il fait référence à une action *"Qui s'accomplit d'une manière inconsciente, sans la participation directe de la volonté ou de l'intelligence" [198].*

Ainsi, comme nous l'avons vu précédemment au travers des SMA d'inspiration physique ou d'inspiration biologique, le concept d'"auto-organisation" est au coeur de ces derniers. Que l'organisation naisse de phénomènes physiques comme des forces d'attraction ou des forces de répulsion ou encore de comportement de base d'insectes sociaux observés dans la nature, l'organisation du système résulte de la somme des comportements simples appliqués localement, qui permettent de faire émerger un comportement global complexe.

Selon [240], un système auto-organisé est caractérisé par les propriétés suivantes :

- *Absence d'un contrôle externe explicite. Il s'agit d'une propriété obligatoire qui spécifie que le système est autonome. Il change son organisation en se fondant uniquement sur ses décisions internes.*
- *Contrôle décentralisé. Un système auto-organisé peut travailler sous contrôle décentralisé. Chaque élément du système s'adapte à l'environnement perçu, bien que limité.*
- *Opération dynamique. Cette propriété obligatoire est liée à l'évolution du système à travers le temps. Puisque l'organisation évolue indépendamment de tout contrôle externe, cette propriété implique une continuité dans le processus d'auto-organisation.*

## **Emergence**

Le concept d'émergence met en avant le fait qu'il existe dans un système, des propriétés présentes à un certain niveau d'organisation qui ne peuvent être déduites des propriétés de niveaux inférieurs [269]. La notion d'émergence implique de considérer que tout système est organisé selon un empilement de couche d'organisation de complexité croissante. Suivant ce raisonnement, la formation de nouvelles entités complexes est définie par adjonction d'une nouvelle couche d'organisation. Ainsi, pour tout SMA réactif, qu'il soit d'inspiration physique, d'inspiration biologique ou encore hybride, les propriétés émergentes sont la dernière couche d'organisation du système, la plus complexe. Cette dernière couche d'organisation repose sur une couche inférieure dite homogène, constituée de l'ensemble des actions diverses, de complexité faible, interne à chaque agent. C'est de l'interaction entre ces actions de faible complexité entre elles et avec leur environnement que vont naître de nouveaux comportements, plus complexes et non prévisibles. Pour conclure sur le concept d'émergence, ce dernier est le fruit d'un système organisé dont les interactions internes entre les différents éléments qui le constitue, permettent le passage d'un type d'organisation à une autre, de complexité supérieure, sans participation directe de la volonté ou de l'intelligence. L'émergence est donc une manière de conceptualiser et de désigner le passage d'une couche de complexité inférieure à une couche de complexité supérieure.

### **L'émergence par coopération**

Dans son livre de 1999 [91], Ferber désigne le phénomène d'émergence au sein des SMA comme le fait de favoriser l'augmentation des performances du groupe et donc, la probabilité individuelle de survie. Pour Ferber, l'émergence est prévisible, car elle se réfère à des phénomènes attendus de l'interaction de plusieurs agents tels que l'émergence par amplification qualitative, qui augmente les capacités et les performances des agents de manière isolée et ainsi améliore qualitativement le système. Puis, l'émergence par amplification quantitative, qui augmente le nombre d'agents et qui permet de mettre en évidence l'effet de seuil, propose qu'il existe un certain nombre d'agents à partir desquels il sera possible de traiter le problème.

### **L'émergence par interaction**

Selon [25], *"Une étude des phénomènes d'émergence d'organisations par interaction, est proposée par Marcelpoil. A cet égard, il présente un outil d'analyse de sociétés cellulaires, fondé sur une modélisation simplifiée de la cellule et de ses interactions avec son environnement. L'objectif de l'étude cellulaire est d'explorer les relations qui existent entre les fonctions des cellules et la structure de leur environnement. Le but est, d'une part, d'inclure le fonctionnement individuel de chaque cellule et la sensibilité de ses récepteurs aux facteurs l'entourant, et d'autre part, de représenter la distribution et l'organisation spatiale des cellules du tissu. En conclusion, le but de ce travail est l'exploration des phénomènes d'homéostasie et de dérèglement dans un tissu, à partir d'un outil de modélisation et de simulation de la vie cellulaire. Les auteurs se sont particulièrement intéressés à la variété des comportements collectifs qui peuvent résulter d'un jeu de lois locales données a priori. Cet outil a permis d'étudier les processus d'organisation structurelle et fonctionnelle d'un tissu à partir des lois et potentialités de ses éléments constitutifs. L'observation du comportement des agents, en faisant abstraction du modèle et de l'architecture interne de ceux-ci, est axée essentiellement sur le résultat interactions. En effet, la notion d'interaction offre un cadre de développement et d'analyse permettant de construire des systèmes plus complexes, robustes, autonomes et adaptatifs."*

## 3.2.2 Épistémologie des colonies de fourmis

### 3.2.2.1 Introduction

Les colonies de fourmis artificielles sont une implémentation directe des modèles de programmation, orientée agents, suivant un modèle purement réactif. Introduite et développée par M. Dorigo et ses collègues, en s'inspirant des travaux du zoologiste P.P.Grassé, l'intelligence en essaim, comme outil de résolution de problème complexe, s'est nourrie du comportement de divers insectes et animaux dit sociaux.

L'optimisation par colonie de fourmis (ou Ant Colony Optimization ACO) est une méthode d'optimisation bio-inspirée du comportement de certaines espèces de fourmis, pour la recherche de nourriture. Suite à leur phase de déplacement, leur ayant permis de trouver de la nourriture, les fourmis reviennent au nid en déposant des phéromones sur leur chemin dans l'objectif d'indiquer aux autres membres de la colonie un chemin favorable. L'ACO étant une technique bio-inspirée du comportement des fourmis, elle propose une mécanique similaire pour permettre de résoudre des problèmes complexes.

### 3.2.2.2 Inspiration Biologique

Les colonies de fourmis, en tant qu'algorithme, comme méthode de résolution de problèmes dit NP-HARD sont le fruit de travaux de bio-inspirés. Ces travaux s'inspirent de la nature, cherchant à extraire des mécanismes issus de siècles d'adaptation aux milieux étudiés, pour mettre au point de nouvelles technologies et solutions techniques efficaces, pour un problème donné.

### Biomimétisme et Bio-inspiration

La bio-inspiration est un concept constitué de diverses actions. Les définitions suivantes ont pour but de donner une définition précise aux divers termes utilisés pour désigner des actions que sont la biomimétique, le biomimétisme et la bionique.

Le biomimétisme (biomimicry/biomimesis) : le biomimétisme est une philosophie consistant à prendre la nature pour modèle, notamment à un niveau organisationnel, afin de répondre aux enjeux du développement durable (sociaux, environnementaux et économiques). [116]

La biomimétique (Biomimetic) : La biomimétique est un processus créatif interdisciplinaire entre la biologie et la technologie, dans le but de résoudre des problèmes anthropocentriques par l'abstraction, le transfert et l'application de connaissances issues de modèles biologiques. [116]

Bionique (Bionic) : La bionique est une discipline très liée à la robotique visant à la reproduction, l'augmentation ou le remplacement de fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques [116].

Au travers de cette approche, le concept de biomimétisme est défini comme une discipline plus complexe que la simple application directe des propriétés et spécificités du vivant, identifiées dans la nature. Cependant, cette approche, mettant en œuvre les trois définitions ci-dessus, présente une volonté de ne pas se rapporter à l'étymologie du mot biomimétisme.

Biomimétisme est constitué de "Bio" qui veut dire "Vie" et de "mimétisme" signifiant "inspiration". Ainsi, le biomimétisme, du point de vue étymologique, consiste à copier le vivant.

Dans cette volonté de proposer une définition du domaine de la biomimétique qui respecte l'étymologie du mot, [116] propose une approche qui mette en avant la bio-inspiration, plutôt que le biomimétisme au travers de plusieurs degrés de bio-inspiration. Du plus simple comme la copie directe, jusqu'au plus complexe telle que la transposition (extrapolation) de principes et de fonctionnement du vivant. Selon cette approche, la biomimétique peut être classée comme premier niveau ou premier degré de la bio-inspiration.

Pour [116], *"La bio-inspiration incluant le biomimétisme fait appel à la transposition et à l'adaptation des principes et des stratégies élaborés par les organismes vivants et les écosystèmes. Ainsi, connaître ces principes nous apparaît primordial, car nous ne pouvons pas créer ce que nous ne comprenons pas (Richard Feynman)"*.

Cette démarche d'intégration du biomimétisme au sein de la bio-inspiration est intéressante puisqu'elle incite à séparer et distinguer deux questionnements pourtant proches l'un de l'autre, mais qui impliquent des directions opposées dans le travail réalisé, de par leur approche différente. Le premier questionnement interroge le fait d'être capable d'identifier les raisons à l'origine, incitant l'ingénieur à vouloir imiter le vivant (le biomimétisme). Quant au deuxième, il cherche à identifier ce qui, dans la nature, peut être source d'inspiration pour l'ingénieur ? (la bio-inspiration).

Du point de vue international, la biomimétique à également fait l'objet en 2015 d'une normalisation de ses termes, définitions et concepts, au travers de l'ISO TC266 [131].

### A l'origine des colonies de fourmis

Les fondements de l'observation des insectes sociaux remontent à 1946 avec les premiers travaux de Pierre-Paul Grassé [113]. Grâce à ses travaux, durant lesquels il observait le comportement des termites, P.P. Grassé pu mettre en évidence que certaines espèces de termites réagissent à des "stimulus significatifs". De plus, il a pu observer que les comportements induits par ces stimulus significatifs peuvent être interprétés comme source de "stimulus significatifs" par d'autres termites. Pour qualifier ce comportement de réponse aux stimulus, P.P. Grassé a utilisé le terme de "Stigmergie" [114], comme moyen de communication dans lequel les "ouvriers sont stimulés par la performance qu'ils ont réalisée".

Par la suite, P.P. Grassé a caractérisé la stigmergie, comme mode de communication selon deux axes, qui la différencie de toute autre forme de communication :

- La stigmergie est une forme de communication mettant en œuvre des échanges indirects et non symboliques, véhiculés par le biais de l'environnement.
- La stigmergie ne permet de communiquer une information que de manière localisée dans l'environnement. Seul l'insecte qui visite un point précis de l'environnement peut avoir accès à l'information.

Les fourmis et leurs colonies sont également une bonne source d'illustration de la stigmergie. Dans la majorité des espèces de fourmis, ces dernières se déplacent au sol en explorant leur environnement, à la recherche de sources de nourriture. Pour se déplacer, les fourmis sont guidées par les phéromones qu'elles perçoivent et qui ont été déposées par d'autres fourmis passées précédemment, ayant trouvé une source de nourriture viable. Plus la concentration en phéromone d'un chemin sera élevée, plus les fourmis auront tendance à le suivre. De par ce mécanisme, les fourmis sont capables de se déplacer jusqu'à une source de nourriture déjà trouvée par la colonie, sans besoin de communication inter-élément, ni organisation du travail quelconque.

De plus, lorsque les fourmis explorent leur environnement à la recherche d'une nouvelle source de nourriture, ces dernières se déplacent de manière aléatoire jusqu'à en trouver une. Cela fait, elles vont rentrer à la colonie, avec de la nourriture, par le chemin qu'elles ont suivi pour trouver ladite source et placer des phéromones tout du long, permettant aux autres membres de la colonie de trouver la source.

La stigmergie, comme mode de communication, repose sur une organisation d'éléments ne faisant que réagir aux stimulus présents dans l'environnement. De ce comportement local simple peut émerger une organisation complexe.

En 1990, Deneubourg et al. [50] ont cherché à étudier plus en profondeur le comportement des fourmis, en matière de ponte et de suivi de phéromones. Pour cela, ils ont conçu une expérience connue sous le nom d'"expérience du double pont". Lors de cette expérience, une colonie de fourmis d'Argentine était disposée d'un côté d'un double pont, dont chaque pont faisait la même longueur, et de l'autre se trouvait une source de nourriture. Partant de la colonie, les fourmis exploraient de manière aléatoire leur environnement jusqu'à trouver la source de nourriture. Une fois la source trouvée, elles retournaient à la colonie en déposant des phéromones sur leur chemin qui, une fois rentrées, pouvait servir de guide aux autres fourmis pour trouver la source de nourriture. Dans un premier temps, chaque fourmi choisissait au hasard l'un des deux ponts, mais au fur et à mesure de l'accroissement de la quantité de nourriture récupérée et de la quantité de phéromone déposée, l'un des deux ponts présentait une concentration de phéromone plus élevée, attirant bien sûr plus de fourmis. Ainsi, de par cette concentration de phéromone qui augmentait sur l'un des deux ponts, celui avec la plus forte concentration a fini à supporter le trafic de l'ensemble des fourmis de la colonie, entre cette dernière et la source de nourriture.

Ce comportement de la colonie de fourmis à exploiter les phéromones comme rétro-action positive permettant de choisir un chemin et de le suivre, pour trouver le chemin le plus court entre la source de nourriture et la colonie, se nomme : "autocatalyse".

Dans une autre expérience, Goss et al. [112] ont proposé une variante de l'expérience du double pont, dans laquelle l'un des deux ponts était significativement plus court que l'autre. Dans un premier temps, les déplacements des fourmis pour trouver la source étant aléatoires ou stochastiques, celles prenant le pont le plus court étaient les premières arrivées à la source de nourriture. Ainsi, le pont le plus court étant le premier à recevoir les phéromones, les fourmis ont naturellement été plus attirées pour le traverser, augmentant par la même d'avantage sa concentration en phéromones.

Au travers de cette expérience, Goss et al. [112] ont pu démontrer l'émergence du chemin le plus court dans un ensemble donné. Ils ont également pu développer un modèle mathématique du comportement des fourmis. À un instant donné "t" en supposant qu'un nombre de fourmis "m1" ont utilisé un pont et "m2" l'autre à disposition, la probabilité p1 pour une fourmi de choisir le premier pont est donné par :

$$P_1 = \frac{(m_1 + k)^h}{(m_1 + k)^h + (m_2 + k)^h} \quad (3.1)$$

avec k et h des constantes devant être définies pour le problème étudié, dont les simulations de Monte Carlo ont montré un très bon ajustement pour k = 20 et h = 2 [202]. P2 = 1-p1.

### 3.2.2.3 Les techniques d'optimisations

L'expérience menée par Goss et al. [112] qui a permis de mettre en lumière la manière dont les phéromones permettent de faire émerger le chemin le plus court, parmi un ensemble donné, a été la principale source d'inspiration des chercheurs et a ouvert la voie au développement des colonies de fourmis comme solveur utilisé pour résoudre des problèmes complexes dit NP-HARD.

Ainsi, pour tout problème complexe, un ensemble de fourmis artificielles construisent autant de solutions à un problème d'optimisation et influence le comportement de leur semblable en fonction de la qualité d'une solution trouvée. La quantité de phéromone qu'une fourmi peut déposer étant l'image de la qualité de la solution. Plus la solution sera bonne, plus la quantité de phéromone déposée sera importante.

Le premier algorithme d'optimisation via colonie de fourmis (ou en anglais Ant Colony Optimization ACO) faisant date, est connu sous le nom d'"Ant System" (AS) [65], [61]. Le premier problème auquel l'AS a été confronté fut le problème du voyageur de commerce (ou en anglais Transportation Salesman Problems TSP). Par la suite, plusieurs variantes, toutes basées sur l'AS ont été proposées [24], [59], [59], [101], [102], [249], puis appliquées au cas du TSP, dans l'objectif d'en améliorer les résultats.

L'ensemble de ces nouvelles implémentations de l'AS partagent toutes une exploitation plus poussée de l'ensemble des solutions trouvées afin d'influencer le processus de recherche des fourmis. Enfin, parmi ces implémentations, les plus performantes pour le TSP améliorent les solutions générées par les fourmis en utilisant des algorithmes de recherche locale.

## Colonies de fourmis et Voyageur de commerce

### Le voyageur de commerce

Le voyageur de commerce (TSP) 4.2.1.1 est un problème qui a très largement été couvert dans la littérature scientifique [140], [155], [219] et qui continue d'être considéré comme un problème de base pour éprouver la pertinence de nouveaux algorithmes pour les raisons suivantes : [263]

- c'est un problème auquel les algorithmes ACO sont facilement applicables
- c'est un problème d'optimisation NP-dur [103]
- c'est un banc d'essai standard pour les nouvelles idées algorithmiques et une bonne performance sur le TSP est souvent considérée comme une preuve de leur utilité
- il est facilement compréhensible, de sorte que le comportement de l'algorithme n'est pas obscurci par trop de détails techniques.

Le TSP consiste à trouver, en partant d'une ville de départ, le chemin le plus court possible traversant l'ensemble des villes, une seule fois et revenant à son point de départ. Il est généralement représenté sous la forme d'un graphe ( $G$ ) complet pondéré  $G = (N, A)$ , avec  $N$  un ensemble de nœuds représentant les villes et  $A$ , un ensemble d'arcs reliant les villes  $N$  entre elles. De plus, à chaque arc  $A$  est affectée une valeur  $d_{ij}$ , représentant sa longueur, sachant que l'arc  $(i, j) \in A$ , avec  $i$  et  $j \in N$ . Autrement dit, le problème du TSP cherche à déterminer un circuit hamiltonien de longueur minimale dans un graphe, où ledit circuit est une tournée fermée visitant une seule et une seule fois, chaque  $n = N$  nœuds du graphe  $G$ .

### Colonie de fourmis et optimisation

Considérant le problème du voyageur de commerce appliqué aux colonies de fourmis, le problème est abordé en simulant un certain nombre de fourmis artificielles qui peuvent se déplacer le long des arcs d'un graphe. Le graphe représentant le problème à optimiser, chaque nœud représentant une ville et chaque arc représentant une connexion entre deux villes. De plus, lors du déplacement des fourmis, ces dernières déposent des phéromones sur l'ensemble des arcs qu'elles ont visités, cette phéromone pouvant être perçue ou modifiée par toutes fourmis parcourant l'arc donné.

*"L'optimisation par colonie de fourmis est un algorithme itératif. À chaque itération, un certain nombre de fourmis artificielles sont considérées. Chacune d'entre elles construit une solution en marchant de sommet en sommet sur le graphe avec la contrainte de ne pas visiter un sommet qu'elle a déjà visité dans sa marche. À chaque étape de la construction de la solution, une fourmi sélectionne le sommet suivant à visiter selon un mécanisme stochastique biaisé par la phéromone : lorsqu'elle est dans le sommet  $i$ , le sommet suivant est sélectionné de manière stochastique parmi les sommets non visités auparavant. En particulier, si  $j$  n'a pas été visité précédemment, il peut être sélectionné avec une probabilité qui est proportionnelle à la phéromone associée à l'arête  $(i, j)$ . À la fin d'une itération, sur la base de la qualité des solutions construites par les fourmis, les valeurs des phéromones sont modifiées afin de pousser les fourmis des itérations futures à construire des solutions similaires aux meilleures solutions construites précédemment"* [57].

### La métaheuristique de la colonie de fourmis

Dans leur article [57], Dorigo et al. résument l'optimisation par colonie de fourmis en tant que métaheuristique.

L'optimisation par colonie de fourmis (ACO) a été formalisée en une métaheuristique pour les problèmes d'optimisation combinatoire par Dorigo et ses collègues [63], [58]. Une métaheuristique est un ensemble de concepts algorithmiques qui peuvent être utilisés pour définir des méthodes heuristiques applicables à un large éventail de problèmes différents. En d'autres termes, une métaheuristique est un cadre algorithmique polyvalent qui peut être appliqué à différents problèmes d'optimisation avec relativement peu de modifications. Parmi les exemples de métaheuristicues, citons le recuit simulé [29], [147], la recherche tabou [108], [155], la recherche locale itérée [120], le calcul évolutionnaire [156]- [238] et l'optimisation par colonie de fourmis [61], [63], [58], [64]. Afin d'appliquer l'ACO à un problème d'optimisation combinatoire donné, un modèle adéquat est nécessaire, comme celui donné en exemple ci-dessous :

### Un problème d'optimisation combinatoire

Un modèle  $P = (S, \omega, f)$  d'un problème d'optimisation combinatoire, qui consiste en :

- un espace de recherche  $S$ , défini sur un ensemble fini de variables de décision discrètes  $X_i$ ,  $i=1, \dots, n$ .
- un ensemble  $\omega$ , de contraintes entre les variables
- Une fonction objectif  $f : S \Rightarrow R_0^+$  qui doit être minimisé.

La variable générique  $X_i$  prend des valeurs dans  $D_i = v_i^1, \dots, v_i^{|D_i|}$ . Une solution réalisable  $s \in S$  est une affectation complète de valeurs aux variables qui satisfait toutes les contraintes dans  $\omega$ . Une solution  $s^* \in S$ , est appelé un optimum global si et seulement si :  $f(s^*) \leq f(s) \forall s \in S$ .

Le modèle d'un problème d'optimisation combinatoire est utilisé pour définir le modèle de phéromone de l'ACO. Une valeur de phéromone est associée à chaque composant de solution possible, c'est-à-dire à chaque affectation possible d'une valeur à une variable. Formellement, la valeur de phéromone  $ij$  est associée à la composante de solution  $c_{ij}$ , qui consiste en l'affectation  $X_i = v_i$ . L'ensemble de toutes les composantes de solution possibles est désigné par  $C$ .

Dans une ACO, une fourmi artificielle construit une solution en parcourant le graphe de construction entièrement connecté  $GC(V, E)$ , où  $V$  est un ensemble de sommets et  $E$  un ensemble d'arêtes. Ce graphe peut être obtenu à partir de l'ensemble des composantes de la solution  $C$  de deux manières : les composants peuvent être représentés soit par des sommets, soit par des arêtes. Des fourmis artificielles se déplacent d'un sommet à l'autre le long des arêtes du graphe, construisant ainsi de manière incrémentielle une solution partielle. De plus, les fourmis déposent une certaine quantité de phéromone sur les composants, c'est-à-dire soit sur les sommets, soit sur les arêtes qu'elles traversent. La quantité de phéromone déposée peut dépendre de la qualité de la solution trouvée. Les fourmis suivantes utilisent les informations de la phéromone comme un guide vers les régions prometteuses de l'espace de recherche.

Dans le problème du voyageur de commerce, une solution peut être représentée par un ensemble de  $n$  variables, où  $n$  est le nombre de villes. Chacune de ces variables est associée à une ville. La variable  $X_i$  indique la ville à visiter après la ville  $i$ . Ici, les composantes de solution sont des paires de villes à visiter, l'une après l'autre, dans l'ordre donné : la composante de solution  $c_{ij} = (i, j)$  indique que la solution analysée prescrit que la ville  $j$  doit être visitée immédiatement après la ville  $i$ . Dans ce cas, le graphe de construction est un graphe dans lequel les sommets sont les villes du problème original du voyageur de commerce et les arêtes sont les composantes de solution. Par conséquent, les fourmis déposent de la phéromone sur les arêtes du graphe de construction.

Il convient de noter que le graphe de construction pourrait être obtenu en représentant les composants de la solution par des sommets sur lesquels la phéromone est déposée. Bien que cette deuxième façon d'obtenir un graphe de construction semble moins naturelle pour le problème du voyageur de commerce, elle est néanmoins correcte. Après l'initialisation, la métaheuristique itère sur trois phases : à chaque itération, un certain nombre de solutions sont construites par les fourmis ; ces solutions sont ensuite améliorées par une recherche locale (cette étape est facultative), et enfin la phéromone est mise à jour. Voici une description plus détaillée de ces trois phases :

La phase de construction des solutions : Un ensemble de  $m$  fourmis artificielles construit des solutions à partir d'éléments d'un ensemble fini de composants de solution disponibles  $C = c_{ij}$ , avec  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, |D_i|$ . Une construction de solutions commence à partir d'une solution partielle vide  $sp = \emptyset$ . À chaque étape de construction, la solution partielle  $sp$  est étendue par l'ajout d'un composant de solution réalisable de l'ensemble  $N(sp) \subseteq C$ , qui est défini comme l'ensemble des composants qui peuvent être ajoutés à la solution partielle actuelle  $sp$  sans violer aucune des contraintes dans  $\omega$ . Le processus de construction de solutions peut être considéré comme une marche sur le graphe de construction  $GC = (V, E)$ . Le choix d'un élément de solution dans  $N(sp)$  est guidé par un mécanisme stochastique, qui est biaisé par la phéromone associée à chacun des éléments de  $N(sp)$ . La règle du choix stochastique des composants de la solution varie selon les différents algorithmes ACO mais, dans tous les cas, elle est inspirée du modèle de comportement des fourmis réelles donné par l'équation 4.8.

La recherche locale : Une fois les solutions construites, et avant de mettre à jour la phéromone, il est courant d'améliorer les solutions obtenues par les fourmis par une recherche locale. Cette phase, qui est très spécifique au problème, est facultative bien qu'elle soit généralement incluse dans les algorithmes ACO les plus avancés.

La mise à jour des phéromones : L'objectif de la mise à jour des phéromones est d'augmenter les valeurs des phéromones associées aux solutions bonnes ou prometteuses, et de diminuer celles qui sont associées aux mauvaises solutions. Habituellement, on y parvient (i) en diminuant toutes les valeurs des phéromones par évaporation des phéromones, et (ii) en augmentant les niveaux de phéromones associés à un ensemble choisi de bonnes solutions.

### Les principaux algorithmes de colonie de fourmis

Un ensemble d'algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) ont été proposés au fur et à mesure de l'avancée de la recherche sur le domaine. L'algorithme d'origine Ant System (AS) étant toujours une référence du domaine, nous allons le présenter en détails, ainsi que deux évolutions notoires, MAX-MIN Ant System et Ant Colony System, au travers du TSP, comme exemple d'application.

#### Algorithme (Ant System)

Une explication détaillée de l'algorithme du Ant System (AS) est donnée dans [57].

La principale caractéristique de l'AS est qu'à chaque itération, les valeurs des phéromones sont mises à jour par toutes les fourmis qui ont construit une solution dans l'itération même. La phéromone  $\tau_{ij}$ , associée à l'arête joignant les villes  $i$  et  $j$ , est mise à jour comme suit :

$$\tau_{ij}(t+1) = [(1-\rho) * \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)] \quad (3.2)$$

Où  $\rho$  est le taux d'évaporation,  $m$  est le nombre de fourmis, et  $\Delta\tau_{ij}^k$  est la quantité de phéromone déposée sur l'arête  $(i, j)$  par la fourmi  $k$  :

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{1}{f(S^k)} & \text{if the edge belong to } S^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.3)$$

Où  $f(S^k)$  est la longueur de la tournée construite par la fourmi  $k$ . Lors de la construction d'une solution, les fourmis sélectionnent la ville suivante à visiter par un mécanisme stochastique. Lorsque la fourmi  $k$  est dans la ville  $i$  et a jusqu'à présent construit la solution partielle  $sp$ , la probabilité d'aller dans la ville  $j$ , est donnée par :

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{r \in N_j^k} [\tau_{ir}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ir}(t)]^\beta} & \text{if } j \in N_i^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.4)$$

Où  $N(sp)$  est l'ensemble des composantes réalisables, c'est-à-dire les arêtes  $(i, l)$  où  $l$  est une ville non encore visitée par la fourmi  $k$ . Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  contrôlent l'importance relative de la phéromone par rapport à l'information heuristique  $\eta_{ij}$ , qui est donnée par :

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (3.5)$$

Où  $d_{ij}$  est la distance entre les villes  $i$  et  $j$ .

On peut donc résumer l'algorithme de l'AS comme illustré dans l'algorithme 1, suivant :

---

**Algorithm 1** PROCEDURE ACO ALGORITHM

---

Configuration et initialisation des traces de phéromones  
**while** condition de terminaison non atteinte **do**  
    construire une solution de fourmis  
    mise à jour des phéromones  
**end while**

---

**Algorithme (MAX -MIN Ant System)**

Une explication détaillée de l'algorithme du MAX -MIN Ant System (MMAS) est donnée dans [57].

Cet algorithme [248] est une amélioration du système de fourmis original. Ses éléments caractéristiques sont que seule la meilleure fourmi met à jour les pistes de phéromone et que la valeur de la phéromone est liée. La mise à jour de la phéromone est implémentée comme suit :

$$\tau_{ij}(t+1) = [(1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^{best}(t)]\tau_{min}\tau_{max} \quad (3.6)$$

Où max et min sont respectivement les limites supérieures et inférieures imposées à la phéromone

Ensuite, l'opérateur  $[x]ab$  est défini comme suit :

$$[x]ab = \begin{cases} a & \text{if } x > a \\ b & \text{if } x < b \\ x & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\delta\tau_{ij}^{best} = \begin{cases} 1/L_{best} & \text{Si (i,j) appartient au meilleur tour} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.8)$$

$L_{best}$  est la longueur de la tournée de la meilleure fourmi. Il peut s'agir (selon la décision du concepteur de l'algorithme) soit de la meilleure tournée trouvée dans l'itération en cours - itération-best, Lib - soit de la meilleure solution trouvée depuis le début de l'algorithme - best-so-far, Lbs - soit d'une combinaison des deux.

En ce qui concerne les limites inférieures et supérieures des valeurs de phéromone, min et max, elles sont généralement obtenues de manière empirique et adaptées au problème spécifique à traiter [244]. Néanmoins, certaines lignes directrices ont été fournies pour définir min et max sur la base de considérations analytiques [249].

**Algorithme (Ant Colony System)**

Une explication détaillée de l'algorithme du Ant Colony System (ACS) est donnée dans [57].

La contribution la plus intéressante d'ACS [60] est l'introduction d'une mise à jour locale des phéromones en plus de la mise à jour des phéromones effectuée à la fin du processus de construction (appelée mise à jour des phéromones hors ligne).

La mise à jour des phéromones locales est effectuée par toutes les fourmis après chaque étape de construction. Chaque fourmi l'applique uniquement à la dernière arête traversée :

$$\tau_{ij} = (1 - \phi) * \tau_{ij} + \phi * \tau_0 \quad (3.9)$$

où  $\phi \in [0, 1]$  est le coefficient de décroissance de la phéromone, et 0 est la valeur initiale de la phéromone.

L'objectif principal de la mise à jour locale est de diversifier la recherche effectuée par les fourmis suivantes au cours d'une itération : en diminuant la concentration de phéromone sur les arêtes traversées, les fourmis encouragent les fourmis suivantes à choisir d'autres arêtes et, donc, à produire des solutions différentes. Ainsi, il est moins probable que plusieurs fourmis produisent des solutions identiques au cours d'une itération.

La mise à jour des phéromones hors ligne, de manière similaire au MMAS, est appliquée à la fin de chaque itération par une seule fourmi, qui peut être soit la meilleure de l'itération, soit la meilleure jusqu'à présent. Cependant, la formule de mise à jour est légèrement différente :

$$\tau_{ij} = \begin{cases} (1 - \phi) * \tau_{ij} + \rho * \delta\tau_{ij} & \text{si } (i,j) \text{ appartiennent au meilleur tour} \\ \tau_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.10)$$

Une autre différence importante entre ACS et AS réside dans la règle de décision utilisée par les fourmis pendant le processus de construction. Dans ACS, la règle proportionnelle dite pseudo-aléatoire est utilisée : la probabilité pour une fourmi de se déplacer de la ville  $i$  vers la ville  $j$ , dépend d'une variable aléatoire  $q$  uniformément distribuée sur  $[0, 1]$ , et un paramètre  $q_0$ ; si  $q < q_0$ , alors  $j = \arg \max_{k \in N(i)} \tau_{ik} \eta_{ik}$ , sinon l'équation 4.11 est utilisée.

### 3.2.2.4 Domaine d'intérêt de la technique

Actuellement, une partie de la recherche autour des ACO se concentre toujours sur les thèmes classiques du domaine tels que la résolution de problème NP-HARD, le routage des réseaux télécoms ou encore l'application aux problèmes industriels. Cependant, les algorithmes de colonie de fourmis offrent la possibilité, de par leur faible coût en ressource de calcul comparé aux méthodes exactes, de travailler sur des problèmes complexes encore plus inextricables, comme par exemple l'optimisation multi-objectifs, la prise en compte dynamique de données et la nature stochastique de la fonction objectif et de ses contraintes dans des applications de prise de décision en temps réel. De plus, d'autres travaux de recherche se concentrent sur l'adaptation des algorithmes d'ACO dans le cadre des problèmes d'optimisation discrets aux problèmes continus et sur l'étude des implémentations parallèles des algorithmes ACO.

#### Problème d'optimisation dynamique

Les problèmes d'optimisation dynamique sont caractérisés par l'évolution dans le temps de l'espace de recherche. Ainsi, au cours d'une phase d'optimisation, les paramètres caractérisant l'espace de recherche, la définition de l'instance et par conséquent la qualité des solutions, peuvent être amenés à varier. Pour faire face à de telles situations, il est essentiel que l'algorithme mis en place soit capable de prendre en compte les évolutions de l'espace de recherche, pour s'adapter et produire de nouvelles solutions au problème.

Pour illustrer le propos, le cas du routage des réseaux de communication est intéressant. Dans les applications "statiques", les méthodes exactes proposent des solutions bien plus pertinentes que les métaheuristiques. Cependant, dans le cas du routage dynamique, les colonies de fourmis sont une solution de pointe [105], [27]. De plus, les ACO ont également été appliqués à des versions dynamiques du TSP, dans lesquelles la distance inter-ville pouvait changer [179], [87] ou encore d'autres situations dans lesquelles les villes pouvaient être ajoutées ou supprimées dynamiquement de la carte.

On retrouve enfin le cas du routage dynamique de véhicule traité avec une implémentation d'ACS, qui a montré de bons résultats [185].

#### Problème d'optimisation stochastique

Dans le cas de problèmes stochastiques, les variables du problème sont de par nature aléatoires. En dehors des problèmes de routage réseau, pour lesquels l'accent a été mis sur leur caractère dynamique, le problème probabiliste du voyageur de commerce (PTSP) a été le premier problème stochastique abordé par les algorithmes ACO. Dans le PTSP, chaque ville a une probabilité donnée de nécessiter une visite et le but est de trouver une tournée a priori de longueur espérée minimale sur toutes les villes, avec la stratégie de visiter un sous-ensemble aléatoire de villes dans le même ordre qu'elles apparaissent dans la tournée a priori. Le premier algorithme ACO pour ce problème a été proposé par Bianchi et al [12]. D'autres algorithmes ACO pour le PTSP ont été proposés par Branke et Guntch [18], Gutjahr [115] et Birattari et al. [13].

### Optimisation multi-objectifs

Les multiples objectifs peuvent souvent être traités en les ordonnant ou en les pondérant en fonction de leur importance relative. Dans l'algorithme ACS à deux colonies pour le problème de routage de véhicules avec des contraintes de fenêtre temporelle et dans le MMAS pour le problème bi-objectif de l'atelier de permutation à deux machines, le problème d'optimisation multi-objectifs est traité en ordonnant les objectifs.

### Recherche parallèle

Les algorithmes d'ACO sont compatibles avec une parallélisation de son processus de recherche. Ainsi, [251] et [267] ont montré que plusieurs colonies de fourmis pouvaient être implémentées et opérer en parallèle, sur un même graphe, en étant exécutées sur plusieurs coeurs d'un même processeurs.

### Optimisation continue

Les algorithmes d'ACO ont également fait l'étude d'une application à l'optimisation continue. Lorsqu'un algorithme conçu pour l'optimisation combinatoire est utilisé pour résoudre un problème continu, l'approche la plus simple consiste à diviser le domaine de chaque variable en un ensemble d'intervalles. Toutefois, dans les cas où le domaine de variable est trop vaste et que la contrainte sur la qualité de la solution est élevée, cette approche n'est pas viable. Des projets de recherche tentent de proposer une approche basée sur les ACO pour pallier le problème [252], [3].

#### 3.2.2.5 Terminaison de l'algorithme

Nous l'avons vu dans la partie 3.2.2, l'optimisation par colonie de fourmis est née de l'étude de différentes espèces de fourmis dans leur milieu naturel. Au travers de ces études, l'objectif était de pouvoir analyser et comprendre le comportement de ces animaux sociaux au sein du groupe. De par ses travaux, P.P. Grassé, après avoir théorisé le comportement des fourmis et précisé le rôle des phéromones dans l'interaction de ces dernières, a introduit le concept de stigmergie pour expliquer la manière dont peut émerger une structure globale complexe de l'interaction de comportements locaux simples.

Plus tard, M. Dorigo, l'un des pères de l'intelligence en essaim, a proposé un modèle numérique du comportement des fourmis en se basant sur le modèle de P.P. Grassé. Cette approche bio-inspirée a conduit à la création des algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis (Ant Colony Optimisation ou ACO). C'est le concept de stigmergie couplé au nombre important d'individus pouvant être générés dans un essaim numérique qui a mené à l'implémentation de cet algorithme, dédié à la résolution de problèmes complexes.

Ainsi, au travers de cette étude du vivant et de l'approche bio-inspirée qui a fait naître l'algorithme de colonie de fourmis, l'attention des chercheurs s'est principalement concentrée sur l'individu et son comportement (tâche simple et interaction locale) au sein de la fourmilière.

Si l'on reprend l'algorithme d'origine d'optimisation par colonie de fourmis, le "Ant System", ce dernier exploite un environnement représentant le problème à résoudre, dans lequel les fourmis évoluent. Comme illustré dans l'algorithme 2, ci-dessous, les fourmis sont caractérisées par leur comportement de construction de solution, de dépose et de mise à jour de la phéromone. Ces comportements répondent à une méthodologie clairement définie, développée par Dorigo et ses collègues.

---

**Algorithm 2** PROCEDURE ACO ALGORITHM

---

```
Configuration et initialisation des traces de phéromones
while condition de terminaison non atteinte do
  construire une solution de fourmis
  mise à jour des phéromones
end while
```

---

Bien que l'AS et ses évolutions, tels que MMAS ou encore l'ACS, aient fait leurs preuves depuis ces vingt dernières années dans de nombreux travaux de recherche et application industrielle, une partie de l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis n'a fait l'étude d'aucune recherche de la part de ses concepteurs et n'a que très peu été adressé par la suite, dans la littérature scientifique.

Cette partie, pourtant centrale dans l'AS et toutes ses évolutions, concerne la méthodologie à mettre en place pour terminer la recherche de meilleure solution de la part des fourmis. Dans l'algorithme illustré par la figure 2, cette partie est identifiée par le critère de terminaison (ou termination condition ou termination criterion en anglais).

Nous rentrerons par la suite plus en détail dans la théorie autour du critère de terminaison, cependant celui-ci traduit de manière implicite le meilleur moment pour arrêter l'exploration de l'espace de recherche par les fourmis. La meilleure solution parmi celles trouvées lors de l'itération en cours pouvant être considérée d'une qualité qui ne peut plus être améliorée, ou plutôt dont le gain en qualité à chaque itération est négligeable.

Le projet de recherche SURATRAM étant un projet mettant en œuvre la résolution d'un problème d'optimisation dynamique et multi-object, il est nécessaire de pouvoir disposer d'une méthode permettant de déterminer, dynamiquement, le critère de terminaison de l'algorithme de colonie de fourmis, tout en garantissant la qualité de la solution trouvée.

Pour répondre à ce besoin, sera présentée dans la prochaine section une explication détaillée du besoin de dynamicité dans l'application d'optimisation de livraison de marchandise en centre urbain, puis dans une dernière section sera présentée une méthode basée sur l'influence de l'environnement des fourmis, sur ces dernières, pour déterminer le critère de terminaison de l'algorithme d'ACO.

### **3.2.3 Pourquoi travailler sur le critère de terminaison ?**

#### **3.2.3.1 Le besoin de dynamicité dans SURATRAM**

##### **L'optimisation dans SURATRAM**

Le système développé a pour but d'intégrer les flux de livraison de marchandises à destination des centres urbains, ainsi que les flux d'enlèvement de marchandises en provenance des centres urbains. Le tout en une seule application d'optimisation de transport de marchandises.

Le déploiement d'une telle application nécessite le développement de deux briques logicielles distinctes, ayant chacune un rôle donné.

La première brique logicielle est dédiée à la résolution du problème d'optimisation de tournée de véhicule (ou Vehicule Routing Problem VRP). Dans cette application, la méthode d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) est mise en place pour résoudre le problème du VRP. De plus, exploitant une flotte de véhicules électriques pour assurer la livraison des marchandises, il est nécessaire d'adapter la méthode de résolution du VRP. Pour cela, le problème d'optimisation de tournée, ou VRP, est approché selon la méthode d' "Electrical VRP" (EVRP), permettant d'intégrer tous les aspects et toutes les contraintes techniques liées à l'utilisation de véhicule électrique. La mise en place de l'EVRP est analysée en détail dans le chapitre 4.

La deuxième brique logicielle, qui sera présentée tout au long de ce chapitre 3.1, est, elle, dédiée au besoin de dynamicité dans l'application de tournée de véhicule (VRP). Ce besoin de dynamicité se concentre sur deux aspects de l'algorithme de VRP.

Dans un premier temps, le besoin de dynamicité du problème de tournée de véhicule s'intéresse au système en charge de la livraison des marchandises. Au sein d'une application de VRP, l'état du trafic et son évolution est la source de dégradation des performances du système. En effet, bien que le trafic puisse être prédit (si suffisamment de données sont à disposition), il est soumis à des aléas qui eux ne le sont pas. Pour cela, afin de minimiser l'impact des aléas stochastiques sur la performance du système, il est nécessaire que chaque véhicule puisse modifier, à un instant donné, son itinéraire jusqu'à son prochain point de livraison.

Dans un deuxième temps, le besoin de dynamicité du problème de tournée de véhicule s'intéresse lui au système en charge de l'enlèvement des marchandises. Notre système est capable de gérer la livraison de marchandises, grâce à une application d'optimisation de tournée, il doit aussi pouvoir

gérer leur enlèvement. Cet enlèvement étant dynamique, les marchandises peuvent apparaître à tout instant pour être récupérées par un véhicule. Ainsi, une fois le ou les véhicules identifiés, devant récupérer la marchandise, il faut que chacun d'eux puisse modifier son itinéraire, pour intégrer le point d'enlèvement à sa tournée.

### **La dynamique dans l'optimisation : quels besoins ?**

Nous l'avons vu, le projet SURATRAM bien que proposant une application d'optimisation de tournée de véhicule (VRP) pour assurer la livraison de ces marchandises, l'intégration des flux en provenance de l'espace urbain et à destination des centres de distributions urbains (CDU) est une étape clef dans le développement du marché de la vente en ligne pour les magasins physiques des centres urbains, ciblant un public local (distance géographique proche). Ainsi, il sera possible de doter les commerçants de l'aire urbaine d'atouts tels que la livraison à domicile de produits locaux ou encore la livraison en 24 h, le tout sans qu'ils aient besoin de gérer une surcharge de travail. Cela leur permettrait d'être plus compétitifs comparé à des géants du domaine comme Amazon, rendant les commerçants de ce fait plus attractifs aux yeux des clients. Pour toutes ces raisons, les applications de VRP, dans le cadre d'une démarche de développement social, économique et écologique des villes, doivent intégrer une contrainte de dynamique dans leur réalisation.

La première contrainte de dynamique du problème de tournée de véhicule s'intéresse au système en charge de la livraison des marchandises. Plus précisément, il concerne le trajet des véhicules de la flotte lorsque ceux-ci réalisent leur livraison. Dans une application traditionnelle de problème de tournée de véhicules, la tournée est optimisée selon un ou plusieurs critère(s), tels que la distance totale à parcourir, le temps total pour réaliser la tournée et le volume de transport restant non utilisé. Ces critères sont des éléments statiques, qui ne changent pas en fonction du temps et qui sont donc faciles à mettre en œuvre dans une application de VRP que l'on va calculer à l'avance (une nuit, pour le lendemain, par exemple). Cependant, des critères traduisant l'état du trafic sont difficiles à mettre en œuvre dans une application de VRP. Par définition, le trafic est un élément dynamique, changeant en fonction du temps, des heures de la journée, des jours et de la saisonnalité.

Ainsi, bien qu'il soit possible de prendre en compte l'état du trafic dans une application traditionnelle, dans le cas où l'on dispose d'une base de données répertoriant plusieurs années, voir des dizaines d'années de données, sur l'état du trafic en temps réel. Il serait alors possible, au travers d'une analyse poussée des données, de réaliser un outil de prédiction de l'état du trafic suivant l'heure de la journée, le jour de la semaine ou encore la saisonnalité. Cependant, le trafic routier n'en reste pas moins un élément changeant. Sa fluidité et sa densité, bien que pouvant être prédites, dépendent d'évènements stochastiques qui, eux, sont impossibles de prévoir. Ainsi, dans un environnement soumis à des fluctuations stochastiques qui peuvent influencer la performance du système (en augmentant par exemple le temps total mis pour réaliser la tournée), il est nécessaire de pouvoir modifier en temps réel le chemin d'un véhicule, jusqu'à son prochain point de livraison.

La deuxième contrainte de dynamique du problème de tournée de véhicule s'intéresse lui au système en charge de l'enlèvement des marchandises. L'application d'optimisation de transport de marchandises doit permettre de prendre en compte dynamiquement des marchandises, lorsque celles-ci sont mises à disposition sur un point de collecte. Les véhicules évoluant sur le système de transport public de la ville, les points de collecte de marchandises sont les mêmes que les points de livraison de marchandises, autrement dit, ils sont identiques aux arrêts du bus du système de transport public. Ainsi, en considérant que les marchandises qui doivent être enlevées apparaissent de manière stochastique, en fonction du temps, sur les différents arrêts de bus du système de transport public, les marchandises ne peuvent donc être récupérées que par un ou plusieurs des véhicules de la flotte, lorsque ces derniers sont en train de réaliser leur tournée. Par la suite, pour être capable d'identifier le ou les véhicules devant enlever les marchandises, un algorithme de prise de décision devra être alimenté avec un ensemble de critères, caractérisant chaque véhicule de la flotte, tel que la distance véhicule/objet, l'énergie restante, le volume de transport restant, etc. Enfin, une fois l'algorithme de décision ayant identifié le ou les véhicules devant prendre en charge l'enlèvement des marchandises, il faudra pouvoir modifier en temps réel le chemin du ou des véhicules, de leur position actuelle, jusqu'au point d'enlèvement.

### 3.2.3.2 Les fourmis comme vecteur de dynamique

#### Introduction

Le projet SURATRAM, au travers de son système de livraison de marchandises et de son système d'enlèvement de marchandises, revêt un fort besoin de dynamique. Ainsi, outre l'application d'optimisation de tournée de véhicule (VRP) en elle-même, le système de livraison et le système d'enlèvement, qui opèrent au travers des véhicules électriques circulant sur les voies de bus, ont besoin de pouvoir modifier l'itinéraire des véhicules qui transportent les marchandises où les récupèrent.

Dans le cas du système de livraison, la modification de l'itinéraire du véhicule passe par le recalcul du chemin de la tournée entre le prochain point de livraison et le point actuel. Ce recalcul d'itinéraire en temps réel doit permettre de s'adapter aux fluctuations du trafic et ainsi éviter de dégrader la qualité du système en termes de temps parcours total.

Dans le cas du système d'enlèvement, la modification de l'itinéraire du véhicule passe par l'ajout d'un point (d'enlèvement) dans la tournée. Cet ajout d'un point dans l'itinéraire de livraison doit être suivi d'un recalcul en temps réel de la tournée afin de déterminer un nouveau chemin minimisant la fonction objectif.

Les algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis (ou Ant Colony Optimization - ACO) font partie du domaine de l'optimisation traitant des métaheuristiques. Elles sont l'évolution des heuristiques, qui, face aux problèmes d'optimisation complexes et face aux difficultés rencontrées, ne permettaient pas de trouver une solution de bonne qualité. Les métaheuristiques offrent des résultats de très bonne qualité, comparées aux heuristiques. De plus, les métaheuristiques ont révélé leur intérêt, en fournissant des solutions optimales approchées à 5% près des solutions fournies par des méthodes exactes. Enfin, elles ont permis de considérablement réduire les temps de calcul pour la résolution des problèmes de la recherche opérationnelle qui, s'ils sont approchés au travers des méthodes exactes, nécessitent un temps de calcul élevé, voir très élevé.

Nous allons le voir par la suite, le fait que les ACO soient un pan du domaine des métaheuristiques n'est pas l'unique raison motivant leur utilisation afin de répondre aux besoins de dynamique du projet SURATRAM. Le besoin de dynamique du projet s'organise autour du système de livraison pour la prise en compte de l'évolution du trafic et le contournement des axes de congestion, ainsi que du système d'enlèvement devant être capable de recalculer sa tournée en prenant en compte l'ajout d'un nouveau point de passage pour la récupération de marchandises.

#### La dynamique : une contrainte pour la livraison

Les algorithmes d'ACO utilisent un environnement, ici présenté sous la forme d'un graphe, composé d'arcs (les sections de route) et de nœuds (les arrêts de bus), comme support sur lequel les fourmis artificielles peuvent se déplacer pour explorer l'ensemble des solutions possibles, parmi le champ de recherche à leur disposition. Durant chaque phase de recherche, les fourmis déposent une quantité de phéromones sur chaque arc composant leur chemin, image de la qualité de la solution que chacune d'entre elles explore à une itération d'algorithme donnée. La quantité de phéromones déposée est donc fonction des critères de pondération présents sur chaque arc du graphe, qui permet de minimiser la fonction objectif. Ainsi, la meilleure solution trouvée sera donc la solution sur laquelle la concentration de phéromone sera la plus élevée. De plus, il est important de remarquer que l'ensemble des arcs du graphe gravitant autour des arcs formant la meilleure solution, sont, eux aussi, dotés d'une concentration en phéromone, plus ou moins faible.

Considérant maintenant que les critères de pondération de chaque arc définissent la qualité du trafic à une heure donnée de la journée et que ces critères sont mis à jour en fonction de l'heure de la journée. De plus, considérons qu'un arc du graphe est jugé impraticable du moment où l'état du trafic sur cette section de route s'est trop détérioré, du fait d'une congestion du trafic trop importante ou du fait d'un accident bloquant la route durant un temps plus ou moins long.

Dans ces conditions, le véhicule ne peut réaliser sa tournée en empruntant le chemin pré-calculé par l'algorithme d'ACO. Il est donc nécessaire de recalculer, à la volée, un nouvel itinéraire de substitution permettant de contourner les arcs du graphe qui sont impraticables ou dit coupés.

Nous l'avons introduit ci-dessous, l'ensemble des arcs gravitant autour du meilleur chemin possèdent aussi une concentration en phéromone plus ou moins importante, du fait que ces arcs ont précédemment été explorés par les fourmis virtuelles lors de la précédente phase de recherche. Il apparaît donc opportun d'utiliser ces arcs, déjà pondérés, pour les explorer afin de déterminer une nouvelle solution permettant de contourner les arcs précédemment coupés.

Cette application des algorithmes d'ACO est très avantageuse dans un contexte de fort besoin de dynamique, car elle combine la rapidité de calcul des métaheuristiques travaillant sur un espace de recherche déjà pondéré, qu'il n'est pas nécessaire de re-explore dans sa globalité.

### **La dynamique : une contrainte pour l'enlèvement**

La contrainte de dynamique pour l'enlèvement des marchandises est caractérisée par l'apparition d'un nouveau point à visiter afin d'y récupérer les marchandises à enlever. L'enlèvement de marchandises ayant lieu lorsque les véhicules de la flotte sont en tournée, les véhicules se déplacent donc sur l'itinéraire précédemment calculé par le système de livraison. Ainsi, l'environnement est toujours le même, un graphe composé d'arcs (les sections de route) et de nœuds (les arrêts de bus) étant les points à visiter pour la livraison et l'enlèvement des marchandises.

Considérant qu'à une notification de marchandises à enlever correspond le besoin de visiter un nouveau nœud dans le graphe. Que ce nœud soit proche ou non du meilleur itinéraire précédemment calculé n'a pas d'importance, car les arcs, tout ou en partie, menant à ce point, disposeront déjà d'une certaine quantité de phéromone, ayant précédemment été visités par les fourmis artificielles.

Ainsi, re-calculer la tournée que doit effectuer le véhicule en prenant en compte un nouveau point d'enlèvement à visiter s'avère être une tâche aisément réalisable par un algorithme d'ACO, l'espace de recherche restant le même et, qui plus est, est déjà totalement ou en partie exploré par les fourmis des itérations précédentes de l'algorithme d'ACO. Cette mise en pratique de l'algorithme est encore une fois très avantageuse dans ce contexte de fort besoin de dynamique, car encore une fois, elle permet de bénéficier de l'antériorité de l'état de l'espace de recherche, en partie ou déjà exploré, que l'on couple à la rapidité de calcul des métaheuristiques permettant de faire émerger une solution de bonne qualité sur un temps donné court, voir très court.

## **3.2.4 Le critère de terminaison comme clef de l'ACO dynamique**

### **3.2.4.1 Introduction**

Dans une application telle que SURATRAM nécessitant un fort besoin de dynamique pour s'adapter en temps réel aux changements de l'état du réseau routier ou pour prendre en compte et visiter un nouveau point de collecte de marchandises, les fourmis artificielles des algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis sont à considérer comme vecteur de dynamique. Disposant d'un environnement dont les caractéristiques (ici les phéromones) peuvent être conservées dans le temps, il n'est pas nécessaire d'explorer à nouveau l'entièreté de l'espace de recherche lorsqu'une phase d'optimisation doit être effectuée. Ce qui permet de gagner un temps considérable sur le temps nécessaire à l'analyse du problème, déjà faible, les algorithmes d'ACO faisant partie du domaine des métaheuristiques.

Cependant, de par leur implémentation, les algorithmes d'ACO sont difficilement utilisables dans un contexte dynamique, l'itération de l'algorithme ne s'arrêtant que lorsque le critère de terminaison est atteint. Sauf que, dans la définition des différents algorithmes d'ACO proposés jusqu'à alors, aucun ne mentionne de méthodologie ou de règle mathématique permettant de déterminer ou de calculer ce critère de terminaison. Ainsi, les algorithmes d'ACO sont actuellement difficilement utilisables dans un contexte non supervisé par un humain, pour spécifier à l'algorithme le moment opportun où arrêter la recherche de meilleure solution.

Dans ce contexte, il est intéressant de se demander si une méthodologie, quelle qu'elle soit, permettrait de trouver un critère de terminaison, qui serait donc l'image du nombre optimal d'itération à réaliser par l'algorithme d'ACO pour identifier une solution optimale approchée, au problème complexe étudié. De plus, il est important de se poser la question du contexte dans lequel ce critère de terminaison pourrait être utilisé. En effet, pour une application traditionnelle des ACO, précalculant à l'avance un ensemble de solutions dans le but d'en produire une analyse, ce critère de terminaison pourra ne pas être des plus pertinents. Cependant, dans le cadre d'une application dynamique, (considérant une application en mouvement, évoluant dans le temps [164]), la non-supervision par un humain de l'arrêt de l'analyse de l'espace de recherche est un atout primordial, permettant à l'application d'être autonome en convergeant de manière dynamique.

#### 3.2.4.2 ACO et tournée de véhicule statique

On entend par traditionnelle, la mise en place d'un algorithme d'optimisation de tournée de véhicule, qui, selon une fonction objectif monocritère ou multicritère, va calculer un corpus de solution permettant de livrer l'ensemble des marchandises à disposition à un instant T donné. Dans le cas du projet SURATRAM, ayant fait le choix de se baser sur une implémentation d'algorithme d'ACO pour optimiser les tournées de véhicule, les fourmis artificielles de la colonie vont pouvoir explorer l'espace de solution, à la recherche de solutions remarquables, satisfaisant les critères d'optimisation de la fonction objectif. Une fois cet ensemble de solution généré, ces dernières vont être analysées une par une et triées en fonction de critères tels que le temps de parcours total, le volume de marchandises restant, ainsi que le nombre de cycles qu'un véhicule va devoir effectuer pour réaliser la tournée et bien d'autres. Ainsi, de par cette méthodologie d'analyse de l'ensemble des solutions, arrêter l'interaction de l'algorithme d'ACO avec un critère de terminaison autodéterminé, qui définit la solution trouvée comme meilleure solution, est certes intéressante mais, dans les faits, discutable .

En effet, pour ce cas d'application des ACO, peu importe que la phase d'optimisation soit longue et que la courbe de qualité de la solution ai fini par stagner, car lors de la phase d'analyse, la qualité de chacune des solutions de l'ensemble calculé sera aisément identifiable par la personne en charge de leur examen. Enfin, une fois toutes les solutions analysées et comparées entre elles, l'une d'entre elles sera choisie comme itinéraire pour la réalisation de la tournée.

#### 3.2.4.3 ACO et tournée de véhicule dynamique

Le dictionnaire Larousse définit la dynamique comme : "Considérant les phénomènes dans leur évolution dans le temps". De par cette définition, la dynamique fait état des phénomènes qui en fonction du temps vont évoluer. Cette évolution pouvant permettre de s'adapter à des besoins qui évoluent, eux aussi, au cours du temps, ou de pouvoir s'adapter à des phénomènes imprévisibles pouvant bloquer le système dans un état. Dans notre cas, la dynamique traduit donc la capacité d'un système à s'adapter aux changements au cours du temps.

Nous l'avons vu dans le chapitre 2.2, le projet SURATRAM revêt un besoin fort de capacité d'adaptation (dynamique) aux perturbations du trafic, ainsi qu'à l'apparition de nouveaux points de collecte devant être visités pour enlever des marchandises. Le système de livraison exprime un besoin de dynamique, devant être capable de recalculer en temps réel un nouvel itinéraire pour contourner la perturbation du trafic et ainsi limiter la dégradation du système. Concernant le système d'enlèvement, celui-ci doit pouvoir recalculer, en un temps donné très court, l'itinéraire de sa tournée, en prenant en compte l'ajout d'un point à visiter dans celle-ci.

Dans ce contexte, l'implémentation des algorithmes d'ACO ne permet pas de répondre aux besoins de dynamique de ces deux applications, le critère de terminaison ne pouvant pas être calculé. Il est donc impossible de déterminer le nombre d'itérations minimal à effectuer, permettant de considérer la solution trouvée comme optimale.

## 3.3 L'influence de l'environnement comme vecteur de convergence pour l'ACO

### 3.3.1 Introduction

Cette partie est dédiée à l'une des contributions apportées lors de cette thèse. Elle concerne une méthode permettant de déterminer le critère de terminaison d'un algorithme d'ACO en fonction des critères intrinsèques du problème étudié. Toujours dans une démarche de bio-inspiration, la solution envisagée propose d'étudier l'influence de l'environnement sur les fourmis, comme vecteur de convergence de l'algorithme d'ACO.

Le projet SURATRAM, en tentant de proposer une application intégrant un système de livraison de marchandises et un système d'enlèvement qui soit capable de s'adapter aux aléas du trafic routier en temps réel ainsi qu'au besoin de récupération en temps réel de marchandises, exprime un besoin fort de dynamique. Dans cette optique, les fourmis des algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) ont été identifiées comme vecteur de dynamique, permettant une adaptation rapide aux contraintes du système. Cependant, l'algorithme d'ACO est lui-même limité dans sa capacité à se terminer sans la supervision d'un opérateur humain.

Depuis le développement des ACO, les efforts déployés se sont principalement concentrés sur le développement de la construction des itérations et la mise à jour des phéromones. L'arrêt des itérations de l'ACO sans la supervision d'un humain n'a lui-même, que très peu été traité dans la littérature scientifique.

La détermination du critère de terminaison de l'algorithme des colonies de fourmis reste en pratique un point de recherche sensible. Nous l'avons expliqué, l'intérêt de trouver le critère de terminaison dépend du type d'application mis en place exploitant les colonies de fourmis. Comme nous le verrons plus loin, l'approche la plus couramment utilisée est basée sur l'exploitation empirique de l'algorithme d'ACO dans le but d'en déterminer la meilleure solution au problème et donc d'en identifier le critère de terminaison, comme étant le nombre d'itérations optimal à réaliser. Cependant, cette méthode nécessite d'avoir un retour d'expérience important sur le problème étudié. Autrement dit, l'application devra être lancée un certain nombre de fois pour que l'opérateur humain soit capable d'estimer la solution comme optimale pour le problème donné.

Pour cela, nous proposons dans cette section une nouvelle approche innovante pour déterminer le critère de terminaison d'un algorithme d'ACO en fonction des critères intrinsèques du problème étudié. Toujours dans une démarche de bio-inspiration, la solution envisagée propose d'étudier l'influence de l'environnement sur les fourmis, comme vecteur de convergence de l'algorithme d'ACO.

### 3.3.2 Critère de terminaison

De par la propriété stochastique des algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis, l'émergence d'une solution pour tout problème donné est garantie pouvant atteindre une probabilité 1, pour un temps d'exploration infini de l'environnement caractérisant le problème. Cependant, une telle mise en pratique n'est pas possible, ne disposant pas d'un temps infini. De plus, pour un temps de calcul long, les méthodes exactes offrent de meilleurs résultats que les méthodes approchées, les heuristiques ou les métaheuristiques. C'est pourquoi, il est nécessaire de s'accorder sur le critère de terminaison de l'algorithme d'ACO permettant de stopper son exécution. Cependant, pour stopper l'exécution de l'ACO, il faut être capable de déterminer si la solution trouvée peut être considérée comme solution optimale (à 5% près d'une solution trouvée par une méthode exacte) pour le problème complexe étudié.

Selon cette approche, le nombre d'itérations de l'algorithme d'ACO est la clé de sa convergence. À une itération donnée, ne peut correspondre que l'amélioration de la qualité de la solution ou le cas échéant, sa stagnation. Ainsi, plus le nombre d'itérations de l'algorithme est élevé, meilleure sera la qualité de la solution. Cependant, fixer arbitrairement un nombre d'itérations très élevé est inefficace en termes de ressources, qu'elles soient énergétiques et/ou temporelles et/ou informatiques.

Cette amélioration continue de la solution à chaque itération de l'algorithme est illustrée par le phénomène de "Stalling effect" 3.3, que [270] définissent comme suit : *"le problème de l'effet de décrochage dans la fonction de fitness est lié à la non-amélioration de la valeur de fitness au cours du processus évolutif"* . Ce phénomène ayant été observé à travers de nombreux passages d'algorithmes, il apparaît qu'une meilleure solution émerge à un moment donné de la recherche. Cependant, cette dernière a tendance à stagner avant l'arrêt de la simulation, sans qu'une meilleure solution n'émerge à nouveau.

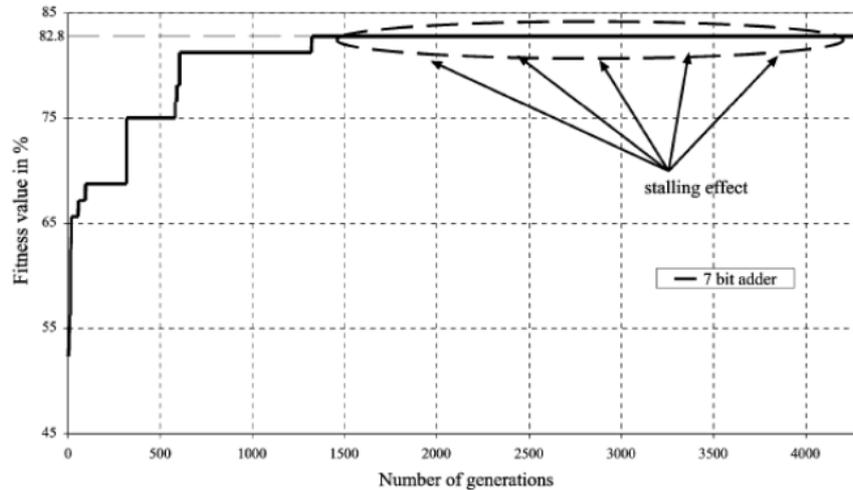


FIGURE 3.3 – ACO - Courbe de stagnation

Ainsi, pour l'ACO, l'optimisation des ressources est entièrement basée sur la manière dont le critère de terminaison est fixé. Entre la littérature scientifique et l'exploitation empirique, il existe différentes méthodes que nous allons maintenant détailler.

Actuellement, l'une des approches les plus répandues consiste à utiliser un critère de terminaison choisi de manière arbitraire. Cela se traduit généralement par un nombre fixe et élevé du nombre d'itérations de l'algorithme. Lorsque le nombre d'itérations spécifié est atteint, l'algorithme renvoie la solution trouvée [100]. Une autre approche, mais similaire, consiste à arrêter l'itération de l'algorithme après que celui-ci ait dépassé un certain temps d'exécution, toujours défini de manière aléatoire [215]. En outre, une autre application classique est l'exploitation empirique. Une façon simple de le faire est de lancer un certain nombre de fois un algorithme d'ACO, avec différents paramètres, et ensuite d'identifier manuellement la meilleure solution émergente possible. Nicolas et al. [192] ont développé une solution itérative, selon cette méthodologie, qui consiste à lancer plusieurs fois leur algorithme de colonies de fourmis conditionné par un nombre minimum d'itérations à atteindre. Ils déterminent ensuite un pourcentage de réussite en comparant les différentes solutions obtenues en fonction de facteurs évoluant à chaque exécution.

L'ensemble de ces méthodologies semblent, au premier abord, très intéressantes car, après avoir caractérisé le problème, le critère de terminaison de l'ACO semble parfaitement fixé. Cependant, les algorithmes automatisés développés demandent d'identifier la qualité de la solution avant d'avoir la connaissance du problème. Ces méthodologies sont une approche intéressante pour l'étude de problèmes déjà connus, mais demandent d'avoir un retour d'expérience sur des problèmes inconnus. Ainsi, ces méthodologies traduisent une mise en œuvre très gourmande en ressources, ce qui est antinomique avec le principe d'optimisation recherché par les métaheuristiques. Sinon, Zhang et al. [280] proposent quant à eux une solution caractérisant l'évolution du système à l'aide de trois facteurs. Les deux premiers facteurs évaluent si le critère de terminaison est satisfait et le dernier est basé sur la quantité de phéromone du plus court chemin.

En plus des méthodes ci-dessus, basées sur l'utilisation d'un ou plusieurs facteurs d'analyse, permettant d'estimer si le critère de terminaison est satisfait ou non, des solutions basées sur des arbres de décision ont également été développées. Kate et al. [7] ont développé un arbre de décision qui détermine la meilleure heuristique à mettre en œuvre pour résoudre le problème donné. Kate et al. [144], ont également travaillé sur un moteur ontologique permettant de choisir la meilleure condition d'arrêt, pour optimiser le critère de terminaison.

De plus, en continuant d'explorer la littérature scientifique, d'autres méthodes sont apparues aptes à résoudre notre problème. Une approche [270] basée sur un modèle physique a attiré notre attention. Cette solution met en œuvre la mécanique du point à travers l'observation des courbes de position, de vitesse et d'accélération dérivées de la courbe de stagnation 1. L'étude de ces courbes est censée aider à la prise de décision pour arrêter l'exécution de l'algorithme.

Pour terminer cette revue des différentes approches disponibles dans la littérature, abordons maintenant la recherche du minimum local. La solution fournie par [177], propose d'arrêter cette recherche de solution lorsqu'une meilleure solution est trouvée, couplée à un critère d'arrêt arbitraire dans le cas où l'algorithme ne converge pas. Cependant, rien n'est défini quant à la manière dont la meilleure solution est évaluée, ni même quant à sa corrélation avec l'environnement dans lequel la recherche est menée.

Au final, pour chacune de ces approches, qu'elles soient faciles ou complexes à mettre en place, elles se basent toutes sur l'ajout de méta-paramètres, simples ou combinés entre eux, pour approcher le critère de terminaison de l'algorithme. Le problème étant, qu'il est difficile de savoir si ces méta-paramètres traduisent bien l'évolution de la courbe de solution. De plus, avec ces approches, comment être sûr que la solution identifiée peut être considérée comme optimale (ou non) pour le problème donné.

### 3.3.3 Repenser l'approche du critère de terminaison

D'après l'étude de la littérature scientifique, la définition d'un critère de terminaison approprié reste un problème fondamental concernant l'optimisation par colonie de fourmis. En effet, plus que l'arrêt du programme, le critère de terminaison définit implicitement le meilleur moment possible pour arrêter l'exploration du problème. Sans un temps infini pour que la meilleure solution émerge, il devient nécessaire de pouvoir mettre en place une solution qui serait capable d'arrêter l'exécution de la colonie de fourmis, lorsqu'une solution qui peut être considérée comme optimale, est atteinte.

En conséquence, l'étude du "Stalling effect", (ou en français, l'étude de la stagnation de la courbe de qualité de la solution) semble être la meilleure piste à considérer pour déterminer le critère de terminaison de l'ACO. Suite à la lecture de la littérature scientifique dédiée au problème, il apparaît que peu importe les méthodes proposées, elles se concentrent toutes sur l'analyse de la stagnation de la courbe.

Si l'on se réfère à la littérature scientifique, un large panel de méthodes, plus ou moins élaboré, ont été proposées pour tenter de déterminer le critère de terminaison de l'ACO. Cependant, déterminer le critère de terminaison d'un processus stochastique n'est pas chose aisée. Pour cela, bon nombre de ces solutions ajoutent des hyper-paramètres à leur méthode de résolution. Le problème de ces hyper-paramètres est qu'ils complexifient énormément la méthode utilisée.

Ainsi, dans un premier temps, nous avons fait le choix de proposer deux méthodes pragmatiques pour tenter de caractériser le critère de terminaison de l'ACO. De plus, nous souhaitons profiter de la situation pour mettre en avant les limites à l'utilisation des hyper-paramètres.

#### 3.3.3.1 Une approche pragmatique

Concernant la première méthode, nous proposons d'étudier la stagnation de la courbe au moyen d'une moyenne mobile se déplaçant sur la courbe, au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles valeurs. Ainsi, à chaque pas de temps, on calcule une moyenne constituée d'un ensemble de  $X$  valeurs, ces valeurs étant les dernières à avoir été échantillonnées sur la courbe. Ensuite, nous calculons un delta, représentant la soustraction de la moyenne. Comme ce delta évolue à chaque pas d'algorithme, on le compare à un critère *epsilon*, qui lorsqu'il devient inférieur à la valeur *epsilon*, qui, permet d'arrêter l'algorithme, ayant identifié un minimum local.

Avec  $\phi$  le nombre d'itérations,  $\epsilon$  la limite de la stagnation de la qualité de la solution et  $\tau$  le critère pour arrêter l'exécution de l'algorithme.

---

**Algorithm 3** Moving average solution

---

```

$$\phi \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$$
if  $\phi < \epsilon$  then  
     $\tau \leftarrow 1$   
else  
     $\tau \leftarrow 0$   
end if
```

---

### 3.3.3.2 Un raffinement de l'approche pragmatique

La deuxième méthode proposée est un raffinement de la première méthode, permettant d'éliminer un critère d'évaluation (ou hyper-paramètre). De plus, étant inspirée des processus markoviens d'action récompense [226], elle est censée pouvoir s'adapter au problème donné, même si celui-ci est amené à évoluer. De cette manière, la recherche dynamique d'un critère de terminaison doit permettre une exploration poussée du problème.

En ce qui concerne l'implémentation, notre algorithme est défini comme suit. Nous initialisons une variable *epsilon* étant la profondeur du minimum local à explorer, puis pour chaque cas possible, nous faisons évoluer ce compteur. Dans le cas d'une amélioration de la solution, nous incrémentons *Epsilon*, puis s'il reste stable, nous le décrétons. Grâce à cette méthode, plus *epsilon* est initialisé haut, plus le minimum local sera exploré en profondeur.

---

**Algorithm 4** Calculate the optimal number of iteration

---

```
 $\phi \leftarrow reward$   
if  $\epsilon < \theta$  then  
     $reward \leftarrow reward + 1$   
     $\theta \leftarrow \epsilon$   
end if  
if  $\epsilon < \theta$  then  
     $reward \leftarrow reward - 1$   
     $\theta \leftarrow \epsilon$   
end if  
if  $reward == 0$  then  
    Stop algorithm  
end if
```

---

Avec  $\phi$  le nombre minimum d'itération pour limiter la stagnation de la solution de qualité,  $\epsilon$  la qualité de la solution courante,  $\theta$  la solution de qualité de l'itération précédente et  $\tau$  les critères pour arrêter l'exécution de l'algorithme.

Encore une fois, ce travail, bien qu'étant fonctionnel et proposant un raffinement de la première approche pragmatique, en supprimant un hyper-paramètre et en permettant à l'algorithme de s'adapter au changement pouvant survenir, cette approche n'en reste pas moins problématique. Comme dit, même si cette approche raffinée, proche de l'expérience d'apprentissage automatique, semble être fonctionnelle, elle n'en reste pas moins à utiliser un hyper-paramètre. Cet hyper-paramètre, *epsilon*, définissant la profondeur d'exploration des minimums locaux. Ainsi, comme précédemment, ne pas savoir sur quelle valeur initialiser *epsilon*, impose de disposer d'un retour d'expérience quant au problème étudié.

En conséquence, que cela concerne la méthodologie commune aux méthodes de recherche identifiées dans la littérature scientifique, ainsi que nos deux méthodes pragmatique, aucune d'entre elles ne considèrent l'évaluation de la solution obtenue lorsque l'ACO est arrêté. De cette manière, il n'est pas possible de déterminer si ladite solution peut être considérée comme optimale.

Dans l'objectif de pallier cette problématique, la section suivante présente une nouvelle méthodologie basée sur l'exploitation de l'environnement de la colonie de fourmis, le graphe, comme vecteur de convergence. Cette nouvelle méthodologie a pour but de pouvoir déterminer à la fois le critère

de terminaison de l'ACO, tout en fournissant une analyse sur la qualité de la solution pour savoir si cette dernière peut être considérée comme optimale ou non.

### 3.3.3.3 Environnement comme base de connaissance

Comme introduit précédemment, l'objectif visé est la caractérisation de la convergence de l'algorithme de colonies de fourmis. Que les solutions soient trouvées dans la littérature scientifique, ou qu'elles correspondent à nos deux approches pragmatique, la convergence des colonies de fourmis finit toujours par être définie à l'aide de critère fixé arbitrairement (hyper-paramètre). Partant de ce constat, nous avons essayé de prendre le contrepied de ce biais de conception pour proposer une méthodologie différente.

Ainsi, si l'on met de côté les hypers-paramètres, la question qu'il en vient à se poser est de savoir comment identifier le ou les élément(s) pouvant être vecteur(s) de convergence pour l'algorithme d'ACO. Une première constatation évidente est que tout problème mis en jeu, est un problème complexe différent qu'il faut être capable de résoudre. Partant de ce postulat, l'idée d'une solution adaptative ou dynamique pouvant s'adapter au(x) caractéristique(s) d'un problème pour le résoudre, apparaît être la piste à suivre.

Suivant cette idée, la première étape est d'identifier l'ensemble des éléments pouvant être considéré comme caractéristique d'un problème complexe que les fourmis d'un ACO peuvent être amenées à résoudre. Bien que chaque problème complexe soit unique, chacun d'entre eux est représenté suivant le même modèle d'environnement, pour que les fourmis de la colonie de l'ACO puissent les explorer. L'environnement d'un ACO est donc un graphe dirigé ou non, composé d'un certain nombre de nœuds (ou vertices) et d'arcs (edges). De plus, un graphe est également caractérisé par son taux de connexion, traduisant le nombre d'arcs d'un nœud, reliant celui-ci à un nœud dans le graphe. Ayant pu identifier ces trois éléments comme pouvant caractériser un problème complexe donné, il faut maintenant déterminer si l'un d'entre eux, ou une combinaison de ces dernières, peut être vecteur de convergence pour l'algorithme d'ACO.

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé deux graphes différents sur lesquels mener notre expérimentation. Le premier est un petit graphe généré aléatoirement, composé de 8 nœuds et est caractérisé par un taux de connexion moyen de 1,25.

Le second graphe est une reproduction fidèle du système de transport public de la ville de Belfort. Ce graphe, qui dispose de 150 nœuds, n'est caractérisé que par un taux de connexion de 1.

Bien que tous deux pouvant être considérés comme simplistes, les deux graphes utilisés représentent très bien le type d'environnement sur lequel le projet SURATRAM est amené à évoluer. Un graphe de 150 nœuds représente le nombre d'arrêts de bus présents sur le système de transport public d'une ville moyenne comme Belfort. De plus, leur taux de connexion est également un élément représentatif. Les systèmes de transport public étant dans la majorité des cas construits sous la forme d'une étoile (cercle central duquel partent des branches vraiment peu connectées entre elles) les arrêts de bus ne sont donc liés qu'aux arrêts qui le précèdent et qui le suivent. Ainsi, un taux de connexion appartenant à l'intervalle  $[1;3]$  est représentatif de la catégorie de problème complexe que l'on cherche à analyser.

### 3.3.3.4 Expérimentations et résultats

#### Approche pragmatique

Dans le graphique, nous pouvons observer le comportement de la courbe de qualité du problème étudié. Ainsi, suivant l'axe des abscisses, nous retrouvons le nombre d'itérations réalisé par l'algorithme d'ACO et suivant l'axe des ordonnées, la qualité de la solution obtenue. Dans notre cas, la qualité de la solution traduit l'optimisation réalisée sur la distance totale à parcourir pour réaliser la tournée. Ainsi, plus la courbe de qualité diminuera, plus le chemin aura été optimisé et donc meilleur sera la solution.

En se basant sur la fig A, on observe que la courbe de qualité décroît par palier entre la première itération et la septième itération. Ensuite, au-delà de la septième itération la courbe stagne sur un minimum local, qui du moment qu'il est égal au nombre d'éléments contenu dans le buffer de la moyenne glissante (ici 11), stoppe l'exécution de l'algorithme d'ACO.

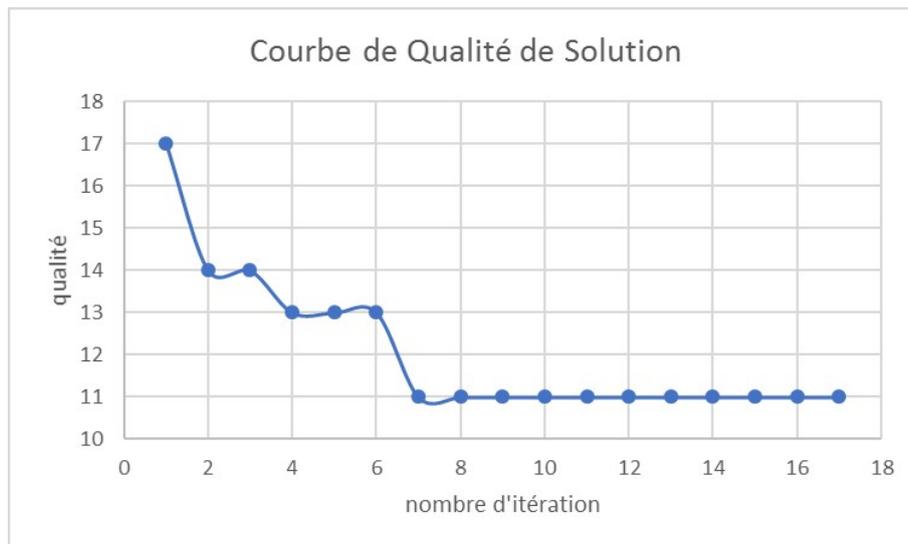


FIGURE 3.4 – Approche pragmatique

Notre approche pragmatique est basée sur l'utilisation d'une moyenne glissante, de sorte que nous pouvons arrêter l'exécution de notre algorithme d'ACO lorsque la qualité de la courbe de solution stagne suffisamment longtemps. Cette première approche, bien que pragmatique, apparaît fonctionnelle.

Bien que fonctionnelle, cette méthode permet de mettre en avant les dérivés de l'utilisation des hyper-paramètres. On retrouve ainsi un hyper-paramètre dans le calcul de la moyenne, identifié comme la profondeur du buffer de la moyenne mobile. De plus, un autre hyper-paramètre est représenté au travers de la variable  $\epsilon$ . Dans ce cas si, la principale difficulté est de trouver quelle valeur donner à ces hyper-paramètres, ce qui nécessite généralement de lancer plusieurs fois l'algorithme pour voir ce qui fonctionne et ainsi, disposer d'un retour d'expérience sur le problème étudié. Cependant, procédant ainsi, si le problème évolue ne serait-ce qu'un peu, rien ne garantit que les paramètres trouvés soient toujours valables pour définir la solution comme optimale.

#### Raffinement de l'approche pragmatique

Dans la figure 3.5, nous pouvons observer le comportement de la courbe de qualité de la solution du problème étudié. Ainsi, suivant l'axe des abscisses, nous retrouvons le nombre d'itérations réalisé par l'algorithme d'ACO et suivant l'axe des ordonnées, la qualité de la solution. Dans notre cas, la qualité de la solution traduisant l'optimisation réalisée sur la distance totale à parcourir pour réaliser la tournée. Ainsi, plus la courbe de qualité diminuera, plus le chemin aura été optimisé et donc meilleure sera la solution.

Comme nous pouvons le voir, la courbe de qualité diminue à chaque itération, jusqu'à la sixième itération, pour commencer à stagner jusqu'à la dixième itération, pour ensuite subir une dégradation de la qualité de la solution entre l'itération numéro 10 et l'itération numéro 12, et enfin recommencer à diminuer et commencer à stagner à partir de l'itération numéro 13. La courbe de qualité se trouvant dans un minimum local et s'y interrompant, cela traduit que le minimum local actuel est celui permettant d'identifier la meilleure solution.

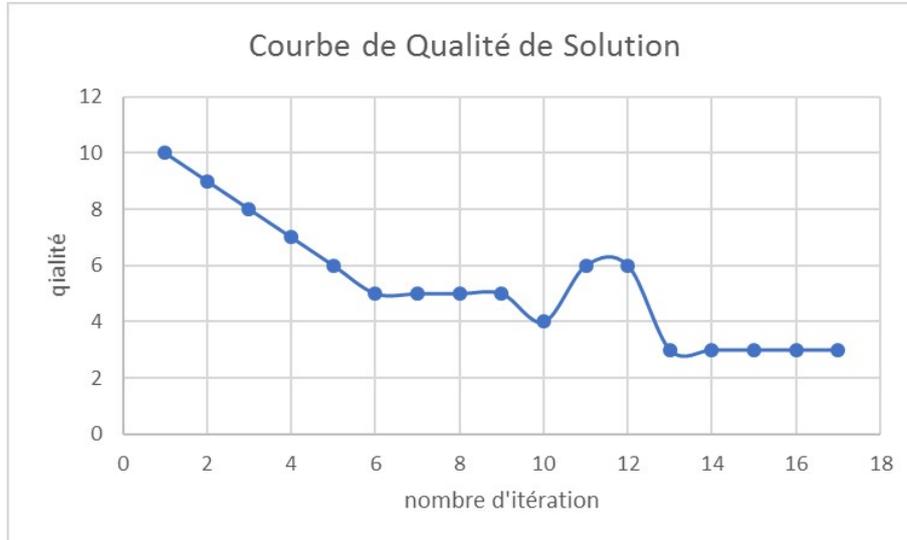


FIGURE 3.5 – Raffinement de l'approche pragmatique - 1

Cette seconde méthode a été mise en place afin de proposer une amélioration de la première méthode pragmatique, quant au nombre d'hyper-paramètres utilisé, ainsi que leur signification et leur rôle dans la convergence de l'algorithme d'ACO. Ainsi, cette deuxième méthode permet de supprimer un des hyper-paramètres pour n'en garder qu'un seul. Celui-ci s'inspirant du processus markovien d'action récompenses, il est initialisé avec une variable "récompense" d'une valeur donnée arbitrairement. Ensuite, lors de la recherche de solution, plus la solution sera améliorée, plus l'agent en charge de l'exploration de la courbe sera récompensé. De plus, si la courbe arrive à stagner dans un minimum local, l'agent s'en verra subir punition. Ainsi, plus la valeur de départ de la variable de récompense sera élevée, plus l'exploration des minimums locaux sera poussée.

Pendant, bien que raffinée, cette solution se heurte au même problème que la première méthode pragmatique, étant que la valeur de départ de la variable de récompense doit être définie arbitrairement. Seule une étude poussée du problème permettra de connaître la valeur de récompense initiale permettant d'exploiter le problème au mieux.

### Environnement comme base de connaissance

Ayant pu démontrer dans les deux paragraphes précédents que, bien que fonctionnelle, l'approche par hyper-paramètre n'est pas envisageable si l'on souhaite que l'application puisse converger sans supervision humaine vers la solution optimale. Nous allons maintenant essayer de déterminer le critère de terminaison de l'algorithme d'ACO, en nous basant sur les caractéristiques précédemment identifiées de son environnement, autrement dit, le graphe.

Pour être à même de déterminer si l'un des trois éléments, ou si une combinaison de ces éléments identifiés précédemment, peut jouer le rôle de vecteur de convergence pour l'algorithme d'ACO, nous proposons l'expérience suivante.

Notre expérience se compose d'un problème complexe à résoudre, représenté sous forme de graphe et d'une colonie de fourmis. Concernant la colonie de fourmis, le nombre de fourmis utilisé va varier entre une fourmi et le nombre de fourmis optimal défini par Dorigo et al [62]. Le nombre de fourmis optimal étant égal au nombre de nœuds dans le graphe.

Ensuite, pour chaque valeur de l'axe des abscisses (le nombre de fourmis), l'algorithme d'ACO sera exécuté 20 fois, pour un total de 200 exécutions. Par définition, l'algorithme d'ACO étant un processus stochastique, moyenniser les résultats obtenus permettra d'obtenir des résultats moyennés représentatifs de la réalité.

Une fois ce protocole appliqué à nos deux graphes de recherche

- le premier graphe est un graphe de test généré aléatoirement, composé de 8 nœuds, mais avec un taux de connexion de 1,25.
- Le second graphe est une reproduction à l'identique du système de transport public de la ville de Belfort. Ce graphe, bien que volumineux, avec 150 nœuds, ne présente qu'un taux de connexion équivalent à 1.

On obtient les graphiques suivant :

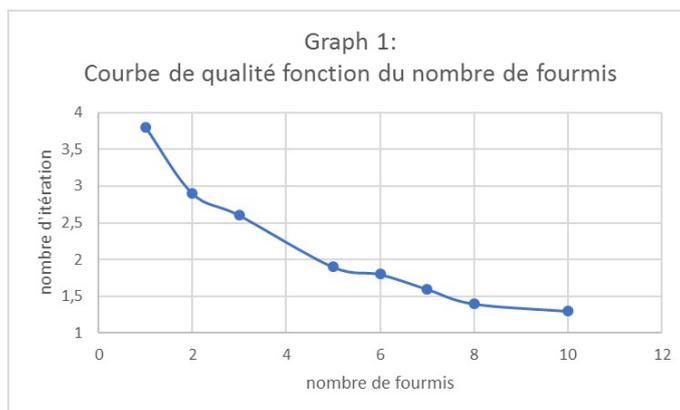


FIGURE 3.6 – Raffinement de l'approche pragmatique - 2

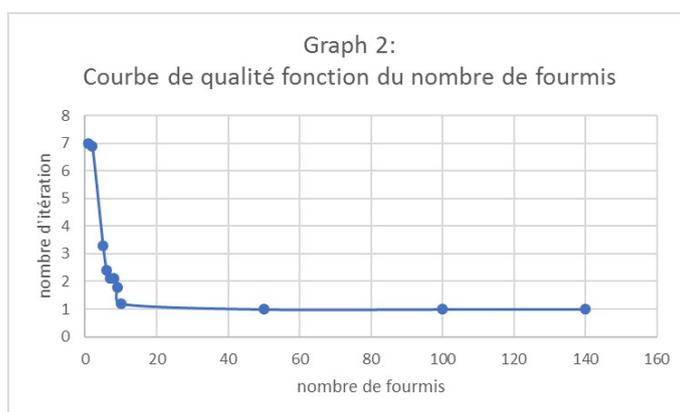


FIGURE 3.7 – Raffinement de l'approche pragmatique - 3

À propos de ces deux graphiques 3.6 et 3.7, ils représentent tous les deux la même courbe de qualité de solution. Cette courbe de qualité de solution est définie par le nombre de fourmis en abscisse et le nombre d'itérations de l'algorithme en ordonné. Dans notre cas, la qualité de la solution traduisant l'optimisation réalisée sur la distance totale à parcourir pour réaliser la tournée. Ainsi, plus la courbe de qualité diminuera, plus le chemin aura été optimisé et donc meilleure sera la solution.

Pour le graphique 3.6, on observe que pour un nombre de fourmis égal au nombre défini par Dorigo, la qualité de la solution trouvée est optimale.

Pour le graphique 3.7, on observe également que pour un nombre de fourmis égal au nombre défini par Dorigo, la qualité de la solution trouvée est optimale.

Pour commencer, cette première analyse nous permet de retrouver les résultats des travaux de Dorigo [62], spécifiant que pour tout problème donné, pour obtenir une solution optimale, le nombre de fourmis doit être égal au nombre de nœuds dans le graphe.

De plus, dans un deuxième temps, on cherche maintenant à comparer les résultats obtenus avec la liste des éléments composant l'environnement d'un graphe, caractérisant un problème complexe.

Considérant le graphique 1, pour un nombre de nœuds égal à 8 et un nombre d’arcs égal à 12, que cela soit en abscisse ou en ordonné, aucune valeur ne correspond. Considérant maintenant le graphique 2, pour un nombre de nœuds égal à 150 et un nombre d’arcs voisin des 300, que cela soit en abscisse ou en ordonné, aucune valeur ne correspond.

Par conséquent, de par les observations réalisées sur le graphique 1 et le graphique 2, concernant le nombre de nœuds dans un graphe ou le nombre d’arcs dans un graphe, on s’aperçoit qu’aucun de ces deux éléments ne permet de conclure sur l’influence de l’environnement comme vecteur de convergence de l’algorithme d’ACO.

Il ne nous reste maintenant plus qu’un élément sur notre liste, permettant de caractériser le graphe d’un problème complexe à résoudre. Par conséquent, dans la prochaine section de ce chapitre, nous allons chercher à déterminer si cet élément peut être vecteur de convergence pour l’algorithme d’ACO. Autrement dit, si l’environnement peut avoir une influence, ou non, sur la convergence de l’ACO.

### 3.3.4 L’influence de l’environnement sur le critère de terminaison

#### 3.3.4.1 Introduction

Au travers de ce chapitre de thèse, l’objectif est de doter l’algorithme d’ACO d’un critère de terminaison qui puisse être déterminé à l’aide d’une méthode donnée. Cette méthode devant pouvoir s’adapter au problème complexe étudié, afin de pouvoir déterminer le critère de terminaison mettant fin à l’algorithme d’ACO et définissant la solution trouvée comme optimale. Dans la volonté de fournir une nouvelle méthode permettant d’estimer le critère de terminaison de l’algorithme d’ACO, nous avons pris le parti de baser notre approche sur une méthode bio-inspirée, à l’instar de colonie de fourmis elle-même. Cette nouvelle approche consiste à se demander si l’environnement des fourmis artificielles ne peut pas être vecteur de convergence, au même titre que l’environnement des fourmis réel influe leur choix quant aux chemins qu’elles empruntent lors de leur phase d’exploitation, à la recherche de nourriture. Ainsi, l’objectif est d’étudier si le critère de terminaison de l’algorithme d’ACO peut être déterminé ou non, en se basant sur une ou plusieurs caractéristiques de l’environnement des fourmis artificielles.

De plus, l’objectif de cette étude est double, car si l’on parvient à montrer que l’environnement est vecteur de convergence, nous serons capables d’expliquer à quoi correspond le critère de terminaison de l’algorithme d’ACO. Ainsi, être capables d’expliquer sur quel élément de l’environnement se base l’algorithme d’ACO permettrait d’en finir avec les hyper-paramètres arbitraires et/ou nécessitant un retour d’expérience sur le problème étudié. Les fourmis artificielles ne seraient donc plus une entité dominant leur espace de recherche mais, à l’instar de leur homologue réel, influencées par les caractéristiques de leur environnement. Enfin, il est intéressant de noter que cette approche insérerait et complète parfaitement l’approche bio-inspirée des algorithmes d’optimisation par colonies de fourmis.

Comme exposé précédemment, dans le cas d’un algorithme d’ACO, tout problème donné est transcrit sous la forme de graphe. Un graphe étant composé d’un certain nombre de nœuds et d’un certain nombre d’arcs (élément liant les nœuds entre eux). De plus, tout graphe donné est également caractérisé par son taux de connexion, défini par le nombre moyen d’arcs reliant un nœud à un autre dans le graphe.

Dans la partie précédente, nous avons pu montrer que le nombre de nœuds, comme le nombre d’arcs, ne permettait pas de conclure sur l’influence de l’environnement comme vecteur de convergence pour l’algorithme d’ACO. Notre étude va maintenant se porter sur le taux de connexion du graphe, pour savoir si ce dernier peut être vecteur de convergence pour l’algorithme d’ACO.

Pour réaliser cette étude, nous continuons de travailler sur les deux graphes utilisés précédemment. Pour rappel, le premier est un petit graphe généré aléatoirement, composé de 8 nœuds et est caractérisé par un taux de connexion moyen de 1.25.

Le second graphe est une reproduction fidèle du système de transport public de la ville de Belfort. Ce graphe, qui dispose de 150 nœuds, n'est caractérisé que par un taux de connexion de 1.

Les deux graphes utilisés représentent très bien le type d'environnement sur lequel le projet SURATRAM est amené à évoluer. Un graphe de 150 nœuds représente le nombre d'arrêts de bus présents sur le système de transport public d'une ville moyenne comme Belfort. De plus, leur taux de connexion est également un élément représentatif.

### 3.3.4.2 Expérimentation et résultats

Comme présenté en début de chapitre, le système de transport de marchandises que nous développons revêt un fort besoin de dynamique, afin d'adapter le routage des véhicules à l'état changeant du trafic en centre urbain ainsi qu'à l'apparition de marchandises à enlever. Notre système de transport étant basé sur une colonie de fourmis comme moteur de l'algorithme de VRP, la première étape consiste à améliorer l'algorithme de la colonie de fourmis pour lui apporter une méthode permettant de déterminer son critère de terminaison, tout en garantissant que la solution trouvée est optimale.

La méthode que nous proposons, pour déterminer le critère de terminaison, cherche à étudier si l'environnement peut influencer la convergence de l'ACO. Pour cela, au travers d'une expérimentation, nous allons chercher à déterminer si le taux de connexion d'un graphe peut être vecteur de convergence.

Notre expérience se compose d'un problème complexe à résoudre, représenté sous forme de graphe et d'une colonie de fourmis. Concernant la colonie de fourmis, le nombre de fourmis utilisé va varier entre une fourmi et le nombre de fourmis optimal défini par Dorigo et al [62]. Le nombre de fourmis optimal étant égal au nombre de nœuds dans le graphe.

Ensuite, pour chaque valeur de l'axe des abscisses (le nombre de fourmis), l'algorithme d'ACO sera exécuté 20 fois, pour un total de 200 exécutions. Par définition, l'algorithme d'ACO étant un processus stochastique, moyenner les résultats obtenus permettra d'obtenir des résultats représentatifs de la réalité.

Une fois ce protocole appliqué à nos deux graphes de recherche :

- Le premier graphe est un graphe de test généré aléatoirement, composé de 8 nœuds, mais avec un taux de connexion de 1,25. Comme illustré dans la figure 3.8.
- Le second graphe est une reproduction à l'identique du système de transport public de la ville de Belfort. Ce graphe, bien que volumineux, avec 150 nœuds, ne présente qu'un taux de connexion de 1. Comme illustré dans la figure 3.9.

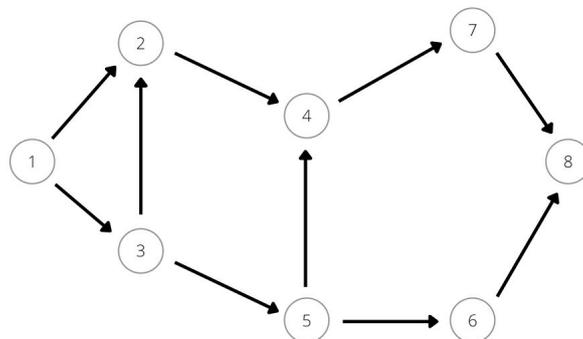


FIGURE 3.8 – Graphe : test

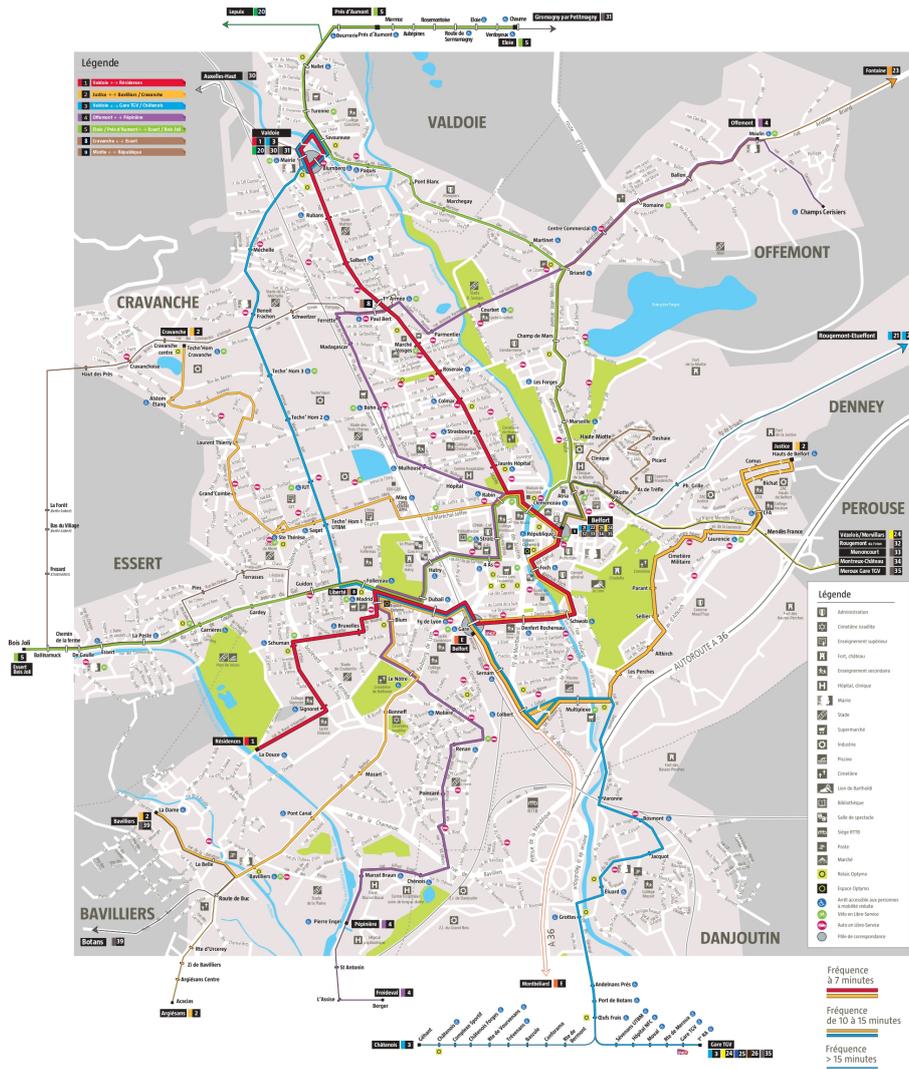


FIGURE 3.9 – Graphe : système transport public Belfort

Nous obtenons les graphiques suivant :

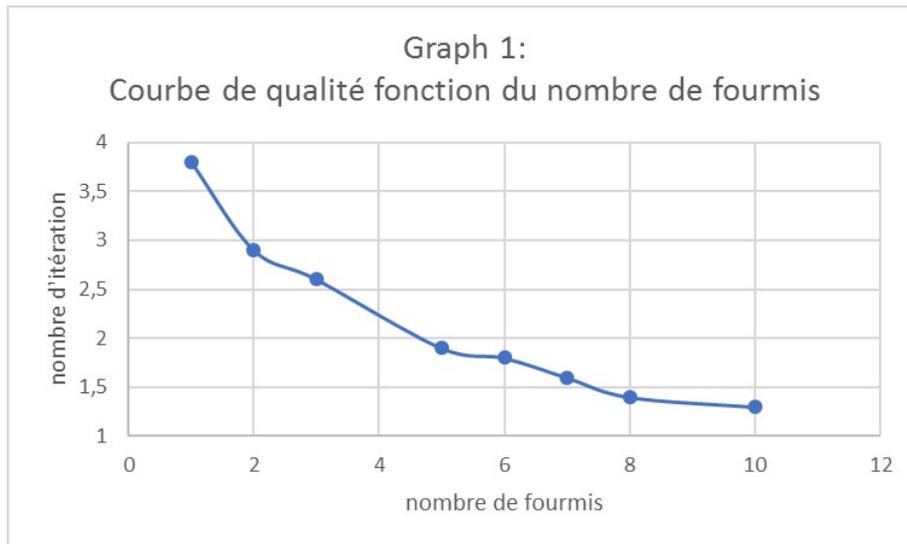


FIGURE 3.10 – Raffinement de l'approche pragmatique - 4

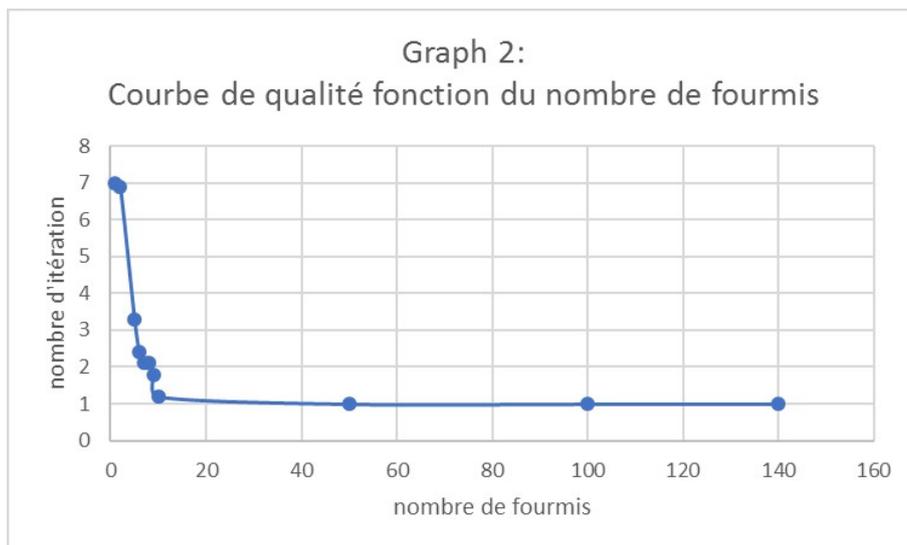


FIGURE 3.11 – Raffinement de l'approche pragmatique - 5

À propos de ces deux graphiques 3.10 et 3.11, ils représentent tous les deux la même courbe de qualité de solution. Cette courbe de qualité de solution est définie par le nombre de fourmis en abscisse et le nombre d'itérations de l'algorithme en ordonné. Dans notre cas, la qualité de la solution traduisant l'optimisation réalisée sur la distance totale à parcourir pour réaliser la tournée. Ainsi, plus la courbe de qualité diminuera, plus le chemin aura été optimisé et donc meilleure sera la solution.

Dans un premier temps, cette démarche, nous a permis de retrouver les résultats des travaux de Dorigo [62], pour lesquels la solution optimale est obtenue quand le nombre de fourmis est égal au nombre de nœuds dans le graphe. En effet, pour le graphique 1, traitant d'un graphe de 8 nœuds, on peut observer que la courbe de solution diminue plus le nombre de fourmis augmente, pour enfin se stabiliser et commencer à stagner quand le nombre de fourmis est égal à 8. Pour le graphique 2, traitant d'un graphe de 150 nœuds, on peut observer que la courbe de solution diminue drastiquement pour un nombre de fourmis compris entre 1 et 10, pour ensuite commencer à se stabiliser sur un plateau centré sur un nombre de fourmis égal à 150.

Maintenant, dans un deuxième temps, nous allons chercher à mettre en perspective les résultats illustrés par ces deux graphiques avec le dernier élément de notre liste, le taux de connexion moyen d'un graphe. Élément caractérisant l'environnement de recherche, ou autrement dit le graphe.

Le taux de connexion moyen d'un graphe, pour un nœud donné, traduit le nombre de connexions moyen réel, reliant ledit nœud à un autre nœud dans le graphe. Il est calculé comme le montre l'équation suivante :

$$\theta = \frac{\sum_{v=1}^n \omega_i}{n} \quad (3.11)$$

Avec  $\omega_i$  le nombre d'arcs partant du noeuds actuel et le reliant à un autre noeuds et  $n$  le nombre de noeuds dans le graphe.

Disposant maintenant du taux de connexion moyen et de la courbe de solution de chaque graphe, il est maintenant possible de croiser nos résultats, dans l'objectif de conclure sur l'influence de l'environnement comme vecteur de convergence.

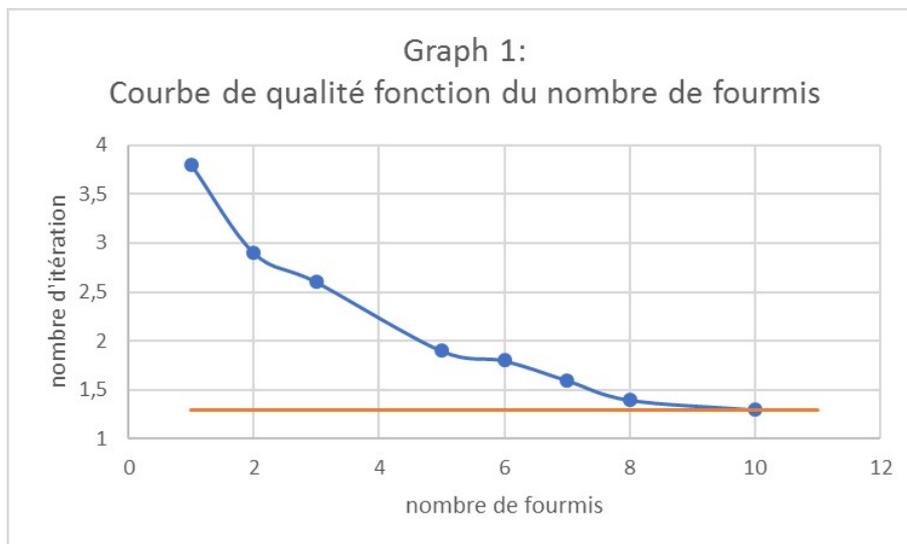


FIGURE 3.12 – Raffinement de l'approche pragmatique - 6

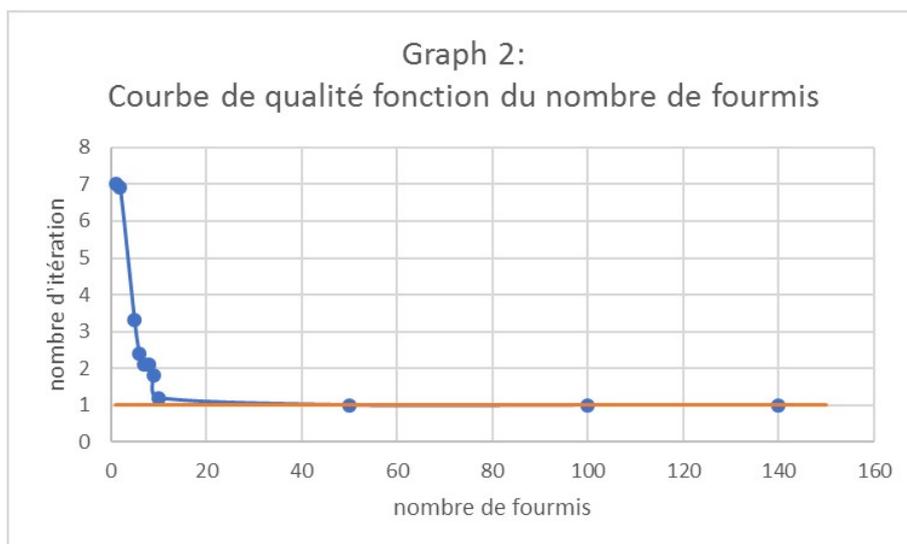


FIGURE 3.13 – Raffinement de l'approche pragmatique - 7

Concernant le graphique 3.12, on retrouve la courbe de qualité de solution identifiée par la courbe bleue et la droite orange, qui correspond au taux de connexion du graphe. Après observation, il semblerait que la courbe bleue décroît suivant un modèle logarithmique, pour atteindre une valeur minimum du nombre d'itérations moyen qui est égal à 1,35. Enfin, cherchant à croiser le comportement de la courbe bleue avec le taux de connexion du graphe (qui a une valeur de 1,25), on remarque tout de suite que la courbe bleue converge vers la courbe orange.

Concernant le graphique 3.13, on retrouve la courbe de qualité de solution identifiée par la courbe bleue et la droite orange, qui correspond au taux de connexion du graphe. Après observation, il semblerait que la courbe bleue décroît suivant un modèle exponentiel, pour atteindre une valeur minimum du nombre d'itérations moyen qui est égal à 1. Enfin, cherchant à croiser le comportement de la courbe bleue avec le taux de connexion du graphe (qui a une valeur de 1), on remarque tout de suite que la courbe bleue converge vers la courbe orange.

## 3.4 Conclusion

Comme vu dans le chapitre 2, l'adaptabilité, la dynamique comme la chose en mouvement évoluant en fonction du temps, est le point clef de l'innovation mise en œuvre dans le projet SURATRAM. Pour garantir ce besoin de capacité dynamique du projet, le système est basé sur un algorithme bio-inspiré, émulant le comportement des fourmis au sein de leur colonie, comme source d'organisation et d'adaptabilité. Cependant, bien que les algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) aient fait leur preuve dans le domaine de l'optimisation de transport de marchandises, leur implémentation dans des projets qui requièrent un besoin fort en adaptabilité ou dynamique, n'est encore aujourd'hui que peu répandu. Bien que des projets aient mis en place des algorithmes d'ACO dans le cadre de TSP dynamique ou de VRP dynamique, il reste à ce jour relativement discret dans le domaine des problèmes d'optimisation dynamique.

Une raison de cette discrétion peut être justifiée de par l'algorithme d'ACO en lui-même. Depuis le développement des algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis, les efforts déployés au travers de divers projets de recherche se sont concentrés sur l'amélioration de la construction des itérations et la mise à jour des phéromones. Cependant, très peu ont cherché ont été menés dans l'objectif de développer de nouvelles approches sur la manière de stopper l'exécution d'un algorithme d'ACO. De plus, il est légitime de se demander quelles méthodes mettre en place, les colonies de fourmis étant basées sur un processus stochastique, le nombre d'itérations nécessaire pour obtenir une solution qui pourrait être qualifiée d'optimale est difficile à déterminer.

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'élaboration d'une nouvelle méthode innovante permettant de déterminer le critère de terminaison de l'algorithme d'ACO, tout en garantissant que la solution générée est une solution optimale à 5% près, comparé aux résultats obtenus par les méthodes exactes.

Au travers de cette nouvelle méthode permettant de déterminer le critère de terminaison des algorithmes d'ACO, se cache le concept même à la base de cet algorithme : la bio-inspiration. Nous l'avons vu tout au long de ce chapitre, les colonies de fourmis artificielles tirent leur comportement d'individus observés en train d'évoluer dans la nature, au sein de leur environnement. C'est donc tout naturellement que la bio-inspiration soit à la base d'une nouvelle méthode permettant à l'ACO de converger vers une solution optimale en un nombre d'itérations donné.

Si jusque-là, la bio-inspiration a servi à décrire le comportement d'individus, c'est que l'approche mise en place par P.P. Grassé s'intéressait justement à comprendre les insectes, en tant qu'individu. Par la suite, l'implémentation réalisée par Dorigo et ses collègues n'a fait que chercher à émuler le comportement décrit par P.P. Grassé au sein de son étude. Cependant, une première trace de changement de point de vue sur la bio-inspiration peut être notée de la part de Dorigo, lorsqu'il cherche à déterminer le nombre de fourmis à insérer au sein de sa colonie numérique. Pour cela, il va montrer au travers d'une expérimentation qu'une solution obtenue peut être qualifiée d'optimale lorsque le nombre de fourmis est égal au nombre de nœuds dans le graphe qu'elle est en train d'explorer, autrement dit son environnement numérique.

Concernant notre méthode pour déterminer le critère de terminaison de l'algorithme d'ACO, nous avons souhaité explorer cette question de l'influence que peut avoir l'environnement sur l'élément qui évolue en son sein. De quelle manière l'environnement, la jungle par exemple, va indirectement influencer une fourmi pour que cette dernière emprunte un chemin plutôt qu'un autre, ou dans le cas qui nous intéresse, quelle caractéristique d'un environnement virtuel peut être considéré comme vecteur de convergence pour notre algorithme d'ACO.

Pour répondre à cette question, des expérimentations ont été menées dans la section 3.3 pour chercher à identifier quels critères d'un environnement virtuel pourraient être vecteurs de convergence, dans l'objectif de développer une méthode bio-inspirée, basée sur l'influence de l'environnement, pour déterminer le critère de terminaison d'un ACO tout en garantissant la qualité de la solution trouvée. Les expérimentations menées ont été réalisées sur des graphes représentant le type de problème que l'on cherche à adresser avec notre nouvelle méthode. De plus, il est important que notre approche intervienne uniquement si le nombre de fourmis dans la colonie a été déterminé selon le critère fourni par Dorigo. De ce fait, suite à ces expériences, nous avons pu montrer que pour les ACO, implémentés dans ce cas précis, le taux de connexion moyen d'un graphe est vecteur de convergence.

Pour conclure, notre méthode, outre le fait qu'elle ait permis de valider notre hypothèse quant à l'influence de l'environnement comme vecteur de convergence pour les algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis, cette dernière a permis de compléter l'approche bio-inspirée mise en place par Dorigo à la création des colonies de fourmis artificielles.

## Chapitre 4

# De l'importance de l'optimisation multi-objectifs pour la planification de tournée dans le dimensionnement des batteries électriques

### 4.1 Introduction

Comme introduit précédemment dans le chapitre 2, le projet SURATRAM est une application de gestion (livraison et enlèvement) de marchandises en centre urbain qui intègre les Systèmes de Transport Intelligent (STI). Cette intégration des STI est caractérisé par une vision systémique du problème de gestion des marchandises en centre urbain, réunissant au sein d'une même application l'utilisation de véhicule électrique et autonome, ainsi qu'une adaptation en temps réel aux conditions du trafic du système routier urbain.

Dans ce chapitre, nous allons, dans un premier temps, nous intéresser plus spécifiquement à la variante d'algorithme d'optimisation développé pour le projet SURATRAM. La variante d'algorithme de tournée de véhicule utilisée permet d'intégrer les caractéristiques intrinsèques des véhicules électriques dans le processus d'optimisation. Dans ce domaine, on se propose une nouvelle variante permettant la prise en compte du vieillissement des batteries des véhicules électriques, qui, selon les recherches effectuées, n'est actuellement pas traité dans la littérature scientifique actuelle. De plus, est également couplé à cette nouvelle variante, l'utilisation de véhicule autonome, amenant à un changement de paradigme quant au temps de trajet maximal autorisé d'une tournée, ainsi que sa distance maximale. Enfin, dans un deuxième temps, nous allons voir en quoi, dans le cas d'utilisation de véhicule électrique, le processus d'optimisation est primordial pour le bon dimensionnement des batteries de véhicules électriques.

## 4.2 Électrique VRP et vieillissement des batteries

### 4.2.1 Vers des tournées via véhicule électrique

#### 4.2.1.1 Le problème du voyageur de commerce

Le problème du voyageur de commerce (également nommé en anglais Travelling Salesman Problem - TSP) est un problème d'optimisation combinatoire. Ce problème d'optimisation est autant adressé en recherche opérationnelle que dans le domaine de l'informatique théorique. Ce problème consiste à déterminer le plus court chemin qui visite un ensemble de villes une et une seule fois et devant se terminer par la ville de départ. Pour fonctionner, le TSP prend en compte une liste de villes donnée et la distance entre toutes les paires de villes. Les premières traces de théorisation de notre problème d'optimisation (que l'on identifie maintenant comme le voyageur de commerce) remontent aux années 1800 et sont attribuées aux mathématiciens irlandais Sir William Rowan Hamilton et britannique Thomas Penyngton Kirkman. Ensuite, c'est en 1954 que Dantzig et al [42] modélisent le problème sous la forme d'un problème d'optimisation linéaire. Depuis sa définition en tant que problème d'optimisation par Dantzig et al en 1954, le TSP est l'un des problèmes d'optimisation le plus étudié en optimisation et en informatique théorique. Son intérêt découle du développement économique de l'époque, tournée vers l'utilisation massive des véhicules et du besoin d'optimisation pour réduire les coûts d'utilisation des véhicules. De plus, sa complexité, identifiée comme NP-HARD en 1979 par [274], en fait un sujet de recherche tout trouvé pour le monde académique.

On représente généralement le problème du voyageur de commerce sous la forme d'un graphe. Ainsi, dans le cas d'un problème de TSP, pour tout graphe donné, chaque sommet symbolise une ville et chaque arc symbolise un chemin entre deux villes. De plus, pour représenter la symétrie ou l'asymétrie d'un TSP étudié, les graphes peuvent être représentés comme étant non orientés ou orientés. Dans un graphe non orienté, tout chemin entre deux villes données est considéré comme de même distance, peu importe le sens de l'arc. Dans un graphe orienté, pour un couple de villes donné, le chemin peut être de distance différente selon le sens de l'arc, ou encore, un chemin peut exister dans un sens, mais pas dans l'autre.

En 1991, [218] a mis à disposition un ensemble de différentes instances de TSP, se nommant TSPLIB. Cet ensemble d'instance permet de fournir à l'ensemble de la communauté scientifique une bibliothèque d'instance de TSP afin que chacun puisse comparer ses travaux avec d'autres équipes de recherche sur un problème donné.

Le problème du voyageur de commerce est également la source de nombreux challenges, l'objectif étant de pouvoir manipuler des graphes de plus en plus grands, afin d'inclure de plus en plus de villes dans la résolution du problème du voyageur de commerce. L'un des problèmes les plus complexes, de par le nombre de nœuds mis en jeu, est le World TSP. Cette instance du voyageur de commerce considère 1 904 711 villes réparties dans le monde entier. À l'heure actuelle, le meilleur tour enregistré a été réalisé par Keld Helsgaun en février 2021, en utilisant une variante de son algorithme : le LKH heuristic algorithm. Son tour est d'une longueur de 7, 515, 767, 286 mètres.

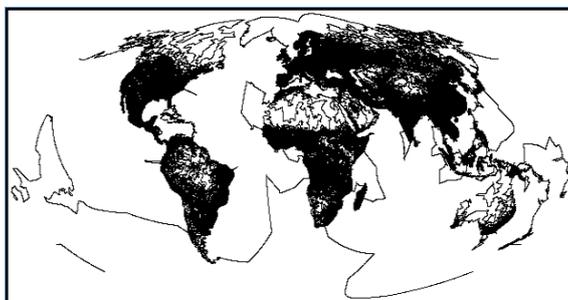


FIGURE 4.1 – TSP World

#### 4.2.1.2 Le problème de tournée de véhicule

Le Problème de tournée de véhicule (également nommé en anglais Vehicle Routing Problem – VRP) est une généralisation classique du TSP. Le problème du VRP consiste à déterminer les tournées non pas d'un seul véhicule, mais d'un ensemble de véhicules, afin de visiter un assortiment de points à visiter (clients, fournisseurs, intermédiaires) dans le but d'assurer la livraison des marchandises, ou encore leur enlèvement. Le VRP est donc une extension du TSP, considérant plusieurs véhicules.

La première formulation du VRP fut proposée par [43] en 1959. Ce premier projet de recherche s'intéressait à la manière de router une flotte de camions qui transportait du carburant entre le centre de production et de stockage et les stations-services de son réseau de distribution. Dans cette application, chaque camion était caractérisé par une capacité de transport de carburant identique aux autres camions et chaque station-service était caractérisée par une demande qui lui était propre.

Quelques années plus tard, en 1964, [35] ont généralisé le problème identifié par [43] en un problème d'optimisation linéaire. Ce problème est maintenant une occurrence classique du domaine de la logistique et du transport de marchandises. Il est défini par Decerle [46] comme suivant. *"Comment desservir un ensemble de clients, géographiquement dispersés autour du dépôt central, en utilisant une flotte de véhicules avec des capacités variables ? Suite à cette considération du problème en tant que problème d'optimisation linéaire, il est devenu connu sous le nom de Vehicle Routing Problem. Le VRP est l'un des sujets les plus adressés dans le domaine de la recherche opérationnelle"*. Par la suite, à l'instar du TSP, le VRP a été démontré comme faisant partie des problèmes NP-HARD par [159] en 1981.

De par l'intérêt porté au VRP par la communauté scientifique, ce dernier a très rapidement fait l'objet de nombreuses variantes, qui pour chacune d'entre elles, le rendent plus complexe à résoudre, de par l'ajout de nouvelles contraintes. Outre le secteur académique, le VRP, comme le TSP, a rapidement été porté dans de nombreuses applications à destination des entreprises ou des particuliers. Ces applications variées de la gestion d'une flotte de véhicules pour la livraison et l'enlèvement de marchandises, à la réparation d'équipement.

Le problème d'optimisation de capacité de tournée de véhicule (ou également en anglais Capacited Vehicle Routing Problème – CVRP) est une extension du VRP concernant la prise en compte de la capacité (ou du volume) de transport des véhicules d'une flotte. Decerle [46] fournit la définition suivante : *"Une flotte de véhicules de capacité finie, basée dans un dépôt, devant assurer les tournées entre plusieurs clients (ou villes), ayant demandé chacun une certaine quantité de marchandises. L'ensemble des clients visités par un véhicule désigne la tournée de celui-ci. Chaque client doit être desservi une et une seule fois et chaque tournée commence et se termine au dépôt central"*. L'objectif du CVRP est donc de minimiser la fonction objectif de la tournée, que celui-ci soit l'image de la distance, du temps, ou encore de l'énergie consommée. Le tout, en respectant la contrainte de capacité des véhicules, la capacité pouvant être définie comme la quantité (ou volume total) transportée de marchandises, qui doit être livrée lors d'une tournée. Cette contrainte de capacité représente l'extension la plus fréquente de VRP puisqu'on la retrouve dans plus de 90% des articles traitant du VRP selon [17]. De plus, les véhicules sont la plupart du temps considérés comme étant identiques. Ainsi, tous peuvent contenir la même quantité (ou volume maximal) de marchandises à transporter.

Le domaine du VRP couvre un large éventail d'extension. Le CVRP étant considéré comme le problème de tournée de base, dans le domaine de l'optimisation. On retrouve ensuite plusieurs variantes, telles que le problème de routage de véhicule avec backhauls (VRPB) qui inclut à la fois un ensemble de clients auxquels les produits doivent être livrés et un ensemble de vendeurs dont les marchandises doivent être transportées vers le centre logistique. Le problème de tournée de véhicule avec fenêtre de temps (TWVRP), qui alloue des fenêtres de temps dans lesquelles les livraisons doivent être effectuées et le problème de tournée de véhicule avec enlèvement et livraison (PDVRP), dans lequel un ensemble des marchandises doivent être emmené d'un site d'enlèvement pour être livré sur un site de livraison. De plus, ces extensions peuvent être assemblées pour produire de nouvelles extensions plus complexe, comme le BTWVRP ou le PDTWVRP. Enfin, de nouvelles extensions sont régulièrement mises à disposition dans la littérature scientifique, traduisant l'intérêt du domaine et sa richesse.

### 4.2.1.3 Le problème de tournée via véhicule électrique

Depuis quelques années maintenant, les véhicules électriques se sont implantés dans le parc automobile autant français que mondial. Ce développement du véhicule électrique à large échelle touche autant le véhicule personnel que le véhicule d'entreprise et le véhicule de transport en tout genre. Poussé par la pression de la concurrence et par les changements dans le domaine du transport. Cependant, le facteur de changement notable étant le prix des carburants. Ceux-ci se sont envolés suite à l'épidémie de COVID-19, les acteurs du domaine, transporteurs et autres, se tournent maintenant de plus en plus vers le véhicule électrique comme véhicule de remplacement.

Cette pénétration du secteur de transport par les véhicules électriques, implique cependant de revoir les processus logistiques de distribution, dans le but d'adapter des solutions établies comme le problème de tournée de véhicules en l'adaptant aux contraintes du véhicule électrique. Cette adaptation a permis l'émergence du problème de tournée de véhicules électriques (ou en anglais Electric Vehicle Routing Problem – EVRP). L'EVRP doit permettre de déterminer des itinéraires optimisés intégrant la dimension électrique de ces nouveaux véhicules de transport, dans l'objectif de desservir un ensemble de clients. Bien qu'au début les véhicules électriques disposaient de capacité énergétique limitée, leur usage dans des applications de livraison impliquait un besoin en recharge plus régulier. Depuis, la technologie et les industriels ayant fait des avancées majeures, la capacité de ces derniers électriques tend à rejoindre celle des véhicules thermiques modernes. Ainsi, la recharge peut être effectuée en station publique ou en station privée, le seul élément qui diffère étant le temps mis par la batterie pour se recharger. De plus, outre la dimension électrique, cette version du VRP doit rester compatible avec l'ensemble des extensions déjà existantes, telles que la capacité de charge des véhicules, fenêtres horaires des clients, heures de travail, etc..

La suite de cette section est une traduction du survey [82] datant de 2019. Ce survey fournit un travail de qualité et de fond, très complet sur l'EVRP, de ces origines jusqu'aux différentes applications modernes. De plus, il présente chacune des extensions basées sur l'EVRP. Ces extensions permettent d'exploiter au mieux le problème des tournées de véhicules, considérant l'ensemble majeur de changement à prendre en compte dans l'utilisation de véhicules électriques dans le cadre du transport de marchandises.

Les premiers travaux de recherche, concernant le routage d'une flotte de véhicules électriques, ont été publiés par [111]. Leur projet pose comme cadre l'optimisation de tournée de véhicules pour la livraison et l'enlèvement de colis (VRP with pickup and delivery – VRP-PD), utilisant une flotte mixte de véhicules électriques (VE) et de véhicules conventionnels à combustion interne (Conventional internal combustion engine vehicles – ICEVs). Dans cette application, les VE effectuent leur recharge sur des zones identifiées comme critique et le temps total de ravitaillement est calculé en fonction de la distance totale parcourue par les VE.

Par la suite, [37] ont formulé un VRP permettant de prendre en compte la recharge des VE dans le process d'optimisation. Ils proposent que les VE (qui alors avaient une capacité énergétique limitée) se rechargent sur site, chez les clients, pour recharger jusqu'à 80% de la capacité de la batterie du véhicule. Au travers de cette application du modèle, les chercheurs ont pu analyser l'impact de différentes plages de conduite, de temps de recharge fixes et de fenêtres temporelles sur les itinéraires des VE et la qualité de la solution. Cependant, les résultats obtenus ont montré que les fenêtres de temps passé chez les clients à recharger limitent considérablement la distance parcourue par les véhicules sur leur itinéraire, surtout lorsque le temps de recharge est long et que l'autonomie du véhicule est faible.

Dans une autre application de recherche, [83] ont formulé le problème de tournée de véhicules écologiques (Green VRP – GVRP) dans lequel une flotte de VE est alimentée par des carburants alternatifs (véhicule à carburant alternatif, AFV) : biodiesel, éthanol, hydrogène, méthanol, gaz naturel, électricité, etc. Lors de leur tournée, les AFV peuvent se ravitailler en carburant alternatif dans des stations de ravitaillement dédiées selon un temps de ravitaillement fixe. D'après les résultats obtenus, les chercheurs ont pu montrer que la limitation de l'autonomie augmentait considérablement le nombre de stations de ravitaillement, ainsi que la distance totale parcourue.

Un problème similaire a été étudié par [196], dans lequel les auteurs ont ajouté une contrainte de charge du véhicule, des fenêtres horaires pour les clients et une gestion de la congestion, le véhicule pouvant stationner chez le client lors des heures de forte congestion du trafic.

Enfin, [236] ont proposé en 2013 la première recherche concernant le routage d'une flotte de Véhicules Électriques à Batterie (VEB). Ce projet prenait en compte la visite en station de recharge (SC) et le temps mis par le véhicule pour se recharger. Le temps de recharge de la batterie dépendant de l'état de charge (State of Charge – SOC) du véhicule lorsque celui-ci arrive en CS. Le problème fut formulé sous les traits d'un E-VRP avec fenêtre de temps (ETWVRP). Le ETWVRP a été formulé comme un problème linéaire entier mixte (MILP), modélisé sous la forme d'un graphe complet dirigé  $G$ , où les clients sont modélisés comme les sommets du graphe et les chemins entre les clients sont modélisés sous la forme des arcs du graphe. La formulation de base du problème est donnée comme suivant. Soit  $V = 1, \dots, N$  un ensemble de clients géographiquement dispersés qui doivent être desservis et  $F$  un ensemble de CS (Station de recharge) pour les VEB. Dans l'objectif de visiter plusieurs fois la même CS, un ensemble virtuel de  $CS_s F'$  est défini. Les sommets 0 et  $N + 1$  désignent le dépôt. Pour tout itinéraire, le sommet 0 est le point de départ et se termine par  $N + 1$  ( $V_0, N + 1 = V \cup 0 \cup N + 1$ ). Le graphe  $G$  est défini comme  $G = (V_0, N + 1 \cup F, A)$ , où  $A$  est l'ensemble des arcs,  $A = (i, j) | i, j \in V_0, N + 1 \cup F, i \neq j$ . Selon les contraintes de la vie réelle, les différentes valeurs de l'arc  $(i, j)$  peuvent être interprétées comme la distance  $d_{ij}$ , le temps de trajet  $t_{ij}$ , la consommation d'énergie  $e_{ij}$ , la vitesse  $v_{ij}$ , le coût  $c_{ij}$ , etc. De plus, la variable binaire  $x_{ij} = 0, 1$  est égale à 1 si l'arc  $(i, j)$  est traversé lors de la solution, et 0 sinon.

Dans le VRP, il est habituel que l'objectif principal soit de minimiser le nombre total de véhicules utilisés, puis de minimiser la distance totale parcourue. D'autres fonctions objectifs sont illustrées dans [19]. Le nombre total de véhicules est un objectif primaire car, en général, de plus grandes économies peuvent être réalisées avec moins de véhicules (coûts fixes des véhicules, coût de la main-d'œuvre, etc.). Un tel objectif est contradictoire car avec moins de véhicules, la distance totale parcourue augmente et vice versa. En tenant compte du coût d'achat élevé des VEB, un tel objectif hiérarchique semble justifiable dans les applications de routage des VEB [236], [169].

Les fonctions objectives peuvent être complexes avec une minimisation simultanée du nombre de véhicules, de la distance totale parcourue [145], des temps de parcours totaux [22], du coût total d'acheminement et de l'horizon de planification [231], [145], [109], [123], des émissions de gaz à effet de serre (GES) [47], [170], de la consommation d'énergie [8], [282], etc.

Les coûts totaux d'acheminement des VEB comprennent généralement le coût d'acquisition du véhicule, la taxe de circulation, l'entretien, les coûts liés à la consommation d'énergie (prix de l'énergie électrique), le coût de renouvellement du bloc-batterie après sa durée de vie, les coûts de main-d'œuvre, etc. Au lieu d'une fonction à objectif unique, certains auteurs utilisent une fonction à objectifs multiples, par exemple, la consommation de carburant et le temps de conduite total [48], la consommation de carburant et le coût de l'itinéraire [209], le remplacement de la batterie et la planification de la charge [5], etc.

Suite à la pénétration des VEB sur le marché, des flottes de VEB ont fini par émerger, principalement dans le domaine de la logistique et de la distribution. Bien que le VRP et ses variantes couvrent un large spectre du domaine de l'optimisation, il a dans un premier temps fallu adapter les extensions "historiques" du VRP à ce nouveau cadre posé par le VEB, donnant naissance au problème de tournée de véhicules électriques (EVRP). De plus, en raison des caractéristiques spécifiques au VEB, de nouvelles variantes de l'EVRP sont apparues dans le but d'assurer le routage des VEB. Nous allons présenter ici une liste non exhaustive des différentes variantes de l'EVRP. Cette liste est mise en avant car identifie les variantes les plus pertinentes et leurs problèmes associés.

## Le problème du plus court chemin énergétique

Le problème du plus court chemin énergétique (ESPP) et le TSP électrique (ETSP) peuvent être considérés comme les deux formes les plus simples de l'EVRP. Dans la plupart des variantes du VRP, les arcs du graphe ont des valeurs de poids positives qui peuvent représenter la distance, le temps de déplacement, le coût, etc.

Pour calculer le plus court chemin entre les clients, les algorithmes les plus couramment appliqués sont ceux de Dijkstra, Bellman-Ford,  $A^*$ , les hiérarchies de contraction, etc. [6], [197]. Cependant, en prenant en compte l'énergie récupérée par les VEB au freinage, certains poids d'arcs peuvent avoir une valeur qui devienne négative, rendant alors la plupart des algorithmes de plus court chemin inapplicables. Pour surmonter ce problème, [6] ont formalisé un routage économe en énergie avec des batteries rechargeables comme cas particulier du ESPP. Dans ce système contraint (Constrained shortest path problem - CSPP), la charge des batteries est limitée par sa capacité réduite et la recharge en CS n'est pas possible. Pour résoudre la CSPP énergétique, les auteurs ont adapté l'algorithme du plus court chemin de Bellman-Ford avec une complexité temporelle en  $O(n^3)$ .

Pour surmonter les arêtes négatives du graphe, [77] ont utilisé la technique de décalage de [139] pour transformer les fonctions de coût des arêtes négatives en fonctions non négatives et ont appliqué l'algorithme de Dijkstra avec une complexité temporelle de  $O(n \log(n) + m)$  [54].

[247] a introduit le CSPP pour les VE avec échange de batterie, tandis que [256] ont ajouté des événements de recharge aux CS avec une fonction de charge différentielle.

[286] a résolu le CSPP pour le routage des VEB avec des contraintes de batterie, différents types de CS et un processus de charge non linéaire. L'auteur a développé un algorithme de propagation de la fonction de charge afin de minimiser le temps de déplacement et a appliqué les algorithmes CH et A pour résoudre le problème.

[163] ont considéré le problème du plus court chemin de déplacement du VEB et ont présenté un algorithme de programmation dynamique pour résoudre le problème en  $O(kn^2)$ .

Plus récemment, [247] ont observé les événements de recharge dans les sommets et les arcs du graphe pour les plus courts itinéraires éco-énergétiques des VEB et (Vehicule Electrique Hybride) VEH, tandis que [283] ont traité le problème de la planification d'itinéraire des véhicules électriques avec recharge (ERVRP), qui minimise le temps de déplacement et de recharge global et prend en compte les emplacements des CS, la recharge partielle, les fonctions de recharge non linéaires, la durée du service et la fréquence du service au CS.

Comme le VRP est la généralisation du TSP, le EVRP est étroitement lié au ETSP, dans lequel un ensemble de clients doit être desservi par un seul VEB. [222] ont formulé le ETSP avec fenêtres de temps (ETSP<sub>TW</sub>) comme un programme MILP compact avec des variables binaires pour les chemins de recharge avec arrêts intermédiaires. Les auteurs ont observé des politiques de recharge complète et partielle et ont appliqué une heuristique à trois phases pour résoudre le problème. Les auteurs ont résolu plusieurs instances. Les treize instances de l'ETWVRP de [236], qui ont été résolues de manière optimale avec un seul véhicule. [55] ont formulé le VEHTSP avec quatre modes de fonctionnement pour les VEH et ont fourni de nouvelles instances de test.

[163] ont introduit le problème de la tournée des VE, comme une généralisation du TSP, avec la minimisation du temps total requis. Deux scénarios avec le schéma d'échange de batterie ont été observés : le modèle de station sur site, dans lequel chaque ville possède un ; le modèle de station hors site, dans lequel le BSS est situé à une distance acceptable de la ville. Les auteurs ont proposé des algorithmes efficaces en temps polynomial pour ce problème.

## Flotte de véhicules hétérogènes ou mixtes

Nous l'avons mis en avant plus tôt, les véhicules électriques sont de plus en plus répandus au sein des flottes de transporteurs. Cependant, la majorité des véhicules de ces flottes sont toujours des véhicules à combustions internes (gazoil ou essence). Encore aujourd'hui, le déploiement de VEB, pour remplacer toute une flotte de véhicules thermiques, est encore un enjeu financier difficile à concrétiser. Dans ce contexte, la plupart des entreprises font le choix d'intégrer progressivement les VEB au sein de leur parc de véhicules. Les algorithmes de routage doivent donc être mis à jour et adaptés aux caractéristiques des VEB au sein d'une flotte d'ICEV.

Le VRP comme application de grande envergure, combiné à l'utilisation de flotte mixte (FSM-VRP), a été introduit pour la première fois par [123]. Les auteurs ont considéré le routage d'une flotte de véhicules avec différents coûts d'acquisition et le coût de routage dépend du type de véhicule.

[109] ont ensuite formulé le modèle ETWVRP combiné à une flotte mixte (EVRPTWMF) avec des capacités de charge (volume transporté) égales pour les véhicules VEB et ICEV, et au sein de la flotte de VEB de capacité de batterie VEB équivalente. Les auteurs ont comparé la part en pourcentage des VEB à la distance totale parcourue obtenue avec trois fonctions objectifs : distance totale parcourue, le coût total intégrant le coût de la batterie et le coût total sans le coût de batterie. La distance parcourue avec un pack de batteries a été supposée être de 241 350 km (150 000 miles) avec le paiement d'un supplément de 600 \$ par kWh en cas de remplacement. Les résultats montrent que la part du VEB dans la distance totale parcourue augmente, de manière significative, lorsque les coûts de la batterie ne sont pas pris en compte, tandis que dans les deux autres scénarios, les véhicules à combustion interne effectuent la plupart des livraisons. [123] ont analysé un problème similaire concernant la taille du parc électrique combinant VRPTW et stations de recharge (CSTWVRP), avec différentes charges de véhicules et capacités de batterie. Les auteurs ont montré l'influence positive globale de la flotte de véhicules hétérogènes sur la fonction de coût total généralisé. Dans la plupart des instances, trois à quatre types de véhicules sont utilisés dans la solution finale. Une analyse similaire sur des instances de petite taille avec différents VEBs, ICEVs, et PHEVs a été entreprise par [158]. Les auteurs ont défini sept groupes de types de véhicules pouvant être utilisés pour la livraison, depuis les petites camionnettes et les quadricycles jusqu'à un groupe de tous les types de véhicules, en passant par des groupes exclusivement diesel ou exclusivement électriques. Les résultats ont montré les aspects suivants : (i) la flotte composée de différents types de véhicules a réduit les coûts totaux d'acheminement ; (ii) dans le groupe des grandes fourgonnettes, les ICEVs sont plus performants que les VEB ; et (iii) les PHEV ont montré une grande application dans les livraisons effectuées uniquement par des camions.

[229], [230] ont également observé une flotte hétérogène de VCI et de VEB avec des capacités de charge et de batterie différentes, des coûts d'exploitation différents, des charges dépendant du temps, et la compatibilité des VEB et des chargeurs dans les CS. Les auteurs se sont concentrés sur les procédures de résolution du problème, ils n'ont donc pas proposé de comparaison entre les solutions ICEV et VEB.

[121] ont présenté le problème de routage de flottes électriques hétérogènes hybrides avec des fenêtres de temps et des stations de recharge (HHCSVRP), dans lequel la flotte se compose de ICEVs, de VEB et de PHEVs (Plug-in Hybrid-Electric Vehicles). Les auteurs ont comparé les coûts globaux des solutions obtenues avec une flotte homogène d'ICEVs, VEBs, et PHEVs à la solution optimisée avec une flotte mixte. L'écart pour la flotte ICEV est le plus important, avec une valeur moyenne de 60% dans le cas extrême où le coût du carburant est le plus élevé. En revanche, lorsque le coût de l'électricité est le plus élevé, la flotte de VEB produit en moyenne un écart de 40 %, tandis que la flotte de PHEV présente la valeur d'écart la plus faible, jusqu'à 25%. Les auteurs ont souligné que, dans les solutions mixtes, les VEB sont préférés pour les instances groupées, les ICEV pour les instances distribuées de manière aléatoire, et les PHEV pour les instances groupées et distribuées de manière aléatoire. Dans l'ensemble, les résultats ont montré que les coûts opérationnels peuvent être inférieurs de 7% dans un cas mixte par rapport au cas homogène.

## Les véhicules hybrides

Pour compenser l'autonomie limitée des VEB, des véhicules désignés comme Plug-in Hybrid-Electric Vehicles (PHEV), dotés à la fois d'un moteur à combustion interne et d'un moteur électrique, ont été développés. Deux principaux types de PHEV sont présents sur le marché : l'hybride série, dans lequel seul le moteur électrique entraîne le train et le moteur à combustion interne est utilisé pour recharger le bloc de batteries, et l'hybride parallèle, qui utilise à la fois le moteur à combustion interne et le moteur électrique pour entraîner le train, où le moteur électrique est plus efficace dans les activités de type stop-and-go et où, le moteur à combustion interne est plus efficace à grande vitesse. Nous nous concentrons sur la version de l'hybride parallèle dans laquelle les batteries peuvent être rechargées en connectant le véhicule à une source d'énergie électrique. Les PHEV ont la possibilité de décider en cours de route de fonctionner soit via l'énergie électrique, soit en utilisant le pétrole fossile. Cela permet de rendre visite à des clients éloignés du dépôt sans avoir à faire le plein ou à recharger le véhicule pendant le trajet. Comme les PHEV ont deux moteurs, leur charge est plus lourde que celle des VEB et des ICEV, et ils ont donc un taux de consommation d'énergie plus élevé. Le temps consacré aux livraisons est plus court, ce qui permet de réaliser plus facilement des livraisons à heure précise et de réduire les coûts de recharge, au détriment des coûts plus élevés dus à la consommation de pétrole fossile.

L'un des premiers articles traitant du problème de routage des PHEV a été publié par [1], où l'auteur a défini le problème comme étant le VRPTW électrique hybride rechargeable (PHE-VRPTW). L'objectif du problème proposé était de minimiser les coûts de routage sur le moteur à combustion interne tout en satisfaisant les contraintes de demande et de fenêtre temporelle. À chaque client, le conducteur peut soit recharger la batterie du véhicule, soit passer à la prochaine fenêtre temporelle ouverte en utilisant le moteur à combustion interne lorsque l'énergie électrique est épuisée.

[56] ont défini le PHEVTSP dans lequel les auteurs ont observé des HEV qui ne sont pas enflamtables et ne peuvent être rechargés que lors de la conduite. Quatre modes de fonctionnement ont été définis : le mode à combustion seule, le mode à électricité seule, le mode de charge et le mode de suralimentation lorsque le moteur à combustion interne et le moteur électrique combinés sont utilisés. Du fait que les auteurs soient partis du principe que la batterie était initialement vide, dû au routage de la veille, la charge initiale de la batterie a été fixée à zéro. Les auteurs ont présenté les effets positifs de l'utilisation des PHEV : (i) par rapport aux itinéraires ICEV, les coûts globaux pour les itinéraires PHEV dans les cas testés ont diminué jusqu'à 13% et le temps de conduite a augmenté jusqu'à 11% ; (ii) les économies dépendent fortement de l'emplacement du dépôt, et non de la capacité limitée de la batterie, qui était une hypothèse a priori.

[171] a introduit le VRP hybride (HVRP), dans lequel les PHEV peuvent changer de mode de propulsion à tout moment et où le moteur électrique, plutôt que le moteur à combustion interne, est promu.

[272] ont présenté un problème HVRP similaire avec des PHEV et des mild-PHEV, qui ne disposent pas d'un mode de propulsion exclusivement électrique. Les résultats montrent que les PHEV ont un coût moyen par kilomètre inférieur dans tous les scénarios par rapport aux mild-PHEV et aux ICEV.

[122], dans leur HEFTW, ont utilisé le moteur électrique du PHEV comme choix de mode prioritaire. Lorsqu'une fenêtre temporelle d'un itinéraire PHEV est violée, le mode peut être changé à tout moment pendant l'itinéraire en échangeant le temps de recharge contre la quantité correspondante de carburant, sans frais supplémentaires. Les auteurs ont montré l'impact positif d'une flotte de PHEV par rapport aux flottes de ICEV et VEB, en particulier pour les instances regroupées de manière aléatoire. Les PHEV ne sont généralement représentés qu'à hauteur de 20% du nombre total de véhicules utilisés dans la solution, en raison de leur consommation et de leurs coûts d'utilisation plus élevés, mais ils constituent néanmoins une partie importante de la configuration de la flotte en raison de leur flexibilité.

## Batterie : la recharge partielle

À l'origine, dans la plupart des problèmes d'EVRP, on considérait que la recharge était complète lorsqu'un VEB visitait un CS (Station de charge) [123]. Cette considération impliquait de perdre beaucoup de temps en CS. En fonction du niveau de charge (SoC) de la batterie du véhicule, la charge peut durer entre 5 minutes et 8 heures [174]. Par conséquent, des solutions exploitant une recharge partielle des batteries de VEB ont vu le jour.

La batterie doit être suffisamment chargée pour effectuer l'ensemble du trajet ou pour surmonter la crainte que l'autonomie du véhicule ne soit pas suffisante pour effectuer les tâches prévues, ce que l'on appelle l'angoisse de l'autonomie [255]. Cela a un effet particulier sur les clients dont la fenêtre de temps est étroite, où une planification efficace de la charge peut permettre la faisabilité de l'itinéraire.

Du point de vue économique, des économies importantes peuvent être réalisées en appliquant la recharge partielle, car une quantité minimale d'énergie peut être rechargée pendant la journée, lorsque le coût de l'électricité et la charge du réseau énergétique sont le plus élevés. Le reste de l'énergie peut être reconstitué pendant la nuit [89], lors des heures creuses. Dans certains cas, il est naturel de maintenir la réserve d'énergie. Cela peut être fait en limitant la portée du SoC, par exemple [204]. Disposer d'une réserve d'énergie semble encore plus important si la consommation d'énergie et l'inquiétude quant à l'autonomie sont prises en compte, car jusqu'à 30% de l'énergie consommée peut être dépensée pour les dispositifs auxiliaires des VEB [221]. Limiter la valeur du SoC permet également de préserver la batterie, car la capacité de la batterie diminue en cas de surcharge et de surdécharge [206].

Plusieurs articles ont analysé les stratégies de recharge partielle et formulé le problème comme EVRPTW avec recharge partielle (E-VRPTWPR). [23] ont modélisé le concept de recharge partielle dans E-VRP. [89], dans GRVP avec technologies multiples et recharges partielles (GVRP-MTPR), et [145], dans E-VRPTWPR, ont fait en sorte qu'après chaque changement dans la configuration de l'itinéraire, au CS précédent, le VEB ne soit chargé qu'avec la quantité d'énergie suffisante pour terminer le segment de l'itinéraire jusqu'au prochain CS ou au dépôt. Cela entraîne la suppression de certains CS de l'itinéraire, par rapport à la stratégie de recharge complète, et l'arrivée d'un véhicule au dépôt avec une batterie vide. Les auteurs ont présenté l'impact positif des recharges partielles sur les coûts totaux et les économies d'énergie.

Une procédure similaire a été appliquée par [229], [230], mais avec plusieurs technologies de recharge, différentes périodes de recharge et des contrôles de compatibilité des chargeurs VEB. [233] ont comparé la recharge complète et la recharge partielle en résolvant de petites instances de test E-VRPTWPR à l'aide d'un logiciel commercial. Les auteurs ont conclu que, dans certains cas, une stratégie de recharge partielle réduit la distance totale parcourue et le nombre de visites aux CS.

[187] ont formulé le FCVRP pour les VEB dans lequel, pour une séquence fixe de clients dans l'itinéraire, la position du CS et la quantité de recharge sont optimisées. Les résultats sur les instances de test nouvellement dérivées ont montré que les bonnes solutions ont tendance à exploiter les recharges partielles.

[51] ont présenté les effets de la recharge partielle en résolvant de manière optimale des instances E-VRPTW contenant jusqu'à 100 clients. Dans un cas avec une seule recharge par route, la recharge partielle a réduit les coûts de routage de 0,97% et le nombre de véhicules de 2,25%, tandis que dans un cas avec plusieurs recharges par route, ces valeurs sont de 1,91% et 3,80%, respectivement, avec une augmentation significative du nombre moyen de recharges par route.

## Batterie : les technologies de charge

Aujourd'hui, il existe plusieurs technologies de recharge : (i) lente, 3 kW (6-8 h) ; (ii) rapide, 7-43 kW (1-2 h) ; et (iii) rapide, 50-250 kW (5-30 min) [175]. Pour mieux contrôler le temps de charge dans le contexte de l'EVRP, le choix de la technologie de charge peut également être optimisé. Ainsi, certains clients dont les plages horaires sont étroites pourraient être plus accessibles grâce à la recharge rapide dans les CS précédents, ou si les plages horaires sont longues, une approche économiquement plus avantageuse pourrait être la recharge lente. Un tel problème pourrait être étendu en prenant en compte les heures de travail des CS, les coûts de charge en fonction du temps, le nombre de chargeurs disponibles et leur compatibilité avec les VEB, la charge du réseau électrique, la puissance du chargeur, etc. [89].

[89] ont analysé l'effet de différentes technologies de charge sur le coût de la recharge. Les auteurs ont conclu qu'aucune des technologies ne dominait les autres. Les options de recharge rapide et de charge rapide ont fourni des résultats légèrement meilleurs que la charge lente, mais les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque des technologies conjointes ont été utilisées, car la plus appropriée pouvait être choisie dans chaque cas. [28] ont résolu des instances de petite taille pour présenter les avantages de l'option de charge rapide. Les résultats montrent que la recharge rapide peut réduire la taille du parc automobile et diminuer le coût de l'énergie nécessaire au fonctionnement des VEB.

[146] ont formulé E-VRPTW et la charge rapide (E-VRPTW-FC) avec des recharges partielles et trois technologies de charge différentes. Les auteurs ont fourni une formulation MILP et ont minimisé les coûts totaux de recharge tout en exploitant un nombre minimum de véhicules. Les auteurs ont comparé deux modèles de programmation mixte en nombres entiers (MILP) : (i) le modèle 1, dans lequel des variables binaires sont utilisées comme variables de décision pour choisir la technologie de recharge à utiliser ; (ii) le modèle 2, dans lequel les auteurs ont copié chaque sommet de station trois fois en fonction de la technologie de recharge. Les résultats ont montré que dans tous les cas, le modèle 1 a donné de meilleurs résultats avec un temps de calcul plus court. Les tests effectués sur des instances plus importantes ont montré que l'option de recharge rapide est plus avantageuse lorsque les clients ont des fenêtres de temps étroites et que les technologies de recharge multiples améliorent les résultats globaux (dans 28 des 29 instances), tandis que dans les instances avec des fenêtres de temps plus importantes, l'amélioration moyenne est de 0,17%.

## Batterie : charge non linéaire

Dans la plupart des publications relatives aux VEB, on considère un temps de charge linéaire ou constant. La plupart des VEB sont équipés de batteries lithium-ion, qui sont souvent chargées par phases de courant constant et de tension constante (CC-CV) : d'abord par un courant constant jusqu'à environ 80% de la valeur SoC, puis par une tension constante. Dans la phase CC, le SoC augmente de façon linéaire, et dans la phase CV, le courant diminue de façon exponentielle et le SoC augmente de façon non linéaire dans le temps, ce qui prolonge le temps de charge [49].

[287] a développé un algorithme de propagation de la fonction de charge pour déterminer un itinéraire contraint par la batterie d'un VE en prenant en compte les fonctions linéaires et concaves par morceaux du processus de charge.

Actuellement, seule un faible nombre de publications prennent en compte un processus de charge non linéaire, cherchant plutôt à résoudre l'EVRP par linéarisation par segments, soit en estimant le temps de charge par une approche basée sur les données [287]. [186] ont formulé le E-VRP avec des fonctions de charge non linéaires (E-VRP-NL) et présenté la formulation MILP. Les auteurs ont ajusté des fonctions linéaires par morceaux pour des CS de 11, 22 et 44 kW aux données réelles mesurées. Les résultats ont montré que la négligence de la charge non linéaire peut conduire à des solutions infaisables ou trop coûteuses : 12% des itinéraires des bonnes solutions rechargeaient la batterie dans la partie non linéaire, après 80% de la valeur du SoC.

[96] ont proposé deux nouvelles formulations pour le E-VRP-NL : (i) la version MILP améliorée de Montoya et al. [186] par un suivi de la valeur SoC basé sur les arcs ; (ii) un modèle basé sur le chemin sans réplication CS, où une séquence de sommets (un chemin) entre une paire de clients ou de dépôts est déterminée. Le second modèle a donné de bien meilleurs résultats avec un temps de calcul plus court. [95] ont exploré des formulations similaires pour le modèle E-VRP-NL avec des CS capacitaires (E-VRP-NL-C) : (i) la formulation basée sur la réplication des CS avec des formulations basées sur le flux et les événements pour les contraintes de capacité des CS ; (ii) la formulation basée sur le chemin de recharge.

### **Routage des VEB et localisation des CS**

En raison de la faible part de marché actuelle des VEB, le nombre de CS installés dans l'infrastructure routière est également relativement faible. Par conséquent, un grand potentiel réside dans la prise de décision simultanée des emplacements des CS et des itinéraires des VEB. Le problème classique de routage des emplacements (LRP) consiste à déterminer les emplacements des dépôts et les itinéraires des véhicules approvisionnant les clients à partir de ces dépôts [210]. Une modification du LRP qui traite des installations de CS est formulée comme LRP électrique (ELRP) [232].

[232] ont présenté une étude de cas pour la résolution de l'ELRPTWVPR. Il a été supposé que les CS peuvent être situés à l'emplacement des clients et que le temps de service peut être utilisé pour la recharge. Dans l'ensemble, les résultats indiquent la viabilité de la combinaison de l'emplacement des CS et de l'acheminement des VEB dans des cas spécifiques où la zone de livraison n'est pas éloignée du dépôt.

[234] ont comparé les solutions ELRPTWVPR et E-VRPTWVPR sur des instances de test à échelle réduite et ont conclu que la solution ELRPTWVPR est meilleure dans toutes les instances. La raison en est que les VEB peuvent être rechargés pendant le service, ce qui réduit le temps de parcours global, puisqu'il n'y a pas de temps de déplacement perdu pour se rendre au CS et en revenir.

[124] ont traité le problème de E-LRP mais avec des BSS. Les résultats indiquent que la diminution du coût de construction des BSS conduit à l'augmentation attendue de leur nombre dans la solution. [235] ont formulé le LRP avec des installations intraroute (LRPIF) comme un problème plus général, dans lequel les installations intraroute peuvent être utilisées pour le ravitaillement, le chargement ou le déchargement de marchandises.

[253] Sont proposé un modèle de localisation des CS sans routage basé sur les demandes de déplacement des résidents urbains. Pour les voyageurs à courte distance, les CS lents sont utilisés, tandis que pour les voyageurs à longue distance, les CS rapides sont considérés. Les emplacements des CS sont déterminés pour maximiser la couverture et le flux en fonction du concept de ravitaillement des véhicules. Dans l'étude de cas, les auteurs ont souligné deux aspects critiques : l'autonomie des VEB et la contrainte budgétaire.

### **Batterie : recharge via remplacement**

Au lieu de recharger les batteries dans les stations de base, les batteries vides ou presque vides peuvent être remplacées par des batteries entièrement chargées dans des stations de base spécialement conçues [161]. Les principaux avantages d'une telle procédure sont le temps dans lequel elle peut être effectuée et la possibilité de recharger lorsque la charge du réseau énergétique et les coûts de l'électricité sont plus faibles, c'est-à-dire pendant la nuit. Une procédure de remplacement complète pourrait durer moins de dix minutes, ce qui est compétitif par rapport au temps de ravitaillement des véhicules à moteur à combustion interne et beaucoup plus rapide que l'une des technologies de recharge les plus rapides des véhicules électriques à faible consommation. Les inconvénients de cette procédure sont les batteries non standardisées et leur installation dans les VEB, ce qui rend difficile l'échange de batteries vides contre des batteries complètement chargées.

[136] ont observé le E-VRP avec des batteries interchangeables, des emplacements de BSS déjà déterminés, un nombre fixe de batteries par BSS, une recharge complète de quatre heures et un temps d'échange fixe de deux minutes. La recharge complète de la batterie est prise en compte pour qu'il soit possible que lorsque le véhicule arrive à la station, il n'y ait pas de batterie complètement chargée disponible et que le véhicule doive attendre. Le coût total du routage est d'abord minimisé, puis les réservations de batteries sont effectuées, de sorte que le véhicule puisse éviter les BSS (Battery Swapping Station) sans batterie disponible.

[278] ont déterminé simultanément les emplacements des BSS et le plan de routage du véhicule et ont fourni différentes métaheuristiques pour résoudre le problème.

[278] ont formulé le problème sous forme de BSS-EV-LRP et ont comparé les solutions des instances BSS-EV-LRP aux solutions CVRP correspondantes les plus connues. Les coûts totaux d'acheminement, pour des autonomies de 150 km et 300 km, sont passés à 7% et 3,5% respectivement et, dans certains cas, il n'y avait aucun écart entre les solutions BSS-EV-LRP et CVRP.

[124] sur le même problème ont indiqué que si les coûts de construction des BSS sont égaux à zéro, les Battery Swapping Station (BSS) seraient construites dans 83% du total des sites candidats disponibles.

### **Problème de routage à deux échelons**

[20] ont proposé le VRP électrique à deux échelons (E2EVRP), dans lequel les marchandises sont transportées en deux échelons : (i) au premier échelon, les marchandises sont transportées par des véhicules de fret conventionnels du dépôt aux installations satellites ou Centre de distribution Urbain (CDU) ; (ii) au second échelon, les marchandises sont transportées des installations satellites aux clients par des VEB légers.

Deux types de véhicules sont observés dans le problème : les véhicules à moteur à combustion interne (ICEV) avec une capacité de charge supérieure situés au dépôt et les VEB avec une capacité de charge inférieure situés dans les installations satellites. Les VEB sont utilisés pour les livraisons du dernier kilomètre en raison de leur faible pollution, de leur bruit et de leur taille. Les auteurs ont formulé le problème sur le multigraphe et ont appliqué des procédures exactes sur des instances plus petites pour résoudre le problème de manière optimale et une procédure métaheuristique sur des instances plus grandes, nouvellement développées. Les résultats montrent que l'augmentation de la densité de CS diminue les coûts de détour selon l'expression  $1/1,24$ . De plus, l'autonomie du véhicule a un impact important sur la qualité de la solution : une autonomie inférieure à 70 km produit des solutions infaisables tandis qu'une autonomie supérieure à 150 km réduit les visites de rechargement à presque zéro.

[138] ont analysé un problème similaire, le EVRP capacitair à deux échelons avec BSS (2E-EVRP-BSS), dans lequel des VEB sont utilisés aux deux échelons. Les VEB du premier échelon ont des capacités de charge et de batterie plus élevées que les VEB du second échelon. Les auteurs ont indiqué que l'autonomie de la batterie est l'aspect le plus important du routage et qu'elle dépend légèrement du nombre de BSS utilisés.

### **Programme de tarification**

De nombreuses entreprises, qui utilisent des VEB, préfèrent charger les véhicules dans leurs propres installations afin de les recharger entre les tournées de livraison et pendant des périodes spécifiques de la journée. Dans de telles occasions, il y a habituellement un nombre limité de chargeurs au dépôt, généralement moins que la taille de la flotte ; par conséquent, le programme de charge efficace au dépôt doit être déterminé.

[205] ont étudié le problème de l'ordonnancement de la charge des véhicules électriques de transport de marchandises (EFV-CSP) au dépôt pour les VEB qui livrent des marchandises à un ensemble de clients sur plusieurs jours. Les auteurs ont inclus plusieurs technologies de charge au dépôt, un processus de charge réaliste (linéarisation par morceaux d'une fonction de charge non linéaire), des coûts de charge dépendant du temps, une restriction de l'alimentation du réseau, des coûts de dégradation de la batterie (vieillesse cyclique et calendaire) et des frais de demande liés à l'installation représentant la demande maximale enregistrée pendant la période de facturation. Les itinéraires fixes des véhicules sont connus à l'avance et le nombre d'événements de charge dans le dépôt est limité pour éviter les solutions peu pratiques consistant à déplacer constamment un véhicule d'un chargeur à l'autre. Les auteurs ont présenté les aspects suivants des tests de programmation de la charge effectués en été (coûts d'électricité plus élevés) et en hiver (coûts d'électricité plus faibles) : (i) le modèle tente de maintenir le SoC à un niveau plus bas lorsque les coûts de dégradation de la batterie sont inclus ; (ii) en été, les véhicules sont rarement chargés pendant les heures de pointe, ce qui entraîne la charge simultanée de plus de véhicules ou l'utilisation de chargeurs rapides qui récupèrent plus d'énergie du réseau en dehors des heures de pointe, mais entraînent des frais de DRF plus élevés ; (iii) pour éviter de cycler la batterie en SoC élevé, il est préférable de diviser les longs trajets en plus petits ; (iv) les chargeurs rapides sont fortement utilisés dans un contexte de forte utilisation des VEB ; (v) la restriction de la puissance du réseau augmente les coûts énergétiques globaux, en particulier pendant les mois d'été, et conduit à des solutions infaisables, limitant le nombre de véhicules qui se chargent simultanément ; et (vi) les coûts totaux sont toujours plus faibles avec des batteries plus grandes, car les batteries plus petites nécessitent des cycles de décharge plus importants.

[9] ont également analysé la planification de la charge pour des itinéraires assignés dans un scénario de navette d'aéroport. Les auteurs ont défini l'ensemble des actions de charge (profil de charge) sur l'horizon de programmation déterminé et ont minimisé les coûts d'exploitation globaux.

### Conditions de circulation dynamiques

La plupart des recherches sur EVRP considèrent des conditions statiques sur le réseau routier. Les états du trafic changent de manière récurrente, en fonction de l'heure de la journée, du jour de la semaine et de la saison, ou de manière non récurrente lorsqu'un incident de trafic se produit, tel qu'un accident [81]. TD-VRP achemine une flotte de véhicules en tenant compte des temps de parcours variables sur le réseau routier [75].

[241] ont observé les VEB dans un tel contexte de dépendance temporelle dans leur EVRP avec temps de recharge et temps de déplacement variables (EVRP-CTVTT). Le temps de recharge est fixé à 30 minutes et les batteries sont toujours chargées au maximum de sa capacité. Les auteurs ont discrétisé une journée en intervalles de deux minutes et ont appliqué l'algorithme dynamique de Dijkstra pour trouver le chemin le plus court en termes de temps de trajet lorsque les poids dans le graphe ne sont pas constants. Les auteurs ont présenté un problème réel et l'ont résolu en appliquant un algorithme génétique avec un temps d'exécution de trois heures.

[196] ont présenté un modèle de routage des véhicules électriques qui vise à éviter les trajets pendant les heures de congestion, lorsque les coûts de pollution sont élevés, en attendant chez les clients. Ces coûts ont été calculés sur la base du profil de vitesse de la route.

[182] ont présenté une formulation MILP pour le VRP périodique vert (GPVRP) hétérogène avec un trafic urbain dépendant du temps et des fenêtres de temps, qui est vert en termes de minimisation des émissions et non d'utilisation des véhicules électriques. L'horizon de planification est divisé en plusieurs périodes, pendant lesquelles des conditions de trafic statiques sont considérées.

## 4.2.2 Le phénomène de vieillissement des batteries

Engagés dans le transport de marchandises au travers des Systèmes de Transport Intelligent (STI), nous nous intéressons dans ce chapitre à une application de tournée de véhicule pour la livraison de marchandises en centre urbain. Pour réaliser les tournées calculées, le système exploite des véhicules électriques et autonomes. Exploitant la technologie des batteries lithium et souhaitant intégrer leur phénomène de vieillissement au processus d'optimisation et de dimensionnement d'une batterie, nous allons dans cette partie, tenter de présenter en quoi consiste le vieillissement, ses causes et ses conséquences.

### 4.2.2.1 Quel intérêt pour la batterie lithium dans le transport ?

On désigne par accumulateur tout système électrochimique capable d'emmagasiner de l'énergie sous une forme chimique pour ensuite la restituer sous forme électrique, après un temps plus ou moins long, en fonction du besoin. Une fois l'énergie emmagasinée restituée, l'accumulateur peut alors être rechargé.

Les accumulateurs lithium-ion sont une catégorie des accumulateurs lithium. Suite aux travaux de J. Goodenough et al. en 1980 et de R. Yazami et P. Touzain en 1983, Sony Energitech développe la technologie lithium-ion (Li-ion) et la commercialise dès 1991 [157]. En 2005, les accumulateurs lithium-ion étaient en plein essor dans le monde entier, enregistraient alors une hausse de leur consommation de plus de 25% par rapport à l'année 2004 [157]. Par la suite, les accumulateurs lithium-ion ont continué de se démocratiser et de se répandre dans tous les secteurs. On peut prendre l'exemple du Japon, leader avec trois entreprises (Sanyo, Matsushita et Sony) qui se partageaient à elles seules (avec deux entreprises coréennes - LG et Samsung) alors 95% de la vente d'accumulateurs lithium-ion. Cette volonté de développer la batterie lithium partait directement des *"instituts de recherche, universités et entreprises qui ont investi massivement dans le développement des accumulateurs du futur, pour investir le plus de domaines possibles, comme ceux de la sécurité, de l'aérospatiale, de la médecine, des véhicules électriques ou encore de l'équipement militaire"* [157]. À ces domaines, on peut rajouter ceux de la consommation de masse, concernant l'ensemble du parc mondial de station de travail (les ordinateurs portables) ou encore les smart-phones.

Le facteur déclencheur du succès mondial de la technologie lithium, réside principalement dans la capacité de cette technologie à emmagasiner, par unité de masse, une grande quantité d'énergie, appelée densité d'énergie massique [14]. La densité d'énergie massique traduit le rapport entre la capacité de stockage du lithium par son encombrement ou son poids. La technologie lithium tend à offrir une densité d'énergie massique pouvant atteindre 500 Wh/kg. Impliquant que des véhicules équipés de cette technologie sont dotés d'une grande autonomie.

Suite à son développement mondial, rendant la technologie lithium accessible à la consommation de masse, de par un coût financier devenu raisonnable, les batteries lithium ont été identifiées comme la source d'énergie viable pour électrifier le domaine du transport, disposant du meilleur compromis entre capacité, volume et masse.

### 4.2.2.2 Les batteries de véhicules électriques et leur dégradation

Le vieillissement est le point clef de ce chapitre de thèse. Pour rappel, nous cherchons à proposer un modèle de dimensionnement pour un véhicule et plus tard, une flotte, qui intègre le phénomène de dégradation interne des batteries des véhicules électriques. Pour résumer l'objectif visé, intégrer le vieillissement dans un process d'optimisation pour le dimensionnement d'une batterie de véhicule, doit permettre de maximiser la durée de vie et donc d'utilisation dudit véhicule. Avant de continuer, il est ici important de définir le concept de durée de vie. Par durée de vie d'une batterie, on entend nombre de cycles, charges, décharges, effectués avant que les performances de la batterie ne soient plus suffisantes. Dans le cas d'une application dans le domaine de l'automobile, une batterie est considérée comme ayant dépassée sa durée de vie, quand son SOH est tombé en dessous du seuil des 80%. Enfin, dans le domaine du transport, maximiser la durée de vie d'une batterie (et donc du véhicule) représente un avantage notoire pour la compétitivité d'une entreprise, ainsi que d'un point de vue écologique (qui somme toute à travers l'image de marque améliore également la compétitivité).

## De la compréhension du phénomène de vieillissement

Avant de s'intéresser aux batteries, commençons par une analogie du phénomène de vieillissement à l'humain. Si l'on considère la définition du Larousse [79], le vieillissement est défini comme :

*"Affaiblissement naturel des facultés physiques et psychiques dû à l'âge".*

De par la définition donnée, un humain, au fur et à mesure que son temps sur terre s'écoule, il vieillit et donc se dégrade. Tout au long de ce processus de vieillissement, son corps et son esprit se dégradent et lorsque le processus arrive à son terme, la personne décède. Cependant, tout au long de sa vie, et en parallèle du processus de vieillissement, un humain peut pratiquer des activités qui vont accélérer son vieillissement telles que les bains de soleil à répétition et sans protection, la consommation d'alcool, de tabac ainsi que les voyages dans l'espace. Par accélérer le vieillissement, on entend dégrader le corps plus rapidement sur une même période de temps donné. Donc si sur une même période de temps donné un humain se dégrade plus rapidement, logiquement sa durée de vie sur Terre diminue. C'est donc cette diminution de la durée de vie des accumulateurs Li-ion que nous souhaitons mettre en avant.

Si l'on considère maintenant les accumulateurs Li-ion, [203] nous donne la définition suivante du vieillissement :

*"Le vieillissement correspond à une détérioration irréversible des performances de la cellule."*

De par cette définition, humain comme accumulateur sont tous deux soumis à une durée de vie donnée. De plus, on rejoint bien le même mécanisme que chez l'humain, les dégradations dues au passage du temps étant définitives. Cependant, c'est à ce point précis qu'il est important d'arrêter de filer la métaphore. Le vieillissement d'un humain est lui uniquement dépendant du temps. Le vieillissement de l'accumulateur, quant à lui, est fonction de divers paramètres que nous allons développer par la suite.

## À sa caractérisation

**Les paramètres du vieillissement** Pour commencer, on distingue deux types de vieillissement. Le vieillissement "calendaire" et le vieillissement "en cyclage". Le vieillissement calendaire n'est à prendre en compte que lorsque la cellule est stockée sur le long terme. De par les caractéristiques de notre expérimentation, ce mode de vieillissement n'est pas considéré. Le mode qui va nous intéresser est le vieillissement "en cyclage". Ce terme signifie que la batterie est utilisée, soit dans un scénario de charge de la batterie, soit dans un scénario de décharge de la batterie. [203] nous dit que ce mode de vieillissement est fortement influencé par de nombreux paramètres comme la température du milieu ambiant de la batterie, la variation de l'état de charge ou encore la forme du courant. Si l'on se penche plus en détail sur ces différents paramètres, on remarque qu'ils dépendent tous de l'utilisation qui est faite du véhicule. Que cela soit la température, la variation de l'état de charge ou encore le courant qui transite dans la batterie, ils sont amenés à évoluer selon l'utilisation faite du véhicule pour se déplacer, de la manière de conduire (ou profil de conduite), de la géographie du chemin parcouru, ou encore des conditions induites par la qualité du trafic routier. Enfin, le cas de la recharge est également à considérer comme une utilisation. Ainsi, ces paramètres (et d'autres) étant tous dépendant de l'utilisation faite du véhicule, de par la définition donnée par [203], on en conclut que, dans le mode : "en cyclage", le vieillissement est à considérer en fonction de l'utilisation du véhicule.

**Les mécanismes du vieillissement** Le principe de la technologie des batteries au lithium consiste à faire circuler des électrons entre les électrodes d'une batterie pour créer une différence de potentiel. Ces électrodes, l'anode et la cathode, sont plongées dans une solution ionique appelée électrolyte. Lorsque la batterie est mise sous tension pour alimenter un équipement, les électrons de la cathode sont "libérés" dans l'électrolyte sous forme d'ion lithium, pour ensuite être absorbés par l'anode de la batterie. Dans le cas d'une mise sous tension, recharger la batterie, les ions lithium se déplacent alors de l'anode vers la cathode.

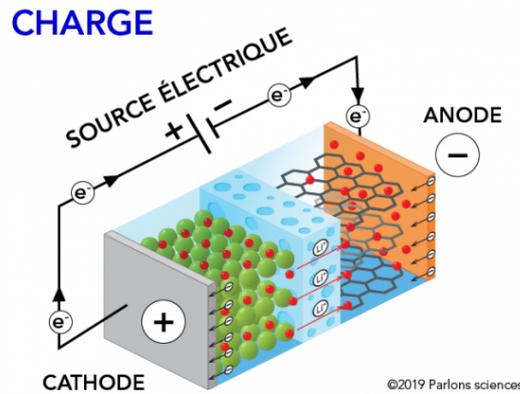


FIGURE 4.2 – Batterie - cellule lithium - [45]

Nous l'avons vu, le vieillissement d'une batterie est fonction de son utilisation, mais les mécanismes du phénomène de dégradation interne d'une batterie lithium peuvent être regroupés selon deux grandes familles, comme expliqué dans [203]. La première famille de mécanisme de vieillissement concerne la diminution du nombre d'ions qui vont participer au transfert d'énergie entre les électrodes. L'une des causes de cette diminution du nombre d'ions en mouvement est la présence de réactions chimiques, dites parasites, qui consomment les ions lithium et en font donc diminuer le nombre. Concernant les caractéristiques de la batterie, ce mécanisme implique une baisse de la quantité d'énergie (ou capacité) disponible de la batterie. La seconde famille de mécanisme de vieillissement concerne la dégradation des éléments chimiques qui composent les électrodes. Ce mécanisme de vieillissement implique aussi bien une baisse de la capacité de la batterie, qu'une augmentation de la résistance interne de celle-ci. Qui plus est, l'augmentation de l'impédance entraîne alors à son tour une diminution de la capacité de la batterie, lors d'une utilisation à fort courant. Ce qui dans le cas d'une application de véhicule électrique est chose courante.

Pour illustrer les conséquences du phénomène de vieillissement d'une batterie, [203] propose la figure 4.3. Sur cette illustration, on peut observer les fractures qui sont apparues sur le matériau qui compose les électrodes d'une batterie, suite à un grand nombre de cyclages.

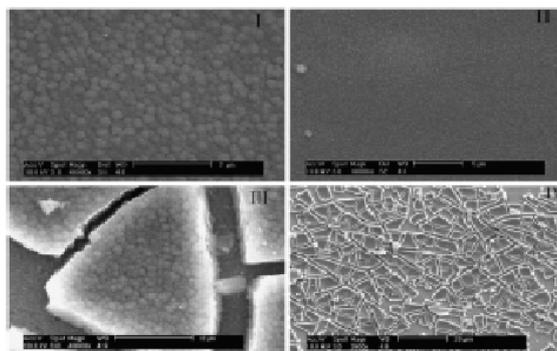


FIGURE 4.3 – Batterie - dégradation physique du lithium [203]

### Et ses enjeux

Le vieillissement des batteries, en limitant leur durée de vie (nombre de cycles), est un inconvénient majeur de la technologie lithium, peu importe le type de dispositif mis en jeu. Il est cependant intéressant de mettre en relation le dispositif (et sa batterie) avec son coût financier. Pour des dispositifs déjà peu coûteux (centaines d'euros), la batterie n'a pas un impact financier majeur. Dans ce cas-là, le remplacement de la batterie est à considérer pour prolonger la durée du dispositif, tel que pour des téléphones, des ordinateurs portables, etc. Cependant, considérant le cas d'application de cette Thèse, traitant des véhicules électriques pour le transport de marchandises, le renouvellement d'un pack batterie a un coût financier important, ainsi qu'un coût écologique fort. Pour un véhicule électrique tel qu'une Tesla Model S 90D à plus de 100K euros, la batterie équivaut à une valeur marchande avoisinant les 10, 12K euros. Dans ce cas-ci, le vieillissement doit être intégré dans le processus d'optimisation pour maximiser la durée de vie de la batterie du véhicule. Pour une entreprise ou un industriel devant rentabiliser son investissement sur une période donnée, remplacer le véhicule tous les deux ans n'aura pas le même impact sur les facturations réalisées, qu'en optimisant le vieillissement pour maximiser la durée de vie du véhicule, portant cette dernière à 8 ou 18 ans, par exemple.

Ainsi, tout au long de ce chapitre, nous allons développer une méthodologie permettant de dimensionner un véhicule électrique, en étant au plus proche du cas d'application réel dans lequel le véhicule va être amené à évoluer. Grâce à ce dimensionnement, on espère pouvoir maximiser la durée de vie d'une batterie de cette dernière, dans une démarche d'économie de la ressource naturelle, mais également dans une démarche de dynamisation du secteur privé pour permettre de faciliter et d'encourager le déploiement de véhicules électriques dans le domaine du transport de marchandises.

#### 4.2.2.3 Quelles grandeurs physiques pour quantifier le vieillissement ?

Parler de batterie et de son phénomène de dégradation interne (vieillessement) implique de devoir manipuler des grandeurs physiques pour être capables de manipuler et comprendre les mécanismes en jeu. Pour cela, sont présentées les grandeurs suivantes :

#### La capacité

Selon [14], la capacité de charge électrique, noté "C", souvent appelée dans le langage courant capacité de la batterie, est la charge électrique que peut fournir une batterie, lors d'un cycle de décharge. Sa valeur est donnée en Ah ou mAh. Elle dépend de l'intensité de décharge et diminue au cours de la vie de la batterie.

#### L'état de charge (SOC)

Cette définition du SOC est tirée de [14].

L'état de charge (de l'anglais State-of-Charge) d'un accumulateur représente la quantité de charge électrique stockée  $q(t)$ , relative à la capacité actuelle ( $C(t)$ ) :

$$SOC(t) = \frac{\text{charge électrique stockée}}{\text{capacité actuelle}} = \frac{q(t)}{C(t)} \quad (4.1)$$

L'état de charge est exprimé en % et peut varier entre 0% (état vide de l'accumulateur) et 100% (état plein de l'accumulateur). Le SOC est équivalent au pourcentage de la quantité d'essence présente dans le réservoir d'un véhicule thermique.

## La profondeur de décharge (DOD)

Le terme Depth-Of-Discharge correspond à l'acronyme DOD. Traduit en français, il correspond à la profondeur de décharge d'un accumulateur.

Commençons par une mise en pratique, pour mieux saisir le concept de profondeur de décharge. Toujours avec notre ordinateur, prenons l'exemple d'un protocole expérimental caractérisé par un cyclage charge-décharge identique et réalisé de façon régulière dans le temps. Ce cyclage est effectué sur l'accumulateur lithium-ion de notre ordinateur. Ainsi, chaque jour, l'accumulateur va être déchargé puis rechargé en 70% de son SOC et 30% de son SOC. La profondeur de décharge (noté DOD) correspondante sera donc de  $70\% - 30\% = 40\%$ .

D'après cette mise en pratique, le DOD ne traduit pas un état donné de l'accumulateur, mais au contraire, à une variation de son SOC dans le temps. Le DOD s'exprime donc en % de variation, comme l'illustre l'équation 3 :

$$DOD_{variation}(\%) = \Delta SOC(\%) = SOC_{max}(\%) - SOC_{min}(\%) \quad (4.2)$$

L'équation 4.2 exprime donc une différence entre le SOC minimum et le SOC maximum de l'accumulateur, lors de son fonctionnement. Il est important de comprendre ici que l'équation 4.2 du DOD met en avant un phénomène de variation dans le temps.

## L'état de santé (SOH)

Cette définition du SOH est tirée de [14].

Le concept permettant de représenter l'état de santé d'une batterie est appelé "état de santé" ou SOH (de l'anglais State-of-Health). Le SOH est défini comme la capacité actuelle d'une batterie pleinement chargée en pourcentage par rapport à sa capacité initiale pleinement chargée. La définition retenue est la suivante :

$$SOH = \frac{\text{capacité actuelle stockée}(SOC = 100\%)}{\text{capacité actuelle}} = \frac{\text{capacité initiale stockée}(SOC = 100\%)}{\text{capacité actuelle}} \quad (4.3)$$

Pour représenter le SOH, on peut utiliser un facteur de référence pour indiquer la capacité totale de la batterie. La capacité utilisée peut soit, correspondre à la capacité nominale donnée par le constructeur, ou encore correspondre à la capacité totale disponible, mais limitée par le BMS (Battery Management System) de la batterie [14].

## 4.3 L'optimisation dans SURATRAM : le besoin identifié du vieillissement

### 4.3.1 SURATRAM : Une application de tournée de véhicule

Soucieux de développer le transport de marchandises en centre urbain pour que celui-ci s'intègre dans la démarche de développement social, économique et écologique des villes, le projet SURATRAM (Système Urbain et Rural Autonome de TRansport de Marchandises) innove en promouvant le transport de marchandises tout électrique et autonome, couplé aux dernières avancées de la logistique urbaine. Pour réaliser ses tournées, tout en souhaitant minimiser son impact sur l'environnement urbain en termes de pollution (atmosphérique et sonore), le projet SURATRAM promeut le déploiement d'une flotte de véhicules électriques et autonomes. Pour circuler en ville, ces véhicules devront évoluer sur le système de transport public de la ville, en suivant les bus qui s'y déplacent. Le système développé a pour but d'intégrer les flux de livraison de marchandises à destination des centres urbains, ainsi que les flux d'enlèvement de marchandises en provenance des centres urbains. Le tout en une seule application d'optimisation de transport de marchandises.

Le déploiement d'une telle application nécessite le développement de deux briques logicielles distinctes, ayant chacune un rôle donné.

La première brique identifiée est dédiée à la résolution du problème d'optimisation de tournée de véhicule (ou Vehicule Routing Problem VRP). Dans cette application, la méthode d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) est mise en place pour résoudre le problème du VRP. Le choix de mettre en place un algorithme de métaheuristique réside principalement dans le besoin de dynamique explicité par la deuxième brique logicielle, largement décrite dans le chapitre 3. L'application de VRP mise au point pour ce projet doit être en mesure de répondre à deux contraintes majeures.

Les véhicules du projet SURATRAM, bien qu'évoluant sur les voies du système de transport public dédié au bus, une partie non négligeable de ces voies sont communes au système routier. Dans ce contexte, la première contrainte rencontrée consiste à pouvoir faire face aux aléas du système routier, comme la congestion du trafic (peu importe la cause). Ces aléas sont sources de dégradation de la qualité d'un système de livraison de marchandises, pouvant avoir un impact de léger à modéré, pouvant également aller jusqu'à partiellement et/ou totalement bloquant. Ces impacts se font alors ressentir sur des critères comme le temps de trajet passé à l'arrêt, le temps de trajet total ou encore la distance totale parcourue par le véhicule.

La deuxième contrainte se rapporte, quant à elle, directement au type de véhicule utilisé dans la tâche de tournée de véhicule pour la livraison et l'enlèvement de marchandises. Le projet SURATRAM souhaitant promouvoir l'utilisation de véhicules électriques, de par ces aspects avantageux, financier et écologique, il est alors nécessaire de se pencher sur l'adaptation du VRP à destination des véhicules électriques, pour que celui-ci intègre au mieux l'ensemble des caractéristiques propres à ces véhicules. En conséquence, la tâche d'optimisation de tournée de véhicule devra être approchée selon la méthode d' "Electrical VRP" (EVRP). Ainsi, tout au long de ce chapitre 4, sera abordée la mise en œuvre du problème de tournée de véhicule électrique (EVRP), basée sur l'exploitation d'une fonction multi-objectifs permettant de tenir compte des aléas du système routier.

La deuxième brique logicielle, qui sera présentée tout au long de ce chapitre 4, est, elle, dédiée au besoin de dynamique dans l'application de tournée de véhicule (VRP). Ce besoin de dynamique se concentre sur deux aspects de l'algorithme de VRP. Dans un premier temps, le besoin de dynamique du problème de tournée de véhicule s'intéresse au système en charge de la livraison des marchandises. Au sein d'une application de VRP, l'état du trafic et son évolution est la source de dégradation des performances du système. En effet, bien que le trafic puisse être prédit (si suffisamment de données sont à disposition), il est soumis à des aléas qui eux ne le sont pas. Pour cela, afin de minimiser l'impact des aléas stochastiques sur la performance du système, il est nécessaire que chaque véhicule puissent modifier à un instant donné son itinéraire jusqu'à son prochain point de livraison. Dans un deuxième temps, le besoin de dynamique du problème de tournée de véhicule s'intéresse lui au système en charge de l'enlèvement des marchandises. Notre système est capable de gérer la livraison de marchandises, grâce à une application d'optimisation de tournée, il doit aussi pouvoir gérer leur enlèvement. Cet enlèvement étant dynamique, les marchandises peuvent apparaître à tout instant pour être récupérées par un véhicule. Ainsi, une fois le ou les véhicules identifiés devant récupérer la marchandise, il faut que chacun d'eux puisse modifier son itinéraire, pour intégrer le point d'enlèvement à la tournée.

### 4.3.2 Pour une tournée de véhicule électrique adaptée aux aléas du trafic

Le projet SURATRAM, bien qu'intégrant la prise en charge des flux de marchandises en provenance de l'espace urbain et à destination des centres de distributions urbains (CDU), dans le but de promouvoir le développement de la vente en ligne des commerçants locaux, le système d'optimisation de tournée de véhicule est avant tout taillé pour s'adapter aux aléas du système routier, lui-même exploité par des véhicules électriques. L'objectif ici est de se rapprocher des consommateurs quant à la problématique de la livraison de leur marchandise. Le projet SURATRAM n'en est pas encore à pouvoir annoncer une fenêtre de temps aux consommateurs pour effectuer une livraison. Cependant, la prise en compte des aléas du trafic, dans le processus d'optimisation, a pour but de garantir l'ensemble des livraisons du jour, qui ont été annoncées aux clients concernés. De plus, outre la satisfaction du client, un tel système a pour but de rendre les commerçants locaux plus attractifs aux yeux des consommateurs, pour que ceux-ci puissent être considérés comme solution

de choix viable, comparé aux géants du marché, tel qu'Amazon. Concernant la question du véhicule électrique, son utilisation est encouragée de par les avantages sur le plan économique et écologique. Pour les villes et les particuliers. Le véhicule électrique représente donc une amélioration de la qualité de vie en termes de pollution (sonore et atmosphérique). Pour l'acteur privé en charge du système, le véhicule électrique représente principalement un atout économique. Ils sont, certes, actuellement plus chers à l'achat (mais ce qui est de moins en moins vrai, de par la chute des prix des batteries et les aides de l'état à l'achat), néanmoins ils sont très peu chers à faire rouler et le coût de leur entretien est insignifiant, comparé aux véhicules thermiques (en ne considérant qu'uniquement la phase d'exploitation dans la vie du véhicule). De plus, ils sont sources de bonne image de marque, de la part des consommateurs ainsi que des partenaires publics. Pour toutes ces raisons, les applications de VRP, dans le cadre d'une démarche de développement social, économique et écologique des villes, doivent intégrer l'adaptation aux aléas du trafic et l'utilisation de véhicules électriques dans leur réalisation.

### 4.3.3 Pour une bonne intégration du véhicule électrique

Nous l'avons vu précédemment, l'utilisation de véhicule électrique revêt une importance notable dans le développement social et économique des villes, pour promouvoir les commerçants de proximité comme alternative possible aux géants du marché. De même, nous l'avons vu, l'utilisation de véhicules électriques au sein d'une application de VRP est couverte par le domaine de l'Electrical VRP (EVRP).

En analysant l'EVRP, de par les sources à disposition dans la littérature scientifique, on comprend que l'EVRP est caractérisé par la considération d'une faible capacité énergétique des batteries de véhicule. Dans ce contexte, la méthode mise en avant pour y remédier, consiste à dérouter régulièrement le véhicule vers des points de recharge, le long de l'itinéraire de la tournée. Ceci fait, le véhicule peut être rechargé en énergie, partiellement ou totalement, pour finir ses livraisons. Cette considération du véhicule électrique, et plus particulièrement de sa batterie, traduit un comportement de mimétisme de celle-ci vis-à-vis des réservoirs des voitures thermique. Ainsi, bon nombre de ces études ont montré des résultats probants quant à l'utilisation de véhicule électrique pour des applications de VRP. Néanmoins, cette considération de la batterie en tant que réservoir, que l'on peut vider et remplir en fonction des besoins, est fondamentalement erronée. Nous l'avons mis en avant, toute batterie/accumulateur de véhicule électrique basée sur la technologie lithium est soumise à un phénomène de dégradation interne. Ce phénomène de dégradation étant, non pas fonction du temps, mais fonction de l'usage fait de celle-ci. Considérer une batterie comme un réservoir que l'on peut vider et remplir à sa guise n'a pour effet que d'amplifier le phénomène de dégradation interne, impliquant un vieillissement prématuré de cette dernière.

À cet égard, il convient de définir un "bon" usage ou une "bonne" mise en pratique du véhicule électrique, dans notre cas, au sein d'une application de tournée. Dans ce contexte, définir une "bonne" mise en pratique du véhicule électrique, implique de chercher à minimiser l'implication des causes liées au phénomène de vieillissement interne de la batterie, tout en cherchant à maximiser l'utilisation du véhicule. Comme mentionné dans le paragraphe précédent, la mise en pratique d'un algorithme d'EVRP est établie pour faire face aux aléas du système routier des zones urbaines. Néanmoins, dans cet objectif d'apporter une "bonne" utilisation d'un véhicule électrique ou dit autrement, de minimiser l'impact du vieillissement des batteries, l'EVRP va ici nous faire double emploi. Il doit également aider au dimensionnement de la batterie, en établissant un chemin ou itinéraire type que sera amené à parcourir un véhicule du système de livraison de marchandises. Concernant la méthode qui est décrite dans ce chapitre, le dimensionnement d'une batterie, au plus près de son usage type sur le terrain, est la base de cette approche ayant pour but de minimiser le phénomène de vieillissement d'une batterie lithium. De plus, outre un dimensionnement adapté, nous verrons comment la méthodologie décrite intègre un "bon" usage du véhicule électrique pour, toujours, minimiser le vieillissement de la batterie.

## 4.4 Tournée de véhicule électrique et vieillissement : fondement du dimensionnement

### 4.4.1 Introduction

Le projet SURATRAM vise le développement d'un nouveau système de transport de marchandises en zone urbaine. Ce nouveau système a pour mission de livrer des marchandises depuis le centre de distribution urbain (CDU) vers les points de livraison urbains (arrêt de bus), de même que d'enlever des marchandises situées sur ces points de livraison urbains (arrêts de bus), à destination du CDU [104]. Dans cette optique, pour assurer le transport de marchandises, le système se base sur l'utilisation de véhicules électriques et autonomes. Ainsi, pour se déplacer dans l'aire urbaine, ces véhicules empruntent le réseau du système de transport public de la ville. Le réseau étant composé de voies de bus dédiées ainsi que de sections de route du réseau routier.

Comme introduit dans le chapitre 4.3, une part du travail mené dans cette partie est d'intégrer le phénomène de dégradation interne des batteries dans le travail d'optimisation qui est ici développé. L'objectif derrière cette étude, tenant compte de ce phénomène, est d'intégrer un changement de paradigme quant à la mise en place et à l'utilisation d'un véhicule électrique dans une application de tournée de véhicule (VRP). Le véhicule électrique, de par la nature chimique des cellules composant sa batterie, ne peut être considéré et utilisé de la même manière qu'un véhicule thermique. Ce point a été introduit précédemment, le phénomène de dégradation interne est fonction de l'utilisation qui est faite de la batterie. Ainsi, par "utilisé", on entend la stratégie selon laquelle la batterie du véhicule va être déchargée, ainsi que la stratégie selon laquelle la batterie du véhicule va être chargée. De par ce phénomène de dégradation, les performances de la batterie sont donc amenées à diminuer au cours de la vie de la batterie, et si aucune mesure n'est prise pour contrer cela, l'autonomie et la puissance de cette dernière sont amenées à drastiquement diminuer. Pour cela, dans la volonté de répondre au problème du vieillissement, nous nous proposons d'étudier l'influence de la profondeur de décharge (DOD) de ces dernières. Pour mener cette étude à bien, des données de roulage en conditions réelles, provenant des bus du réseau du système de transport public, sont considérées. De même, qu'une base de données en open-access, sur le vieillissement des cellules des batteries qui sont mises en jeu. À notre connaissance et en l'état de la littérature scientifique, le vieillissement comme critère d'optimisation dans le problème de tournée de véhicule, ainsi que la considération intrinsèquement différente des batteries de véhicule électrique, n'a jamais été pris en compte dans le cas de l'EVRP, ce qui représente une originalité de cette thèse..

L'étude qui est ici menée porte sur la livraison de colis, selon l'approche du dernier kilomètre, dans le cas de la ville de Belfort. Pour cette étude, est considérée une flotte de véhicules électriques et autonomes. Ainsi, c'est le réseau du système de transport public de la ville de Belfort qui est utilisé comme support des vecteurs de déplacement desdits véhicules. Enfin, l'ensemble des véhicules de la flotte sont considérés correspondre à des Tesla Model S 90D (2017) en mode autonome. Notre choix s'est porté sur ce véhicule, car, comme nous le verrons plus tard, les données utilisées pour déterminer le vieillissement des batteries ont été générées avec des cellules de Tesla. De plus, de par son grand volume intérieur total ( $\approx 5$  mètre cube), ce véhicule à un volume de transport parfaitement adapté à la livraison de dernier kilomètre.

Cette étude aspire à optimiser la livraison des marchandises, en développant une stratégie de livraison adaptée à l'environnement et intégrant le vieillissement des batteries des véhicules électriques pour un dimensionnement adéquat des véhicules composant la flotte. Dans cette optique, le pendant énergétique du système se verra particulièrement optimisé. En effet, le système étudié mettant en œuvre des véhicules électriques et autonomes, les seuls secteurs de dépenses économiques sont le coût à l'achat du véhicule et sa consommation énergétique tout au long de sa durée de vie. De plus, les coûts d'entretien d'un véhicule électrique sont considérés comme insignifiants pour une structure spécialisée dans le transport de marchandises. Cependant, le vieillissement impliquant une dégradation accélérée des batteries, leur durée de vie diminue, nécessitant un remplacement (rachat) total ou partiel de la batterie. On comprend donc que le vieillissement est également une composante majeure du coût économique d'un tel système.

Par conséquent, ce travail de recherche se veut être une nouvelle contribution du domaine de l'EVRP, dans l'objectif d'intégrer le vieillissement de la batterie, dans le déploiement de véhicule électrique. Pour mener à bien ces travaux, un modèle de vieillissement basé sur le DOD, définissant les stratégies de charge/décharge du véhicule, sera utilisé. Il permettra de dimensionner la batterie et ensuite de calculer le coût financier tenant compte du phénomène de dégradation. Enfin, une fois ce travail de dimensionnement de véhicule validé, ce projet de recherche ouvrira la voie au dimensionnement d'une flotte tout entière.

## 4.4.2 Quel environnement pour l'application d'optimisation ?

### 4.4.2.1 Construction de l'environnement de test

Mener à bien cette étude implique de représenter le plus fidèlement possible l'environnement considéré, dans notre cas, le réseau du système de transport public de la ville de Belfort, ainsi que ses différentes caractéristiques physiques qui nous intéressent (distance, temps et énergie).

Pour cela, le réseau du système de transport public de la ville de Belfort (France), qui est utilisé comme support des vecteurs de déplacement de nos véhicules électriques et autonomes, est représenté sous la forme d'un graphe. Ce graphe, réplique exacte de notre environnement en termes de réseau d'échanges et en tant que base de données des grandeurs physiques en jeu, est composé de nœuds et d'arcs. Dans ce graphe, chaque nœud représente un arrêt de bus du réseau du système de transport public et chaque arc représente un tronçon du réseau routier, reliant deux arrêts de bus entre eux. Devant être une image fidèle de l'environnement réel, chaque arc est composé des grandeurs physiques du tronçon de route qu'il représente. On retrouve donc, la distance (km), le temps de parcours (s) et l'énergie consommée (w/h) pour se déplacer entre les deux extrémités du tronçon donné (aka, deux arrêts de bus).

Établir une telle base de données, recueillant l'ensemble des informations de distance, temps et énergie, a été un travail de longue haleine. Dans un premier temps, un projet de laboratoire a été mené avec un étudiant du département informatique de l'UTBM, le laboratoire CIAD et le laboratoire Femto-ST, pour développer un datalogger, connecté au bus CAN d'un véhicule électrique.

Le but visé était de circuler avec un véhicule électrique sur les voies du système de transport public de la ville de Belfort, pour enregistrer l'ensemble des informations correspondant aux trajets réalisés. Grâce au datalogger, il était possible d'enregistrer l'ensemble des trames CAN émises par le véhicule, ainsi que les informations renvoyées par l'antenne GPS du datalogger. Suite à la récupération de ces données, un prétraitement était effectué, servant notamment au calcul de données telles que la pente, la vitesse ou encore la position et la mise en place de l'horodatage des données. Cette étape permettait également de réaliser un filtrage des aberrations rencontrées. Enfin, la dernière partie consistait à enregistrer les données filtrées sur la carte SD du module électronique.

Les premiers tests effectués, sur le site du techn'hom de Belfort, ont pu montrer des résultats très satisfaisants, notamment avec l'intégration du filtrage des données mesurées, permettant de grandement améliorer la qualité du rendu du chemin parcouru. On peut prendre pour exemple les deux illustrations ci-dessous :

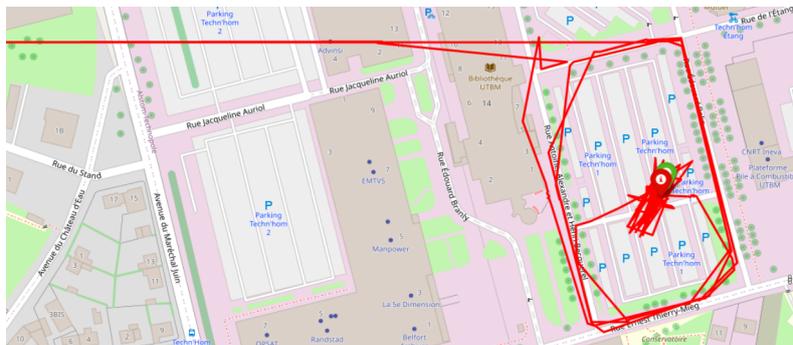


FIGURE 4.4 – Datalogger : Trajet non filtré



FIGURE 4.5 – Datalogger : Trajet filtré

L'enregistrement des données en provenance du réseau CAN du véhicule nous permettait ainsi de récupérer les informations de distance parcourue et de temps de trajet. De plus, couplé à l'enregistrement des données fournies par l'antenne GPS du datalogger, nous disposions des données GPS caractérisant chaque point de mesure : longitude, latitude et élévation. Enfin, en combinant l'ensemble de ces informations recueillies et en les filtrant, nous étions capables de recréer une base de données représentant fidèlement le réseau du système de transport public de la ville de Belfort.

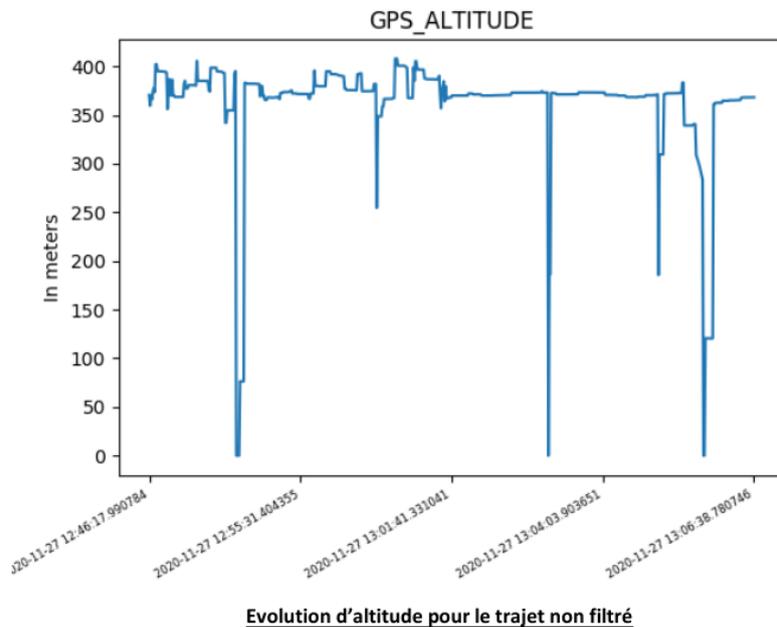


FIGURE 4.6 – Datalogger : Altitude non filtrée

Problème étant que la suite du projet a mené à l'abandon de cette solution. Ce projet a été mené en amont de l'arrivée du véhicule électrique, robotisé par FAAR Pronergy, à l'UTBM. Véhicule devant servir pour la phase expérimentale dans le chapitre 5. Ainsi, pendant plus de six mois, le projet de datalogger a été développé sur la base d'un véhicule thermique qu'un membre du laboratoire Femto-ST mettait à notre disposition. Le datalogger avait été choisi pour sa compatibilité native avec les véhicules thermiques et les véhicules électriques. Néanmoins, lors du portage du projet sur le nouveau véhicule électrique, il s'est avéré que le datalogger n'était pas compatible avec les véhicules électriques. C'est suite à des échanges avec le fabricant, incapable de nous fournir un support pour pallier à la situation, que nous avons été contraints de trouver une autre solution pour récupérer nos informations.

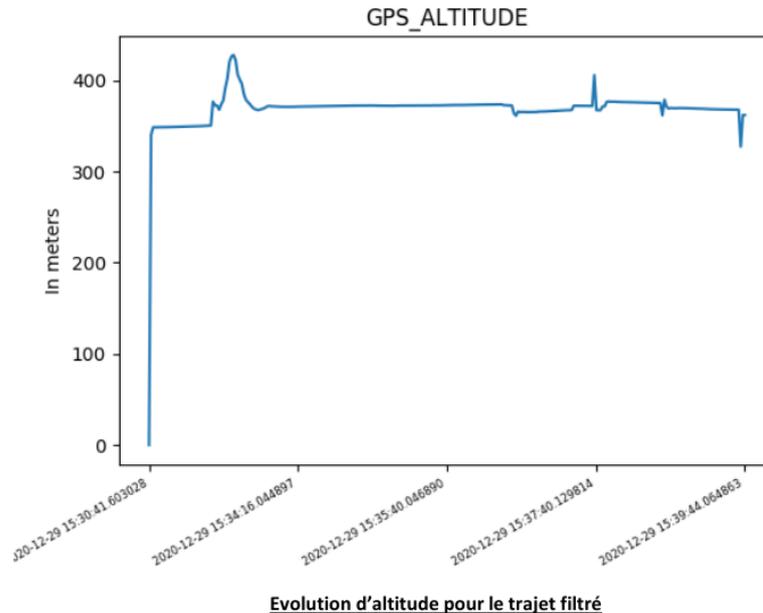


FIGURE 4.7 – Datalogger : Altitude filtrée

En parallèle du développement de notre datalogger, des discussions avaient été engagées avec la Régie des Transports du Territoire de Belfort (RTTB). La RTTB est la société qui gère et exploite l'ensemble des bus du système de transport public de la ville de Belfort. Leur participation au projet était pour nous un atout précieux, car chacun des bus de leur flotte est équipé d'un système "datalogger" semblable à celui-ci que nous étions en train de développer. De plus, la RTTB dispose de plus de dix ans d'antériorité sur les données de déplacement des bus sur le système de transport public. À la suite de nos échanges, ces derniers ont convenu, au travers d'un accord de confidentialité avec le laboratoire Femto-ST, de nous céder leurs données pour que nous puissions les exploiter, dans l'objectif de créer notre base de données.

Pour une première approche, nous nous sommes contentés des données sur une période d'une journée. Les données de la RTTB sont des fichiers stockant les données GPS de tous les points successifs formant le chemin d'un bus le long de sa ligne, pour une journée donnée. Dans ces fichiers, chaque ligne représente les informations GPS d'un point. Une nouvelle ligne étant échantillonnée toutes les 30 secondes.

Partant de ces données, nous étions capables de calculer les paramètres de distance et de temps de tout arc donné, entre deux arrêts de bus, sur le système de transport public de Belfort. Pour cela, il nous fallait dans un premier temps extraire l'ensemble des points GPS qui correspondent à l'arc sur lequel nous souhaitions travailler. Concernant le paramètre de temps, image du temps de trajet entre les deux arrêts de bus, il nous suffisait de comparer l'horodatage des points GPS des deux arrêts de bus, étant chacun une extrémité de l'arc. Enfin, le paramètre de distance était le plus compliqué des deux à déterminer. La méthode permettant de calculer la distance entre deux points GPS fait intervenir la formule de l'ellipsoïde WGS84. Cette formule se base sur les informations GPS de l'ensemble des points qui constituent la trace GPS sur un arc donné. En utilisant les paramètres de longitude, latitude et élévation de chacun des points GPS de la trace, la formule de l'ellipsoïde WGS84 permet de calculer une distance, exprimée en km. Enfin, concernant le paramètre d'énergie correspondant à l'énergie nécessaire au déplacement entre deux points donnés, c'est le modèle énergétique qui va nous permettre de calculer ce paramètre.

#### 4.4.2.2 Modèle énergétique

Le calcul du paramètre d'énergie, qui correspond à l'énergie consommée entre deux points GPS donnés, ne peut être déterminé qu'au travers d'un modèle énergétique. Ainsi, l'énergie nécessaire au déplacement, le long d'un arc donné du graphe, est calculée en utilisant le principe fondamental de la dynamique, appliquée au véhicule illustré sur la figure 4.8. Connaissant les caractéristiques du véhicule et son profil de vitesse sur l'arc parcouru, ainsi que la puissance mécanique aux roues  $P_{machines}$  nécessaire à son déplacement, à chaque instant, peut être déterminée par l'équation 4.4.

$$P_{wheels} = v_{veh} \left( M_v \frac{dv_{veh}}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{air} v_{veh}^2 S C_x + M_v g \sin(\alpha) + M_v g C_r \cos(\alpha) \right) \quad (4.4)$$

where :

$v_{veh}$  is the vehicle's speed in  $m.s^{-1}$ ,  
 $\alpha$  is the road grade in  $rad$ ,  
 $g$  is the acceleration of gravity in  $m.s^{-2}$ ,  
 $\rho_{air}$  is the air density at sea level at 15C,  
 $M_v$  is the vehicle's mass in  $kg$ ,  
 $C_x$  is the drag coefficient of the vehicle,  
 $S$  is the frontal area of the vehicle in  $m^2$ ,  
 $C_r$  is the rolling resistance coefficient.

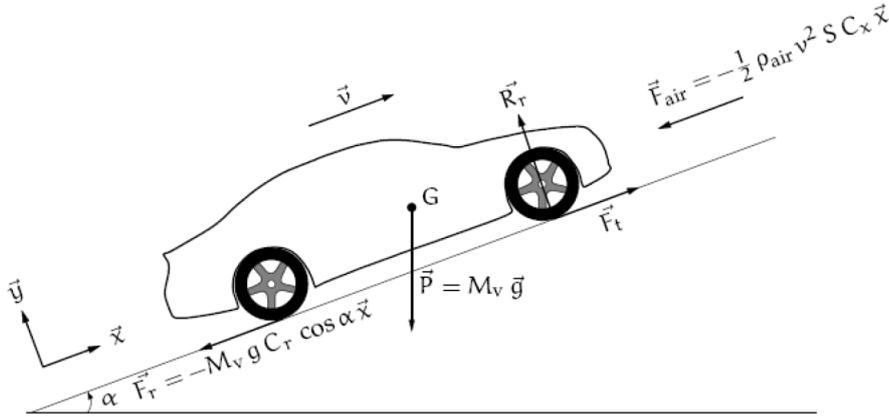


FIGURE 4.8 – Ensemble des forces appliquées à un véhicule. L'inertie des masses en rotation n'est pas prise en compte.

La vitesse du véhicule  $v_{veh}$  est déterminée à partir de la base de données GPS de la RTTB en déduisant la position du bus en fonction du temps. Compte tenu du faible taux d'échantillonnage des données GPS utilisées (un échantillon toutes les 30 secondes), seule la vitesse moyenne du véhicule est considérée sur un arc. De par le faible taux d'échantillonnage des données de la RTTB, il n'est pas possible de considérer le profil d'accélération du véhicule ou encore l'énergie récupérée au freinage, les deux sont donc considérées comme nulles.

De même, le principe fondamentale de la dynamique (PFD) intégrant la différence d'élévation sur la distance parcourue, le calcul de la pente de l'arc considéré se fait entre les points GPS des extrémités de l'arc, selon l'équation 4.5.

$$\alpha_{edge} = \arctan\left(\frac{\Delta Elevation}{Distance}\right) \quad (4.5)$$

De plus, on voit que l'équation 4.4 peut être simplifiée, ce qui donne la puissance moyenne requise par le déplacement sur un arc donné du graphe. Ensuite, pour en déduire l'énergie nécessaire au déplacement, il ne reste plus qu'à multiplier la puissance trouvée par le temps de parcours  $\Delta t$ . On trouve l'énergie nécessaire pour déplacer le véhicule le long d'un arc du graphe. Enfin, en considérant un rendement constant du groupe motopropulseur (PWT)  $\eta_{PWT}$ , l'énergie fournie par la batterie du véhicule, pour couvrir l'arc, est donnée par l'équation 4.6.

$$E_{edge} = \eta_{PWT} * P_{wheels} * \Delta t \quad (4.6)$$

Pour calculer l'énergie nécessaire au déplacement, correspondant à tous les arcs du graphe, l'équation 4.6 est utilisée, avec les paramètres du véhicule Tesla Model S 90D (2017) indiqués dans le tableau 4.1. [85].

TABLE 4.1 – Paramètres du modèle énergétique

Paramètres	Valeurs Numériques
$\rho_{air}$	$1.225 \text{ kg.m}^{-3}$
$g$	$9.81 \text{ m.s}^{-2}$
$Mv$	$2199 \text{ kg}$
$SCx$	0.56
$Cr$	0.012
$\eta_{PWT}$	0.90

#### 4.4.2.3 Batterie : état de santé et modèle de vieillissement

Le vieillissement d'une batterie est communément défini comme une perte irréversible de ses performances. L'indicateur le plus couramment utilisé est la capacité de la batterie exprimée en Ah. L'état de santé (SOH) d'une batterie est défini comme le rapport entre sa capacité restante et sa capacité initiale mesurée à l'état neuf (équation 4.7). Il est le plus souvent exprimé en pourcentage. Une batterie neuve correspond à un SOH de 100%, tandis qu'une batterie en fin de vie correspond généralement à un SOH d'environ 80%, dans le cas des voitures électriques [69].

$$SOH = \frac{\text{Capacité actuelle}}{\text{Capacité initiale}} \quad (4.7)$$

Le SOH d'une batterie peut être déterminé par mesure directe ou par modélisation. En ce qui nous concerne, une approche basée sur des données empiriques est considérée.

Pour ce faire, les données de vieillissement des batteries provenant d'une base de données en libre accès ont été utilisées : [151]. Les cellules étudiées ici sont les Panasonic B au format 18650, qui sont utilisées dans le véhicule Tesla Model S 90D (2017) déjà présenté.

En considérant un vieillissement linéaire de la batterie de 100% SOH à 80%, un modèle linéaire a été établi à partir de la base de données sur le vieillissement des cellules. Ainsi, le cycle de vie de la cellule considérée est donné pour trois DOD différents dans le tableau 4.2 : 20%, 60% et 100%. La durée de vie de chaque cellule est donnée en nombre de cycles effectués, pour un DOD donné, jusqu'à ce que le DOD atteigne une valeur de SOH de 80%. De par ce modèle, le SOH de la batterie pour chaque DOD considéré est proportionnel à l'énergie qui l'a traversée.

TABLE 4.2 – Cycle de vie de la batterie, fonction du DOD. Fin de vie atteinte à 80% de SOH

DOD(%)	100	60	20
Cycle de vie	363	1220	6595

#### 4.4.2.4 Générateur de liste de marchandises à livrer

Afin d'être cohérent avec une application réelle de livraison du dernier kilomètre, il est nécessaire de déterminer le nombre de colis déposés par point de livraison, leur taille et leur volume.

Tout d'abord, [71], [220], [188] permettent d'identifier qu'un ensemble de 1 à 6 colis est déposé sur chaque point de livraison de la tournée, en fonction de leur poids et de leur volume. Par ailleurs, la société Amazon fournit une liste exhaustive de tous les colis qu'elle est à même de traiter en fonction de leur poids et de leur volume.

TABLE 4.3 – Colis types et volumes

Colis Type	Volume ( $m^3$ )
Enveloppe Standard	
petit format	0.0003
standard format	0.0018
grand format	0.0037
Paquet Standard	
0.0397	
Paquet Surdimensionné	
petit paquet	0.1290
standard paquet	0.4320
grand paquet	2

En fonction du nombre de colis par point de livraison : [71], [220], [188] et du format de colis d'Amazon : 4.3. La liste des colis générée à livrer est définie comme étant arbitrairement composée de 50% de lettres standard, 35% de colis standard et 15% de colis surdimensionnés, représentant une livraison type en dernier kilomètre.

### 4.4.3 Intégration du vieillissement dans le processus d'optimisation

#### 4.4.3.1 Introduction

Pour rappel, le projet SURATRAM vise le développement d'un nouveau système de transport de marchandises en zone urbaine pour la livraison et l'enlèvement de marchandises. Le système exploite des véhicules électriques et autonomes pour réaliser ses tournées. Le système étant une application de livraison de dernier kilomètre, celui-ci met en jeu un centre de distribution urbain que l'on a arbitrairement choisi de situer à la gare du centre de ville de Belfort. Ce choix est tout de même guidé par la grande place disponible actuellement sur le site de la gare, qui permettrait le développement d'une telle application. En outre, la voie ferrée adjacente permettrait de délocaliser l'arrivée des transporteurs en périphérie de la ville, pour que ceux-ci n'impactent pas le système routier urbain, et d'approvisionner le CDU via les voies ferrées.

Dans ce contexte, un premier travail de recherche est mené afin d'intégrer le vieillissement des batteries de véhicule électrique au sein du processus d'optimisation de tournée de véhicule. Pour réaliser cette étude, nous nous sommes basés sur le graphe précédemment présenté. Disposant maintenant d'un environnement de test, il nous était possible de générer un ensemble de listes de marchandises devant être livrées. Situés dans le contexte de la livraison de dernier kilomètre, nous avons donc généré trois listes de marchandises à livrer, selon le modèle proposé. Ces trois listes représentent trois problèmes de tournée de véhicule dont la taille est typique pour une application de livraison de dernier kilomètre, selon [71]. Nos trois listes se composent donc respectivement de 30, 60 et 80 points de livraison, devant être réalisés lors d'une tournée de véhicule. Concernant ces points de livraison sur le graphe du système de transport public de Belfort (notre environnement), ces points ont été choisis pour être répartis aléatoirement et de manière homogène sur l'ensemble du graphe.

Dans cette expérimentation, le problème de tournée de véhicule est modélisé sous la forme d'une optimisation multi-objectifs, représentant divers compromis entre plusieurs objectifs, qui doivent tous être réalisés ensemble, ayant tous un impact plus ou moins important sur le système. Comme introduit en début de partie, le système doit être capable de s'adapter aux aléas du système routier de la ville, pouvant fortement impacter le système, ainsi qu'intégrer le phénomène de vieillissement des batteries de véhicule électrique. Par conséquent, cette expérimentation considère quatre fonctions objectifs à satisfaire : minimiser le temps de trajet d'une tournée, minimiser la distance totale parcourue lors d'une tournée, minimiser le volume disponible restant en fin de tournée et enfin minimiser l'énergie totale nécessaire pour réaliser une tournée.

Il est important de noter que minimiser le phénomène de vieillissement ne passe pas par une fonction objectif dédiée. De par le modèle de vieillissement établi, le vieillissement étant proportionnel à l'énergie ayant transitée dans les batteries, l'optimisation du vieillissement est déjà pris en compte dans la fonction objectif cherchant à minimiser l'énergie consommée. Enfin, c'est au travers des différentes stratégies de DOD utilisées que nous étudierons comment ces dernières influencent le phénomène de vieillissement des batteries du véhicule électrique.

De par la définition du problème proposé, nous souhaitons ouvrir une nouvelle variante pour le domaine de l'EVRP, intégrant le vieillissement des batteries, que l'on se propose de nommer Electric Health Vehicle Routing Problem (EHVRP).

#### 4.4.3.2 Optimisation multi-objectifs

Dans cette section, nous allons chercher à mettre en avant nos choix, quant à la modélisation de notre problème sous la forme d'une optimisation multi-objectifs. Dans sa thèse, J. Decercle [46] propose une définition des problèmes multi-objectifs : *"L'optimisation multi-objectifs est un domaine de l'optimisation qui implique plus d'une fonction à optimiser simultanément. De nombreux problèmes d'optimisation provenant de cas réels considèrent plusieurs objectifs, qui également peuvent être contradictoires entre eux. En plus d'avoir plusieurs objectifs à optimiser, l'une des principales différences entre l'optimisation mono-objectif et multi-objectifs est la définition de l'optimalité. Afin de déterminer si une solution est meilleure qu'une autre, on introduit la notion de dominance de Pareto telle que définie par Pareto en 1986, en considérant  $n$  comme le nombre de fonctions objectif :*

Une solution  $x$  domine une solution  $z$  si et seulement si  $i \in \{1, \dots, n\}$ ,  $f_i(x) < f_i(z)$  et  $i \in \{1, \dots, n\}$  tel que  $f_i(x) < f_i(z)$ .

*Si une solution n'est dominée par aucune autre, la solution est dite Pareto-optimale. L'ensemble des solutions Pareto optimales est appelé front de Pareto. Le but des algorithmes multi-objectifs est d'approcher au mieux le front de Pareto. En conséquent, les algorithmes multi-objectifs ne fournissent pas seulement une solution, mais un ensemble de solution Pareto-optimale. Il est important de noter que l'ensemble des solutions générées ne sont pas toutes Pareto-optimale et qu'il faut alors analyser et trier notre ensemble avant de sélectionner quelle solution que ce soit".*

Nous l'avons déjà dit, notre expérimentation, en plus de chercher à proposer une nouvelle variante dans le domaine de l'EVRP pour intégrer le vieillissement des batteries, et donc un usage adapté des véhicules électriques, on doit prendre en compte les contraintes du réseau routier urbain. Ces contraintes qui peuvent être nombreuses comme les travaux, les accidents, les bouchons, etc. sont à l'origine de possibles fortes dégradations de notre système de livraison. En effet, des contraintes comme les bouchons peuvent impliquer une forte dégradation du temps mis pour réaliser une tournée et pire encore, faire diminuer le nombre de colis pouvant être livrés. De plus, des travaux, comme des accidents, signifient généralement devoir emprunter une déviation de l'itinéraire de base, impliquant une dégradation du système au travers de l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus. En outre, toujours dans une approche de meilleur rendement énergétique, notre système doit minimiser le volume non utilisé, disponible pour le transport de marchandises, pour le moins possible rouler à vide. Enfin, le nombre de véhicules en circulation doit être le plus faible possible. En conséquence, et pour toutes ces raisons, notre système se doit d'intégrer une modélisation multi-objectifs du problème de tournée de véhicules.

#### 4.4.3.3 Description du problème

De par la définition du problème proposé, nous souhaitons ouvrir une nouvelle variante pour le domaine de l'EVRP. Dans le cadre de notre expérimentation, un ensemble de cinq fonctions objectifs caractérise notre problème de tournée de véhicule. Ayant la volonté d'intégrer le vieillissement dans le processus d'optimisation, l'objectif est de minimiser le phénomène de dégradation interne des batteries, menant à la mise en place de l'Electric Health Vehicle Routing Problem (EHVRP). De par le modèle de vieillissement développé, la dégradation interne des batteries est proportionnelle à la quantité d'énergie que les batteries auront pu voir transiter tout au long de leur durée de vie. Dans l'objectif de minimiser la quantité d'énergie nécessaire à la réalisation d'une tournée et donc maximiser la durée de vie de la batterie, de par la définition du principe fondamental de la dynamique, nous avons également intégré plusieurs fonctions objectifs en charge de minimiser la distance et le temps mis pour réaliser la tournée.

De plus, concernant le paramètre de temps, notre expérimentation mettant en jeu des véhicules électriques et autonomes, ces derniers n'ayant pas besoin de chauffeur, ils ne sont (pour l'instant) soumis à aucune restriction en termes de durée de tournée, contrairement aux véhicules traditionnels. Cette absence de restriction sur la durée implique qu'une tournée peut durer plus longtemps que les huit heures légales de la norme concernant les véhicules traditionnels.

Enfin, fait peut être contre intuitif, nous avons cherché à maximiser la quantité de marchandises transportées. Le véhicule aura certes une forte masse au début de sa tournée, mais cette dernière va diminuer tout au long de du trajet. De plus, maximiser le chargement du véhicule permet de faire d'une pierre deux coups. Dans un premier temps, cela permet de minimiser le nombre de tournées que celui-ci, ou un autre, devra réaliser et dans un deuxième temps, le véhicule ne roule, et donc ne dépense d'énergie que pour livrer et revenir. Son temps de circulation à vide, qui impacte fortement le vieillissement, car le véhicule utilise de l'énergie juste pour se déplacer, est donc limité au strict minimum.

Pour finir, il nous faut pouvoir minimiser le nombre de véhicules nécessaires pour effectuer nos livraisons. Cette définition du problème nous permet de proposer une nouvelle variante de l'EVRP, à savoir, le Electric Health Autonomous Capacited Load Vehicle Routing Problem (EHACLVRP).

#### 4.4.3.4 Modélisation mathématique

Dans cette section, la formulation mathématique du problème multi-objectifs de la tournée de véhicules électriques et autonomes est présentée.

Concernant notre expérimentation proposant une nouvelle variante de l'EVRP, à savoir, le Electric Health Autonomous Capacited Load Vehicle Routing Problem (EHACLVRP), celle-ci peut être décrite comme suivant. Notre environnement étant représenté sous la forme d'un graphe  $G$ , constitué de nœuds  $V$  et d'arcs  $E$ , on a  $G(V,E)$ . L'ensemble des nœuds  $V$  contient tous les points de livraison possibles ( $n$ ) et le centre de distribution urbain (CDU), noté :  $V = V_r | i = 0, \dots, n$ . L'ensemble des arcs du graphe est noté  $E = V_i V_j | i, j = 0, \dots, n$ . L'ensemble des véhicules de livraison est noté  $V_e h = 1, \dots, K$ , ayant tous une capacité volumique interne, noté  $Q$ . L'ensemble  $N$  contenant tous les arcs d'une tournée de véhicule.

Exploitant un problème de livraison de dernier kilomètre, les colis sont majoritairement peu lourds ( $< 100kg$ ). C'est leur volume qui va limiter leur nombre dans un véhicule. Ainsi, la demande de chaque client en termes de volume de marchandises à livrer peut être exprimée suivant :  $G = g_i | g_i \geq 0, i = 0, \dots, n$ , où  $g_i$  est la demande en volume à livrer sur le nœud  $i$ . De plus, comparer la demande  $g_i$  avec la capacité volumique  $Q$ , on obtient l'ensemble  $V : V_o = V_o | g_o = 0, V_s = v_i | 0 < g_i \leq Q, V_L = v_i | g_i > Q$ , où  $V_o$  est le CDU,  $V_s$  l'ensemble des livraisons avec une demande inférieure à la capacité volumique restante du véhicule et  $V_L$ , l'ensemble des livraisons avec une demande supérieure à la capacité volumique restante du véhicule. Un  $V_L$  dans notre cas va occuper le volume à disposition et donc remplir le véhicule. La demande de chaque client en termes de volume de marchandises à livrer ne peut excéder la capacité volumique  $Q$  du véhicule.

Dans le contexte d'un EVRP, pouvoir estimer sa consommation d'énergie est primordial, ainsi, la consommation  $NRJ = n_{ij}|n_{ij} > 0, i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, n$ . De plus, il faut prendre en compte que la consommation énergétique de la voiture pour réaliser sa tournée ne peut excéder la capacité énergétique du véhicule  $C_i$ . Enfin, l'intervalle de capacité utilisable de la batterie (SOC) étant fixé par la stratégie de DOD utilisé, la consommation d'énergie de l'itinéraire ne peut dépasser ses bornes.

La distance totale que le véhicule va être amené à réaliser lors de sa tournée :  $D = \sum d_{ij}|d_{ij} > 0, i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, n$ .

Le temps total que le véhicule va être amené à réaliser lors de sa tournée :  $T = \sum t_{ij}|t_{ij} > 0, i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, n$ .

Le véhicule de transport commence et finit sa tournée à son CDU et  $W_{ik} = 1$  si le véhicule est affecté à un et un seul CDU.

$C_{ij}$  correspond à la distance entre le nœud  $i$  et le nœud  $j$ .

$x_{ij} = 1$ , implique que le véhicule  $K$  quitte le nœud  $i$  pour se rendre au nœud  $j$ , 0 autrement..  
 $x_{ij}$  app  $0,1$ .

Nous définissons les ensembles et paramètres suivants, permettant de décrire le modèle mathématique.

TABLE 4.4 – Ensembles

Ensembles	Description
V	Ensemble des noeuds du graphe G
E	Ensemble des arcs du graphe G
$V_{eh}$	Ensemble des véhicules de livraison
N	Ensemble des arcs appartenant à une tournée

TABLE 4.5 – Paramètres

Paramètres	Type	Description
Q	Réel positif	capacité volumique
$g_i$	Réel positif	capacité demandée
$x_{ij}^k$	entier positif	1 si véhicule $k$ quitte $i$ pour $j$ , sinon 0
$d_{ij}$	Réel positif	distance entre noeud $i,j$
$t_{ij}$	Réel positif	temps entre noeud $i,j$
$n_{ij}$	Réel positif	énergie entre noeud $i,j$
$W_i$	entier positif	1 si véhicule $k$ est affecté à un CDU, sinon 0
$C_k$	Réel positif	capacité énergétique d'une batterie

Notre problème est résumé sous le modèle mathématique suivant :

$$\min |Veh| \quad (4.8)$$

$$\min \sum_{k \in Veh} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} * x_{ij}^k \quad (4.9)$$

$$\min \sum_{k \in Veh} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} t_{ij} * x_{ij}^k \quad (4.10)$$

$$\min \sum_{k \in Veh} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} n_{ij} * x_{ij}^k \quad (4.11)$$

$$\min \sum_{k \in Veh} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} q_{ij} * x_{ij}^k \quad (4.12)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ji}^k = \sum_{j \in V} x_{ij}^k = \sum_{i \in V} W_i^k \quad (4.13)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ih}^k - \sum_{j \in V} x_{hi}^k = 0, h \in V \setminus V_0, k \in Veh \quad (4.14)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij}^k = 1, \forall i \in V \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in N} g_i \leq Q \quad (4.16)$$

$$\sum_{i,j \in V} n_{ij} \leq C_k, DOD_{low} \leq C_k \leq DOD_{high} \quad (4.17)$$

Où la formule 4.8 est la première fonction objectif permettant de minimiser le nombre de véhicules de livraison  $K = Veh$ . La formule 4.9 a pour objectif de minimiser la distance totale nécessaire pour réaliser la tournée. La formule 4.10 a pour objectif de minimiser le temps total nécessaire pour réaliser la tournée. La formule 4.11 a pour objectif de minimiser l'énergie totale nécessaire pour réaliser la tournée et la où formule 4.12 a pour objectif de maximiser le volume total transportable lors d'une tournée.

Concernant les paramètres du modèle mathématique, la formule 4.13 permet de s'assurer que tout véhicule démarre sa tournée depuis le centre de distribution urbain (CDU) qui lui est attribué et, après avoir fini sa tournée, rentre dans ce même CDU. La formule 4.14 traduit la conservation de contrainte. Pour tout véhicule qui entre dans un arrêt de bus (noeud), il est obligé d'en sortir. La formule 4.15 implique qu'un point de livraison ne peut être visité qu'une seule et une seule fois. La formule 4.16 implique que la quantité volumique totale transportée ne peut excéder celle du véhicule de livraison. La formule 4.17 traduit que la quantité d'énergie totale consommée pour réaliser une tournée ne peut pas dépasser la capacité énergétique de la batterie d'un véhicule de livraison. De plus, la capacité énergétique d'un véhicule de livraison est bornée par les intervalles sûretés, imposés par la stratégie de DOD utilisé.

#### 4.4.3.5 Méthode de résolution

Dans cette section est présentée la méthode de résolution mise en œuvre dans le cas de notre problème de tournée de véhicule multi-objectifs.

Notre expérimentation mettant un problème de tournée de véhicule électrique (EVRP) multi-objectifs, basé sur un graphe, nous exploitons ce dernier à l'aide de l'outil d'optimisation par colonie de fourmis, précédemment décrit dans le CHAP3. Les colonies de fourmis étant partie prenante de notre système de livraison et d'enlèvement dynamique, cette dynamique repose sur la matrice de phéromone que les fourmis établissent pour tous problèmes, lors des premières explorations pour la recherche de solution, dans l'application d'EVRP. Le modèle ACO implémenté est le même que dans le chapitre 3.

La seule différence notable qu'il est important de préciser concerne la méthode de calcul des phéromones que les fourmis déposent lors de leur exploration de l'environnement. Comme dit, notre problème de tournée de véhicule étant un problème d'optimisation multi-objectifs, il nous faut modifier l'équation permettant de calculer le taux de phéromone que les fourmis déposent pour intégrer la contrainte multi-objectifs.

La modélisation multi-objectifs réalisée pour résoudre notre problème de tournée de véhicule prend la forme d'une équation mathématique sommant les différents poids d'un arc devant être optimisés, chaque poids étant au préalable pondéré par un facteur, traduisant l'importance du poids sur l'arc donné. Notre optimisation multi-objectifs est décrite selon l'équation mathématique suivante :

$$F(x) = (A*fc1) + (B*fc2) + (C*fc3) + (D*fc4)$$

A étant la consommation énergétique réalisée avec un facteur de 0.5. B le volume restant à minimiser en début de tournée avec un facteur à 0.3. C, la distance totale parcourue avec un facteur à 0.1. D, le temps total nécessaire avec un facteur à 0.1.

L'ensemble des facteurs appliqués à nos poids ont été choisis de par la définition même du projet. L'objectif principal étant de minimiser l'impact du vieillissement sur les batteries, c'est tout naturellement que son facteur a été défini comme le plus important de l'équation. Ensuite, étant une application de livraison, l'optimisation du volume pour garantir un rendement le plus haut possible constitue le deuxième point le plus important de notre système. Viennent ensuite la distance et le temps. Le système devant s'adapter aux aléas du système, pouvant donner lieu à des optimisations contradictoires, leur facteur respectif a été fixé comme identique.

#### 4.4.4 Optimisation : base du dimensionnement

##### 4.4.4.1 Quelle stratégie pour le DOD ?

Aujourd'hui, différentes technologies pour la recharge d'une batterie de véhicule sont disponibles. Une charge lente, réalisée avec des chargeurs < 7kW, permet de recharger une batterie entre 6 à 8 heures. Une charge rapide, réalisée en 1 à 2 heures, utilise des chargeurs d'une puissance allant de 11 à 43 kW. Enfin, un super chargeur, d'une puissance de 50 à 250 kW, permet de recharger une batterie de Tesla model S 90D en 45 minutes, tout au plus.

Cependant, encore une fois, il faut tenir compte de l'utilisation qui est faite de la batterie, concernant son vieillissement. En l'occurrence, dans le cadre de la recharge, il faut tenir compte du fait que chaque type de recharge (lente, rapide, accélérée) a un impact différent sur le vieillissement de la batterie [4]. Ainsi, la capacité d'une batterie va se dégrader plus rapidement avec une recharge rapide ou accélérée, pour arriver en dessous du seuil des 80% de sa valeur de capacité initiale. Dans le secteur de l'automobile, ce seuil est la limite pour définir la fin de la première vie d'une batterie de véhicule. Obligeant à remplacer la batterie, ou pire encore, à changer le véhicule lui-même. On comprend donc que certes, la technologie de recharge utilisée a un fort impact sur le vieillissement des batteries, mais plus encore dans le cadre d'une application de livraison de marchandises. Les véhicules étant chaque jour amenés à parcourir de grandes distances, ils sont donc plus fréquemment amenés à être rechargés.

Par ailleurs, la section 4.4.4.2 explique la démarche de dimensionnement d'une batterie pour maximiser sa durée de vie. Un véhicule est donc conçu pour utiliser au mieux une plage de capacité donnée, en fonction de la stratégie du DOD, pour effectuer sa tournée, qui varie entre 5h et 18h. Une fois la tournée terminée, le véhicule dispose de toute la nuit pour se recharger, c'est-à-dire entre 6h et 19h, ce qui permet de considérer privilégier l'utilisation d'une charge lente. Dans ce contexte, nous considérons que pour notre expérimentation, les véhicules disposant d'un temps de recharge suffisamment long, utilisent une charge lente et que donc, sur l'intervalle de DOD qui leur est attribué, ils effectueront un cycle de charge/décharge par jour.

Par ailleurs, selon [151], trois stratégies différentes de DOD ont été définies pour étudier l'impact du vieillissement de la batterie sur celle-ci. L'état de santé de la batterie définissant le nombre de cycles et le temps d'utilisation du véhicule, l'impact du processus de vieillissement ainsi que le nombre de colis livrés et l'impact financier du véhicule sur sa durée de vie. Les stratégies DOD suivantes sont envisagées : 100%DOD (de 100% à 0% SOC), 60%DOD (de 80% à 20% SOC), 20%DOD (de 60% à 40% SOC).

Après avoir défini les stratégies DOD à utiliser dans notre étude, il reste à dimensionner la capacité de la batterie en fonction de celles-ci.

#### 4.4.4.2 Dimensionnement de la capacité énergétique d'une batterie

Après avoir déterminé l'énergie nécessaire pour effectuer une tournée, de par notre application de EHACLVRP, il ne nous reste plus qu'à calculer la capacité énergétique de la batterie  $E_{battery}$  en fonction de la stratégie DOD utilisée. Pour cela, l'équation 4.18 est utilisée.

$$E_{battery} = E_{needed}/DOD(\%)/20\% \quad (4.18)$$

où le coefficient de 20% correspond à la perte de capacité de la batterie en fin de vie.

## 4.5 Résultats

Dans cette section, vont être présentés les résultats obtenus dans le cadre de notre expérimentation. Pour rappel, de par l'expérimentation menée, nous souhaitons proposer une nouvelle méthodologie d'intégration des véhicules électriques au sein de système de transport et plus spécifiquement, le transport de marchandises. Nous considérons que l'intégration de véhicules électriques, dans un système complexe de transport, passe par l'adaptation des codes du domaine, aux spécificités intrinsèques du véhicule électrique. Bien que le domaine de l'EVRP se soit employé à proposer différentes manières d'intégrer des véhicules électriques dans des systèmes de livraison de marchandises, à chaque fois, le véhicule électrique et plus spécifiquement sa batterie, a été assimilé à un réservoir d'énergie, au même titre qu'un réservoir d'essence.

De par les résultats qui vont être présentés. Au travers des solutions générées par l'algorithme EHACLVRP et de l'analyse de ces solutions combinées aux différentes stratégies DOD mises en œuvre, nous allons pouvoir illustrer l'importance de la prise en compte du vieillissement des batteries. Illustrer l'intégration du phénomène de dégradation interne des batteries dans le processus d'optimisation et de dimensionnement des batteries de véhicules de livraison est primordiale pour une diffusion large, et qui plus est pérenne dans le temps, de ce type de véhicule dans des applications professionnelles complexes.

### 4.5.1 Ensemble de solution

Exploitant un problème de tournée de véhicule dans le cadre d'une application de dernier kilomètre en zone urbaine, nous avons généré trois listes types de marchandises devant être livrées. Ces trois listes correspondent à une application typique de livraison en dernier kilomètre. Ainsi, pour appliquer notre algorithme EHACLVRP, nous retrouvons trois graphes, images des listes, à explorer, pour dans chacun, trouver une tournée permettant de livrer l'ensemble des marchandises.

Une fois notre algorithme d'EHACLVRP ayant exploré chacun des graphes, l'ensemble des solutions trouvées, qui ont été identifiées comme les plus pertinentes, ont été répertoriées dans le tableau 4.6.

TABLE 4.6 – Résultats pour chaque taille de graphe

Distance (km)	Énergie (kWh)	Temps (h)	Volume (m <sup>3</sup> )	Tour
Graphe 30 points				
86.6	13575	4.55	1.95	2
89.03	13798	4.70	1.97	2
89.16	13871	4.73	1.96	2
89.03	13936	4.71	1.19	2
Graphe 60 points				
157.07	24401	9.38	2.32	5
160.71	24460	9.30	2.39	5
162.86	24567	9.79	2.23	5
164.18	24920	9.41	2.20	5
Graphe 80 points				
218.29	34948	13.32	2.32	7
223.19	35525	13.53	2.39	6
224.54	36423	12.97	2.23	6
219.86	36452	13.02	2.20	6

Concernant l'analyse des résultats, pour rappel, les points d'optimisation sont classés selon l'ordre d'importance suivant : énergie, volume, distance et temps (les deux derniers étant considérés égaux). Enfin, le critère qui permettra de départager toute solution trouvée est le nombre de cycles à effectuer pour réaliser la livraison de marchandises.

Dans le cas du premier graphe exploré, constitué de 30 points de livraison de marchandises. En terme d'énergie dépensée pour réaliser la livraison et de volume restant inutilisé par des marchandises, la solution 1 et la solution 4 sont intéressantes à considérer. De plus, toutes deux ne nécessitent que deux cycles pour réaliser la tournée. Néanmoins, la solution 4 implique une consommation de plus de 360 Wh, comparée à la première. Ce qui, vis-à-vis du vieillissement sur le court terme, n'a pas un impact majeur, mais qui bout à bout sur le long terme, avec d'autres tournées surconsommant comme celle-ci, aura un impact notable. Enfin, en termes de distance et de temps pour réaliser la tournée, la solution 1 apparaît comme la plus intéressante.

Dans le cas du deuxième graphe exploré, constitué de 60 points de livraison de marchandises. De plus, toutes deux ne nécessitent que cinq cycles pour réaliser la tournée. Néanmoins, la solution 4 implique une consommation supérieure de plus de 500 Wh, comparée à la première. Ce qui, vis-à-vis du vieillissement sur le court terme, n'a pas un impact majeur, mais qui bout à bout sur le long terme, avec d'autres tournées surconsommant comme celle-ci, aura un impact notable. Enfin, en termes de distance et de temps pour réaliser la tournée, la solution 1 apparaît comme la plus intéressante. Il est intéressant de remarquer que la solution 2 pourrait être un compromis intéressant à considérer. D'un point de vue énergétique, cela n'impliquerait qu'une augmentation de 60 Wh, correspond à peine à un cinquième de la consommation de l'électronique embarqué dans le véhicule. Cependant, retenir cette solution, impliquerait de conserver le pire score, compte tenu du volume restant. C'est pourquoi la solution 2 n'est pas retenue.

Dans le cas du troisième graphe exploré, constitué de 60 points de livraison de marchandises. En terme d'énergie dépensée pour réaliser la livraison et de volume restant inutilisé par des marchandises, la solution 1 et la solution 4 sont intéressantes à considérer. De plus, toutes deux ne nécessitent pas le même nombre de cycles pour réaliser leur tournée. Avant de continuer, il est nécessaire de considérer un fait contre-intuitif concernant le nombre de tours. Grâce à la troisième ligne du tableau 4.6 des solutions du graphe à 80 points et au graphique 4.9, on observe qu'un faible nombre de tours n'est pas nécessairement lié à une faible consommation d'énergie. Ainsi, la solution ayant consommé le moins d'énergie aura donc réalisé un cycle de plus pour effectuer sa tournée. Au même titre que dans le graphe à 60 points de livraison, on peut considérer comme négligeable la différence de consommation énergétique entre la solution 1 et la solution 4, le volume de marchandises restant, étant le plus faible de toutes les solutions trouvées. Enfin, au vu de la différence de distance, de l'ordre du kilomètre, et de la différence de temps de parcours, nous faisons le choix de retenir la solution 4.

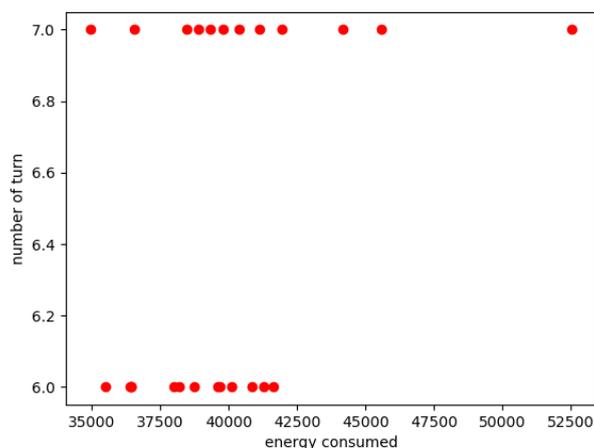


FIGURE 4.9 – EVRP : Résultats notable

Le tableau 4.7 résume les solutions précédemment retenues

TABLE 4.7 – Ensemble de résultats pour minimiser l'énergie totale consommée

Taille Graphe	Tour	Énergie (kWh)	Volume (m <sup>3</sup> )	Distance (km)	Temps (h)
30	2	13575	1.95	86.6	4.55
60	5	24401	2.32	157.07	9.38
80	7	34948	2.32	218.29	13.32

#### 4.5.2 Batterie de véhicule électrique : Quel dimensionnement ?

À partir de l'ensemble des solutions sélectionnées dans le tableau 4.7, il est possible de calculer les capacités énergétiques minimales requises pour qu'un véhicule électrique puisse terminer sa tournée, en fonction de la stratégie DOD utilisée. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.8.

TABLE 4.8 – Énergie dans la batterie en accord avec la stratégie de DOD utilisée

Points Livraisons	100% DOD	60% DOD	20% DOD
30	16.96 kWh	28.28 kWh	84.84 kWh
60	30.50 kWh	50.84 kWh	152.50 kWh
80	49.93 kWh	83.23 kWh	249.67 kWh

Ainsi, il est possible de caractériser 9 véhicules, mis en oeuvre dans 9 scénarios différents, selon trois tailles de graphe différentes. Ces 9 véhicules fournissent un ensemble qui permet d'approcher au mieux, ce à quoi devrait correspondre la batterie d'un véhicule électrique évoluant dans ce type de tournée. Cependant, quatre de ces véhicules sont mis de côté pour notre étude. Ceux dont la capacité énergétique est inférieure à 30 kWh et ceux dont la capacité énergétique est supérieure à 100 kWh.

En effet, le modèle énergétique est conçu pour calculer l'énergie nécessaire pour déplacer un véhicule de 2199 kg avec une batterie de 90 kWh. Sachant que la diminution de la capacité énergétique de la batterie est équivalente à une diminution de sa masse, notre modèle n'est plus viable pour les solutions dont la consommation est inférieure à 30 kWh et inversement pour les consommations supérieures à 100 kWh. En considérant une densité énergétique de 250 Wh/kg, réduire une batterie de 1kW revient à réduire sa masse de 4kg. La masse étant une partie importante de l'équation du modèle énergétique, il n'est pas possible d'exploiter ces résultats sans fausser notre étude.

À partir de là, il faut comprendre que les extrêmes sont amplifiés. Ainsi, pour les batteries dont la capacité énergétique est inférieure à 30 kWh, leurs capacités énergétiques réelles seront revues à la baisse et pour les batteries dont la capacité énergétique est supérieure à 100 kWh, leurs capacités énergétiques réelles seront revues à la hausse.

Enfin, concernant les véhicules retenus dans notre expérimentation et concernant l'analyse de l'impact du vieillissement sur la batterie et grâce à l'exploitation des données en libre accès [151], il a été possible de déterminer le nombre de cycles (charge/décharge) qu'un véhicule est amené à réaliser, en fonction de la stratégie de DOD considérée, comme le montre le tableau 4.9.

TABLE 4.9 – Nombre de cycle charge/décharge en fonction de la stratégie de DOD utilisé avant la fin de vie

Points Livraisons	100% DOD	60% DOD	20% DOD
30	363	1220	6595
60	363	1220	6595
80	363	1220	6595

Grâce au tableau 4.9, nous pouvons observer que, selon la stratégie DOD choisie, celle-ci a un impact majeur sur la durée de vie de la batterie. On constate que, pour un nombre de points de livraison donnée, entre une stratégie DOD de 100% et une stratégie de 20%, la durée de vie en nombre de cycles est multipliée par 18. De plus, entre une stratégie DOD de 100% et une stratégie de 60%, la durée de vie en nombre de cycles est multipliée par 3,4.

Ainsi, du fait de la stratégie DOD mise en œuvre, la durée de vie de la batterie en nombre de cycles, et donc en nombre d'années, considérant une charge/décharge par jour, est amenée à varier d'un an à plus de dix-huit ans.

### 4.5.3 Le dimensionnement : Quel impact financier ?

Ayant pu déterminer l'impact du vieillissement sur la durée de vie d'une batterie, en nombre de cycles et en nombre d'années de service. On cherche maintenant à déterminer son impact sur le coût à l'achat d'un véhicule électrique. En considérant le prix d'une batterie pour laquelle 1 kWh à une valeur de 100\$, il est possible de donner un prix à chacune des capacités énergétiques précédemment calculées, comme le montre le tableau 4.8.

TABLE 4.10 – Coût financier de la capacité énergétique en fonction de la stratégie de DOD utilisée

Points Livraisons	100% DOD	60% DOD	20% DOD
30	1697 \$	2828 \$	8484 \$
60	3050 \$	5084 \$	15251 \$
80	4994 \$	8323 \$	24968 \$

Pour les résultats suivants, ne seront présentés que ceux correspondant aux véhicules conservés dans notre expérimentation (ceux dont la capacité énergétique est supérieure à 30kWh et inférieure à 100kWh).

Selon le tableau 4.10, on peut observer que, dans un graphe constitué de 30 points de livraison et considérant une stratégie de DOD de 20%, le prix d'une batterie de véhicule équivaut à 8484 \$.

On observe que, dans un graphe constitué de 60 points de livraison et considérant une stratégie de DOD de 100%, le prix d'une batterie de véhicule équivaut à 3050 \$. Considérant une stratégie de DOD de 20%, le prix d'une batterie de véhicule équivaut à 15251 \$.

Enfin, dans un graphe constitué de 80 points de livraison et considérant une stratégie de DOD de 100%, le prix d'une batterie de véhicule équivaut à 4994 \$. Considérant une stratégie de DOD de 60%, le prix d'une batterie de véhicule équivaut à 8323 \$.

Sans surprise, surdimensionner la capacité énergétique de la batterie a un coût financier, augmentant le prix d'une batterie, allant d'un facteur 5 dans le cas du graphe de 60 points de livraison, à un facteur de 1,7 pour un graphe de 80 points de livraison.

On s'intéresse maintenant à un autre indicateur financier, traduisant la prise en compte de l'impact du vieillissement sur le coût financier, par point de livraison.

D'après le tableau 4.11, pour un graphe composé de 60 points de livraison et considérant une stratégie de DOD de 20% au lieu d'une stratégie de DOD de 100%, le coût financier par point de livraison, visité lors d'une tournée de marchandises, est divisé par un facteur de 3,6.

TABLE 4.11 – Coût financier par point de livraison

Points Livraisons	100% DOD	60% DOD	20% DOD
30	0.156 \$	0.077 \$	0.043 \$
60	0.140 \$	0.069 \$	0.039 \$
80	0.172 \$	0.085 \$	0.047 \$

Pour un graphe composé de 80 points de livraison et considérant une stratégie de DOD de 60% au lieu d'une stratégie de DOD de 100%, le coût financier par point de livraison visité, lors d'une tournée de marchandises, est divisé par un facteur de 2.

De plus, on constate que, peu importe la stratégie de DOD, l'augmentation du coût financier de la visite d'un point de livraison n'est pas linéaire. Visiter un point dans un graphe composé de 60 points de livraison est le plus rentable, considérant l'étude de la livraison en dernier kilomètre.

#### 4.5.4 Discussion

Chercher à intégrer le vieillissement des batteries de véhicule électrique dans le processus d'optimisation, permettant par la même un dimensionnement adapté du véhicule de livraison, est une démarche qui s'intègre dans une vision systémique du problème ciblé. Nous l'avons montré, dimensionner une batterie de véhicule électrique de manière adaptée, pour contrer le phénomène de dégradation interne, a un coût.

Ce coût financier, nous l'avons calculé, considérant un graphe composé de 60 points de livraison, réduire la plage de capacité énergétique utilisée, lors d'une tournée, de 100% à 20%, implique de multiplier le prix de la batterie par 5. Si maintenant on considère un graphe composé de 80 points de livraisons, réduire la plage de capacité énergétique utilisée lors d'une tournée, de 100% à 60%, implique de multiplier le prix de la batterie seulement par 1,7. Coupler ces résultats obtenus au tableau 4.11 permet de s'apercevoir que, selon l'échantillon de graphe considéré, exploiter un graphe composé de 60 points de livraison est le plus rentable, pour une application de livraison de dernier kilomètre. Enfin, nous avons pu montrer que considérer une plage de capacité énergétique réduite permettait de démultiplier la durée de vie d'un véhicule. Passant d'une plage de capacité énergétique de 100% à 20%, permettant de prolonger la durée de vie d'une batterie de véhicule électrique à plus de 18 ans.

De plus, on ne peut considérer les capacités énergétiques de batterie, inférieure à 30 kW et supérieure à 100 kW, sans fausser notre étude. Ainsi, seul le graphe composé de 60 points de livraison peut être considéré comme représentatif de l'expérimentation que nous souhaitons mener. Cependant, les résultats obtenus montrent que le dimensionnement d'un véhicule nous a également mené à dimensionner l'environnement dans lequel ces derniers sont le plus à même d'être efficaces et rentables. Enfin, pour finir ce dimensionnement de batterie de véhicule électrique dans le cadre d'une application de livraison de marchandises de dernier kilomètre, considérant un graphe composé de 60 points de livraison, intégrer le vieillissement des batteries implique certes de multiplier par 5 le prix de la batterie uniquement, mais permet d'exploiter le véhicule sur une période de 18 ans.

Cette multiplication par 18 de la durée de vie du véhicule et par 5, du prix de la batterie uniquement, revêtent un intérêt financier et écologique lors l'achat du véhicule. Il revêt aussi un intérêt concurrentiel pour les entreprises du secteur du transport de marchandises. En effet, devoir rentabiliser l'achat d'un véhicule de livraison sur une période de un à trois ans, implique de pratiquer des prix élevés pour être capables de disposer des fonds nécessaires pour racheter une batterie, ou plus souvent un véhicule, lorsque la batterie ne sera plus utilisable. Pour un prix de 50.000 euros pour un véhicule de transport de marchandises électrique, rentabiliser un tel achat sur 3 ans, implique des mensualités de 1.400 euros. Considérant maintenant rentabiliser son achat sur 18 ans, permet de réduire le prix des mensualités à 230 euros. Ces deux mensualités sont séparées d'un facteur 6 qui, dans le calcul des prix pratiqués, va permettre à une entreprise d'être concurrentielle, par rapport aux autres transporteurs du secteur.

## 4.6 Conclusion

Dans cette partie, il a tout du long été question d'interpeller sur l'intégration des véhicules électriques dans le process de livraison de marchandises. De par les caractéristiques intrinsèques des batteries de véhicule électrique, l'usage fait de ces véhicules ne peut être calqué sur celui fait des véhicules thermiques. C'est cette considération de l'usage, et les bonnes pratiques liées à cet usage, que nous avons exploré et analysé tout du long de ce chapitre de thèse.

Exploitant ici un problème de tournée de véhicule électrique (EVRP) et autonome, nous proposons l'intégration du phénomène de dégradation interne des batteries au sein d'une nouvelle variante de EVRP. Le Electric Health Autonomous Capacited Load Vehicle Routing Problem (EHACLVRP), au travers duquel est également considérée l'optimisation de la distance, du temps et du volume de marchandises transporté, caractérisant une application de livraison de marchandises de dernier kilomètre.

Pour éprouver notre démarche, nous avons développé un générateur de liste de livraison de marchandises, typique du problème de tournée de véhicule de dernier kilomètre. De par les trois listes générées, nous avons pu établir trois graphes, à leur image, basés sur le système de transport public de la ville de Belfort. Une fois un ensemble de solution généré, grâce à notre algorithme de EHACLVRP, nous avons pu mettre en place une démarche de dimensionnement pour déterminer la capacité énergétique type d'une batterie à même d'exploiter au mieux ce genre de système, tout en minimisant l'impact du vieillissement sur ces dernières.

Au travers des résultats obtenus, nous pouvons montrer que le vieillissement des batteries au lithium est un point clé pour une bonne intégration de la technologie des véhicules électriques dans le domaine du transport de marchandises, et que considérer l'importance du vieillissement amène non seulement à prolonger la durée d'un véhicule mais également à bénéficier d'un impact concurrentiel indéniable vis-à-vis des autres transporteurs du secteur, d'un point de vue écologique, d'image de marque, mais plus important encore, financier.

Nous avons pu montrer que considérer une stratégie de DOD impliquant l'utilisation d'un faible pourcentage de la plage de capacité énergétique disponible, couplé à un dimensionnement adapté au problème étudié, est la méthode à employer pour maximiser la durée de vie d'un véhicule électrique. De par les résultats obtenus, maximiser la durée de vie d'une batterie électrique au lithium permet de passer d'un remplacement tous les ans, à un remplacement tous les 18 ans. Bien entendu, cette augmentation de la capacité énergétique d'une batterie à un coût, nécessitant de multiplier par 5 uniquement le prix de la batterie. Néanmoins, cette augmentation du prix de la batterie due au dimensionnement proposé, pouvant être rentabilisé sur 18 ans, ne représente pas un impact majeur pour une entreprise de transport de marchandises.

Pour conclure, la "surconsommation" de matière première, que l'on met en avant de par notre méthode de dimensionnement de véhicule, est dans notre cas préférable pour une gestion durable et de long terme, des ressources naturelles. On peut ajouter à cela que la batterie que nous proposons de déployer se dégrade très lentement, étant donné que l'on intègre à son utilisation la minimisation du facteur de vieillissement. Cette considération a un deuxième effet positif, permettant de favoriser la seconde vie de la batterie.

Enfin, en analysant le coût énergétique par point de livraison, on remarque que l'énergie nécessaire pour visiter un point de livraison est fonction de la taille du graphe étudié. Cet élément ouvre la voie à des travaux de recherche futurs concernant le dimensionnement d'une flotte de véhicules électriques et autonomes de capacité énergétique hétérogène.

## Chapitre 5

# Simulateur de réalité mixte : vers la virtualisation des tests en conditions réelles

### 5.1 Introduction

Les véhicules de fret électriques ont été à l'avant-garde de la lutte contre le changement climatique, en raison de la production excessive de Co2 et de particule fine. C'est dans un environnement urbain que l'électrification est la plus judicieuse pour les courts trajets domicile-travail, où le moteur à combustion est le plus inefficace. La plupart des villes ont des voies dédiées pour les transports publics qui couvrent l'ensemble de l'aire urbaine. Les gros véhicules de transport de marchandises, qui ne sont pas agiles sur les routes étroites des villes, peuvent utiliser ces voies pour réduire la congestion du trafic. Programmer une flotte de robots autonomes, pour suivre les entités de transport public existantes sur ces voies moins fréquentées en utilisant le platooning (conduite en convoi), est un concept qui peut s'avérer avantageux. Cependant, les véhicules autonomes nécessitent des tests approfondis et les outils de simulation actuels ne peuvent pas reproduire les conditions réelles avec une précision suffisante et ne tiennent pas compte de scénarios critiques ou complexes. D'autre part, les essais sur route sont soit interdits, soit extrêmement limités par la loi dans la plupart des pays et réduits aux essais sur autoroute. Pour résoudre les problèmes liés aux essais de véhicules autonomes, nous proposons de développer une solution de test, du type Vehicle in the Loop (ViL), pour valider les comportements et les cas d'utilisation des algorithmes de platooning en zone urbaine.

[142] démontrent que les véhicules autonomes nécessiteraient plus de 14 milliards de kilomètres d'essais sur route, ce qui pourrait prendre plus de 400 ans avec une flotte de 100 véhicules fonctionnant chaque heure de l'année avec un superviseur au volant. [127] présentent le cadre utilisé dans la simulation à l'aide de Robotic Operating Software (ROS) et Unity3D pour optimiser l'expérimentation à l'aide de véhicules intelligents. Une plateforme ViL, basée sur la communication UDP, a été construite en utilisant le simulateur AIM et un véhicule autonome pour tester des scénarios à une intersection [213]. AIM ne fournit pas une image réaliste du monde naturel et son application est limitée. Un autre simulateur ViL a été créé en [30] utilisant Gazebo et ROS pour réaliser une interaction entre les objets simulés et réels tout en mettant à jour la simulation en fonction du mouvement du robot dans le monde réel. L'utilisation de nombreux robots disponibles dans le commerce est simplifiée par Gazebo, car ils sont intégrés dans le simulateur. Mais Unity3D dispose d'un moteur physique plus complexe et adaptable par rapport à Gazebo, ce qui donne un meilleur réalisme lors des tests. La simulation d'autres éléments, comme le trafic, peut être facilement programmée pour recréer des scénarios réels. Unity3D permet également l'entraînement de nos modèles de conduite à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique, ce qui n'est pas possible avec Gazebo.

## 5.2 Un Simulateur de Réalité Mixte pour SURATRAM

### 5.2.1 Quel besoin pour SURATRAM ?

Soucieux de développer le transport de marchandises en centre urbain pour que celui-ci s'intègre dans la démarche de développement social, économique et écologique des villes, le projet SURATRAM (Système Urbain et Rural Autonome de TRansport de Marchandises) innove en promouvant le transport de marchandises tout électrique et autonome, couplé aux dernières avancées de la logistique urbaine. Pour réaliser ses tournées, tout en minimisant son impact sur l'environnement urbain en termes de pollution (atmosphérique et sonore), le projet SURATRAM exploite une flotte de véhicules électriques. De plus, souhaitant également minimiser son impact sur l'environnement urbain, vis-à-vis des conditions de circulations, le projet SURATRAM se propose de doter ses véhicules électriques de capacités de conduite autonome. Pour minimiser la dégradation des conditions de circulation de l'aire urbaine, ces véhicules autonomes devront circuler sur le système de transport public de la ville, en suivant les bus qui s'y déplacent. Dans ces conditions, le suivi des bus transcrit une autonomisation de haut niveau (niveau SAE 4 ou 5) des véhicules de livraison.

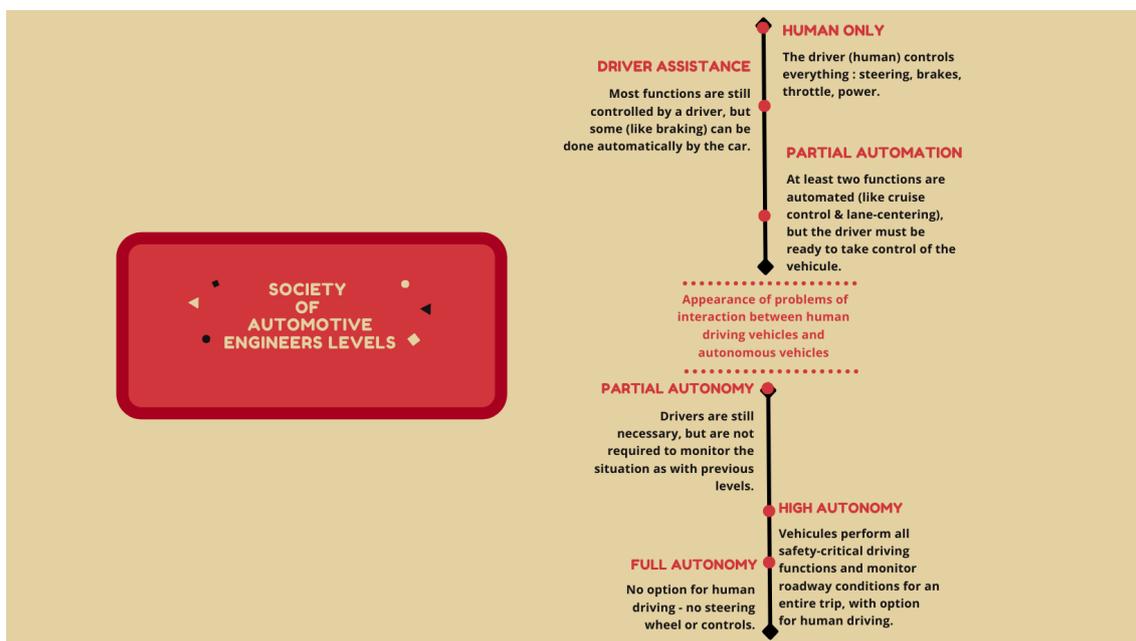


FIGURE 5.1 – Niveaux SAE

Dans un premier temps, un ou plusieurs véhicules devront être capables de suivre un bus le long de sa ligne, sans dégrader la qualité de service du système existant. Pour cela, un ou plusieurs véhicules doivent pouvoir former une application de conduite en convoi, entre eux, ainsi qu'avec le bus, au moyen d'un système d'accroche purement logiciel [41]. Par la suite, une fois les véhicules arrivés sur un point de livraison, il(s) devront pouvoir se stationner en toute autonomie à proximité d'un arrêt de bus et attendre que le client vienne récupérer son colis. Enfin, l'application de conduite en convoi considérant le suivi des bus, les véhicules seront obligés d'attendre un bus, d'une autre ligne pour effectuer un changement de ligne et assurer leur tournée. Une évolution logique du système sera de considérer le changement de ligne autonome des véhicules jusqu'à leur prochain arrêt et/ou leur arrivée derrière un autre bus de la ligne.

Dans un deuxième temps, les véhicules évoluant à proximité des bus (entre 10 m et 30 m), ils doivent être capables d'interagir avec les personnes (enfants, adolescents, adultes) utilisant le système de transport public de la ville. Introduire un tel système dans l'aire urbaine implique que ce dernier soit capable de s'adapter et réagir aux comportements de la population et non l'inverse. Dans ces conditions, le véhicule doit être capable de réagir à divers scénarios de personnes interagissant avec le système, comme une personne traversant entre le véhicule et le bus, un cycliste qui viendrait se coller trop prêt de la colonne de véhicules ou encore des enfants qui joueraient près d'un arrêt de bus.

Un tel système évoluant à un tel niveau d'autonomisation doit pouvoir être testé et validé avant toute mise en circulation sur le système de transport public et le système urbain, dans notre cas, de la ville de Belfort. L'ensemble des interactions du système, quelles qu'elles soient, humain/machine, machine/machine, machine/système, doivent pouvoir être modélisées et validées avant toute mise en place de tests en condition réelle dans l'aire urbaine. De plus, outre les interactions, le comportement du véhicule, induit par des algorithmes tels que celui de l'accroche immatérielle ou celui de la conduite en convoi, doit également pouvoir être testés et validés avant toute mise en place de tests en condition réelle dans l'aire urbaine. Pour répondre à cette problématique, on se propose de doter le projet SURATRAM d'un simulateur de réalité mixte.

### 5.2.2 Qu'est ce qu'un Simulateur de Réalité Mixte ?

On désigne par simulateur de réalité mixte (mixed reality simulator – MRS) toute application mettant en jeu une composante physique réelle (avec laquelle on peut interagir dans notre réalité), comme un véhicule couplé à l'utilisation d'une simulation virtuelle. Dans ce cadre, on va alors chercher à simuler l'environnement réel dans lequel le véhicule pourrait être amené à évoluer. L'objectif, derrière le déploiement d'un tel dispositif, est de pouvoir bénéficier d'un environnement complexe et évolutif, qu'il est compliqué et coûteux de reproduire, en fonction des besoins identifiés. Ainsi, disposant d'un véhicule réel et d'un environnement virtuel, il est alors possible de mener des campagnes de tests dans lesquelles on va pouvoir valider le comportement du véhicule réel, dans des conditions qui se rapprochent, au mieux, de la réalité.

Dans son concept de Continuum, Milgram [181] décrit une taxonomie des différents types de réalité, pour une transition fluide de la réalité réelle (la nôtre), à la réalité virtuelle (simulée). En outre, elle permet aussi de caractériser les différentes méthodes d'interaction liées à chaque type d'environnement. Dans le cas qui nous intéresse, la réalité mixte, le Continuum de Milgram décrit dans quelle mesure des objets d'un environnement physique et des objets d'un environnement virtuel, peuvent coexister dans une même application, comme illustré dans le diagramme de Milgram, figure : 5.2.

Concernant le domaine de la robotique, les simulateurs de réalité mixte sont utilisés pour fournir des environnements de test à des robots réels. L'objectif étant de pouvoir tester et valider leur bon fonctionnement et leur bon comportement, en fonction des algorithmes déployés. Dans leur article de 2010 [250], J.Stocklein et al. proposent un "Mixed Reality Design Process" qui encadre le développement d'un système mécatronique interactif, du prototype virtuel jusqu'au système final, en exploitant le Continuum de Milgram.

# Continuum de Milgram

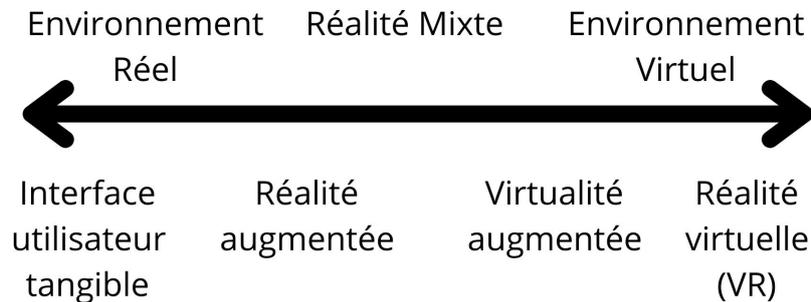


FIGURE 5.2 – Continuum de Milgram

Un premier exemple de simulateur de réalité mixte concerne les travaux de [228]. Dans ce projet de recherche, Shabnam propose une application de détection de feu de forêt, embarquée dans un drone. Une fois la cible identifiée, le drone se déplace sur la cible et effectue un survol de cette dernière. Concernant la phase de tests, elle apparaît assez lourde à mettre en place, tant d'un point de vue organisationnel, nécessitant de nombreux acteurs du domaine de la sécurité (pompier, police) ainsi que des démarches administratives, que d'un point de vue financier. Dans cette optique, une application de réalité mixte est utilisée pour mener les tests à bien. Pour cela, un projet Unity permet de simuler un environnement virtuel dans lequel un feu de forêt peut aisément être déclaré, sans risque. Ensuite, les informations en provenance des capteurs réels du drone sont remplacées par les informations en provenance de la simulation. Grâce à ce dispositif, Shabnam dispose alors d'un drone réel, capable de se déplacer dans un environnement virtuel, dans lequel il peut identifier un feu de forêt et réagir en conséquence.

Dans leur article [214], M.Quinlan et al. proposent un simulateur de réalité mixte dans le but de montrer qu'avec des véhicules autonomes, il est possible de rendre le contrôle des intersections beaucoup plus efficace, qu'avec les mécanismes de contrôle traditionnels, tels que les feux de circulation et les panneaux d'arrêt. Pour cela, ils utilisent un véhicule autonome réel, qui évolue dans un environnement virtuel composé d'autres véhicules (pour recréer les conditions du trafic routier souhaitées) ainsi que d'intersections autonomes avec lesquelles le véhicule est amené à interagir.

Dans l'article [284], M.R.Zofka et al. proposent un simulateur de réalité mixte pour le test d'application critique. Au travers de leur projet de recherche, M.R.Zofka et al. cherchent à développer un banc d'essai de réalité mixte pour la vérification et la validation de véhicules autonomes, confrontés aux piétons, dans des conditions de trafic données.

## 5.2.3 L'évolution des solutions de tests

Depuis maintenant plus de 20 ans, les véhicules de transport, que ce soit les voitures ou les camions, sont devenus des systèmes de plus en plus complexes, à tous les niveaux. Cependant, c'est le domaine du développement logiciel qui a apporté le plus de complexité, notamment avec le développement des différents niveaux d'autonomisation des véhicules, défini par la société SAE.

S'intéressant au cadre méthodologique des solutions de test dans cette thèse, on comprend alors que les méthodes permettant le test et la validation des véhicules ont obligatoirement dû être mises à jour au fur et à mesure des années. Au départ, les véhicules n'étant que peu complexes, la sécurité était image de la fiabilité des composants (alors majoritairement mécaniques), de même que pour l'électronique et les blocs logiciels [34]. Néanmoins, l'arrivée de l'automatisation des véhicules a rendu nécessaire le développement de la modélisation de la dynamique elle-même du véhicule [216], [126]. Enfin, les véhicules ou systèmes devenant de plus en plus complexes, les solutions de test et de validation sont elles-mêmes devenues de plus en plus complexes.

Les solutions de test sont nées de la conception basée modèle (modèle based design). Dans cette conception, un ensemble d'équations, lois ou règles, sont utilisées pour décrire le comportement d'un système de manière plus ou moins fidèle. Dans cette approche est née la solution de test appelée "Model in the loop" (MiL). Dans cette approche, comme dit, le système est modélisé dans son ensemble dans l'objectif de pouvoir tester les lois de commande développées et pouvoir corriger les erreurs mécaniques, électroniques et logicielles, avant la fabrication des premiers prototypes. On parle alors de validation fonctionnelle.

Ensuite, comme dit, les systèmes sont montés en niveau d'automatisation impliquant le besoin de développer une approche dite "Software in the loop" (SiL). Cette approche s'intéresse uniquement à la complexité apportée par le domaine du développement logiciel. Pour cela, on isole le code qui plus tard sera implanté sur le calculateur du véhicule pour effectuer des tests unitaires sur ce dernier. Les tests unitaires impliquant d'injecter des données identiques à ce que le code sera en mesure de traiter et d'en valider le bon fonctionnement.

Enfin, la norme ISO 26262 [132] est venue se rajouter par-dessus, imposant d'utiliser l'environnement matériel final (une fois le prototype, le véhicule étant industrialisable) pour effectuer des campagnes de test sur les systèmes critiques. Seul inconvénient majeur à cette méthodologie étant son coût très important en termes de temps et de ressources financières. Pour cette raison, on a commencé à considérer des solutions de test qui s'intéressent uniquement à des parties données du véhicule, ce qui a permis de mener des tests de manière plus efficace et moins coûteuse. De cette approche est née la méthode de solution de test Hardware in the loop (HiL). Cependant, tester une partie isolée du système implique d'être capable de générer un environnement qui génère des données cohérentes avec le système étudié. On va alors bouchonner les entrées du matériel considéré pour injecter dedans les données que notre environnement artificiel génère.

Enfin, le passage de l'automatisation à l'autonomisation a imposé un nouveau changement de paradigme dans la considération des solutions de test, impliquant de passer aux solutions de test, que l'on nomme "Vehicle in the Loop" (ViL). Les solutions de ViL se caractérisent par l'intégration d'un environnement d'essai virtuel simulé, dans lequel notre véhicule réel va évoluer, toujours au moyen de la méthode de bouchonnage décrite précédemment. Plus tôt dans ce chapitre, nous avons introduit le concept comme simulateur de réalité mixte. Cette dénomination est correcte et c'est d'ailleurs de cette manière que les premiers systèmes de ce genre ont été décrits. Néanmoins, avec le temps, l'appellation de ces solutions de test a changé pour maintenant être connue sous le nom de "Vehicle in the Loop" ou ViL.

Dans [285], on retrouve le modèle générique appelé X-in-the-Loop. Ce modèle permet d'identifier le cadre de simulation optimal pour un système de voiture automatisée :

- les différentes méthodes de représentation des capteurs dans la simulation
- la dynamique du véhicule et sa relation avec les différents actionneurs
- un large éventail de scénarios, notamment la prise en compte de différentes situations de trafic dans la simulation.
- modèles de commande pour les systèmes de véhicules automatisés

Dans ce modèle, les éléments étudiés (modèle, logiciel, hardware et le véhicule) sont en interaction continue avec l'environnement simulé (selon sa complexité) en fonction du cadre étudié. Concernant la dernière, il est primordial que les paramètres virtuels et réels, en commun, soient synchronisés pour garantir une solution de test fiable, cohérente et robuste. Pour conclure, de par la complexité grandissante amenée par le domaine du développement logiciel et le passage de l'automatisation à l'autonomisation, la solution de test actuelle la plus utilisée est le "Vehicle-in-the-Loop". En effet, dernièrement, le ViL est la technologie de solution de test la plus avancée et dans laquelle le plus de moyens de recherche et développement sont injectés. Ces investissements étant motivés par le champ des possibles couvert par le domaine. Dans [285], article datant de 2020, on retrouve un comparatif présentant 8 implémentations notables autour du ViL pour permettre une bonne compréhension du domaine.

Dans son article de 2020 [285], Z.szlay propose un survey des solutions de test "X in the Loop" dans lequel il revient en détail sur la manière dont le Vehicle in the Loop est né. De plus, outre un état de l'art du ViL autour de 8 projets marquants, il met en avant les avancées du domaine avec le scénario in the Loop, qui permet des tests plus poussés que le ViL.

Dans [26] de 2017, M.Butenuth et al. proposent un tour d'horizon de la solution de test de ViL couplée à l'utilisation de scénario, dans l'environnement virtuel. Ainsi, ils montrent comment le ViL peut être mis en place pour réaliser des tests en conditions critiques avec, par exemple, des piétons (virtuels) ou encore un ensemble d'autres véhicules (virtuels) avec lesquels interagir.

Dans leur article de 2018 [227], F.Rüger et al. mettent en avant l'intérêt du ViL dans le cadre du contrôle d'un véhicule en situation de freinage d'urgence. Dans un premier temps, interagissant avec des véhicules virtuels, le conducteur est ensuite mené à interagir avec des enfants virtuels, dans le but d'en analyser sa réaction, ainsi que son temps de réaction.

Dans un autre cas de figure, dans [53], c'est cette fois-ci un radar de véhicule (réel) qui va être plongé dans un environnement virtuel pour produire la toute première solution de validation de radar intégré.

Dans [88], la solution de test ViL est utilisée pour permettre de tester en conditions critiques les intersections autonomes, en simulant dans un environnement virtuel les intersections, ainsi qu'une petite flotte de véhicules virtuels pour interagir avec le véhicule réel et les intersections virtuelles.

Dans [261], le ViL est cette fois utilisé pour mettre en avant une solution de test d'un véhicule réel inséré dans un trafic virtuel.

Dans [143], le ViL est utilisé pour valider le positionnement longitudinal d'un véhicule, dans une application de conduite en convoi.

Dans le cas de [15], T.Bock et al proposent d'explorer le setup qu'ils ont développé dans le but de proposer un environnement de tests sûrs, reproductibles, complets et économes en ressource pour l'étude des aides à la conduite. Avec ce setup, il propose de pouvoir réaliser des tests en conditions critiques avec un vrai véhicule au sein d'un trafic, qui lui est situé dans un environnement virtuel.

Concernant [189], M.Ahmane et al. proposent d'utiliser, cette fois, la solution de test ViL, dans le but de caractériser au mieux, en amont, une expérimentation lors d'une phase de test, dans le but d'étudier le comportement de véhicules qui se croisent et se partagent entre eux la priorité à une intersection. Le but ici, n'est pas d'avoir des intersections autonomes, mais de proposer un système où les véhicules se partagent eux-mêmes ladite intersection. Une fois la phase de test validée dans le ViL, ils leur a été possible de passer aux tests en conditions réelles avec une flotte de véhicules concrets.

## 5.2.4 Quels intérêts pour de tels systèmes ?

Historiquement, différentes stratégies sont mises en place pour évaluer les performances d'application mettant en jeu des véhicules automatisés et/ou autonomes. Concernant la plus classique, les tests en conditions réelles, si l'on se rapporte au Continuum de Milgram, ils sont classés tout à gauche de la taxonomie. Dans les tests réalisés sur le terrain, divers bancs d'essai sont utilisés pour reconstituer des interactions critiques entre des véhicules ou entre des véhicules et des piétons, vélo, etc. Ces bancs d'essai sont généralement constitués de morceaux de véhicule que l'on fait bouger avec des vérins [243] et des mannequins sont tirés sur la route avec des systèmes de propulsions par gaz ou de poulies. Considérer la réalisation des tests de cette manière, sur circuit privé, implique de se limiter à des conditions de circulation simple, ainsi que des interactions machine/machine et machine/humain simples. De plus, la mise en place de tels tests reste difficile, impliquant une organisation lourde pour déployer les équipements sur site ainsi que pour modifier tout scénario de test. Considérant maintenant des tests menés sur route ouverte, ces derniers sont sujets à la

nature aléatoire des conditions du trafic expérimenté. L'ensemble de ces essais rassemble tous les mêmes défauts. Ils sont très longs à mettre en place, de par le nombre d'acteurs en jeu (provenant tous de domaines variés et non directement liés à la technique des essais, comme la sécurité) ainsi que le nombre important de démarches administratives à réaliser. De plus, ils sont souvent risqués à réaliser, d'où la nécessité de la présence de pompiers sur place, et très onéreux à mettre en place. Enfin, d'un point de vue expérimentation, les situations rencontrées lors de telles journées de tests sont, dans la plupart des cas, difficilement reproductibles.

De par tous ces éléments, on comprend bien l'intérêt de mener des essais sous une solution de test, tel que le Vehicle in the Loop ou encore de Scenario in the Loop. Enfin, l'intérêt majeur de ces solutions de test réside dans leur critère sécuritaire. Au travers du ViL, une petite équipe, ne serait-ce que de deux personnes, est capable de déployer une solution de test pour tester, par exemple, l'insertion d'un vrai véhicule dans un trafic dense (le trafic étant bien entendu simulé). Si l'on monte d'un cran dans la criticité des tests, avec le SiL, on peut maintenant aussi tester l'interaction d'un piéton réel avec un véhicule réel. Pour cela, on va avoir un piéton (réel) avec un casque de réalité augmentée (AR) qui va donc pouvoir visualiser un véhicule virtuel devant lui, qui est l'image d'un véhicule à quelques dizaines de mètres de là. Concernant le véhicule, il va dans son cas pouvoir visualiser le piéton dans son environnement virtuel simulé. L'intérêt d'une telle solution est que l'on peut maintenant réaliser des tests, sur le comportement des ADAS, avec des piétons à proximité ou encore de véhicules autonomes devant naviguer dans des foules, plus ou moins denses, et ainsi étudier leur comportement.

### 5.2.5 Les limites de tels simulateurs

Il est tout de même important de rester critique envers les tests réalisés au travers d'application de réalité mixte. Ces applications, comme leur nom l'indique, sont basées sur une simulation de la réalité, qui, de par les moyens mis en œuvre, va être plus ou moins fidèle à cette dernière. Ainsi, c'est de cette qualité et de cette fidélité de la simulation que vont dépendre les résultats obtenus [135]. Par exemple, la mesure des performances d'une application de conduite autonome dépend principalement de l'adéquation entre le modèle décrivant le comportement des conducteurs et les paramètres qui sont utilisés pour le décrire.

Dans [243], on retrouve également l'idée de questionnement quant au bien fondé de l'expérimentation et de ce que l'on expérimente. Si grâce à la réalité mixte, l'expérimentation devient facile et peu coûteuse à mettre en place, il ne faut pas pour autant y passer son temps. B.Färber et al. questionnent la conception d'interactions homme/machine, tels que les ADAS. Pour eux, *"il est nécessaire de posséder une compréhension approfondie du comportement et de la perception du conducteur dans des situations de conduite pertinentes"* [243]. Ainsi, c'est seulement grâce à ces informations qu'il sera possible de déployer des ADAS qui contribuent réellement à renforcer la sécurité routière.

## 5.3 Solution de test de véhicule autonome en condition réelle et simulée

Suite à la présentation des besoins du projet SURATRAM en matière de solution de test, ainsi que du domaine des solutions de test (MiL, SiL, etc.) et plus spécifiquement de l'état de l'art des solutions qualifiées de "Vehicle in the Loop" (ViL), est présenté dans ce chapitre l'approche mise en place pour architecturer et concevoir une telle application pour le projet SURATRAM. Dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons qu'au cas de la conduite en convoi (platooning en anglais). Pour rappel, l'objectif visé au travers de cette solution de test est de disposer d'un véhicule (réel) qui se déplace tout en suivant un véhicule virtuel, dans notre cas, un objet simulé représentant un bus du système de transport public de la ville de Belfort. Pour répondre à cette problématique, le système de test proposé se compose d'un véhicule de test réel, d'un logiciel de simulation 3D et d'une OS spécialisée dans le domaine de la robotique (ROS).

### 5.3.1 Le véhicule de test

Au vu du système qu'ambitionne le projet et des possibilités offertes par la solution de test de Vehicle in the Loop, il est nécessaire d'identifier le véhicule qui sera mis en œuvre durant les phases de test. Dans un premier temps, la base de développement envisagé pour réaliser ce projet était un KONA électrique, entièrement équipé par FAAR Industry. Problème étant que, dû à la pandémie de COVID19, le véhicule a été livré avec beaucoup de retard, nous obligeant à nous adapter et à trouver une alternative pour démarrer le développement de notre simulateur.

Pour pallier au problème, le choix a été fait de démarrer nos travaux sur un véhicule en modèle réduit. Notre choix s'est fait en se basant sur les caractéristiques intrinsèques des modèles réduits à notre disposition. Notre choix s'est arrêté sur le modèle "PiCar-S Kit V2.0 for Raspberry Pi" du fabricant Sunfounder. Le véhicule est équipé d'un train directionnel, comme un véhicule classique, de deux moteurs électriques, branchés, chacun, en direct sur les roues arrière et d'une carte électronique Raspberry Pi, jouant le rôle d'ordinateur de bord. Outre sa conception de base, la plateforme a été choisie pour son potentiel d'amélioration, ce qui nous a permis d'ajouter un lidar sur son sommet, ainsi qu'une centrale inertielle (IMU) et des capteurs de distance ultrasonique (UDS). Ainsi, mis à part les moteurs, le véhicule en modèle réduit offre la même configuration de capteurs et les mêmes capacités de déplacement que le véhicule électrique d'origine : Hyundai KONA. Enfin, bien que le changement de véhicule entraîne une légère modification dans l'approche et l'architecture du projet, le passage de la plateforme robotisée à une échelle réduite reste un choix intéressant dans cette phase de développement du projet. De par sa petite taille, son faible coût, l'amélioration facile de sa structure et de ses capteurs embarqués, la phase de recherche et développement, concernant l'approche mise en place pour concevoir le simulateur, s'en est retrouvée grandement simplifiée et accélérée. Pour finir, il est intéressant de noter que le seul point de divergence entre le modèle réduit et le véhicule réel est la non-cohérence de leur comportement sur route. Par conséquent, les résultats obtenus ne sont pas entièrement homologues aux expériences réalisées avec un Kona en raison du décalage entre le modèle physique des deux véhicules.

Pour rentrer plus en détail concernant le matériel utilisé, l'ordinateur de bord utilisé est un Raspberry Pi 4B 8Go avec une OS basée sur une distribution Linux, Ubuntu 64, supportant officiellement le logiciel ROS. Le système de propulsion du véhicule est composé de deux moteurs électriques à charbon que l'on vient piloter via un signal en modulation de largeur d'impulsion (PWM en anglais). Le Lidar 2D utilisé est le modèle RPLIDAR A2 de chez SLAMTEC, pouvant produire jusqu'à 8000 échantillons par seconde avec une portée maximale de 12 mètres, avec une précision de 0,15 mètre. À propos de la centrale inertielle utilisée, il s'agit du modèle MPU6050 qui intègre un accéléromètre 3 axes ayant un intervalle mesurable de 2g jusqu'à 16g et un gyroscope 3 axes pouvant mesurer une vitesse angulaire allant de 250° /sec à 2000° /sec. Enfin, les UDS utilisés ont une portée de 0,15 mètre à 4 mètres et fonctionnent sur une gamme de fréquence de 40kHz.



FIGURE 5.3 – ViL : Véhicule de test - modèle réduit

### 5.3.2 La simulation Unity3D

L'environnement de test simulé mis en place est composé d'un véhicule suiveur (simulant le véhicule en modèle réduit) et d'un véhicule leader (simulant un bus). L'ensemble de la simulation est basé sur le moteur de jeu Unity3D, développé par Unity Technologies. Utiliser une solution telle qu'Unity3D est un vecteur de support du projet autant sur le court terme que sur le long terme. Ne pas avoir à développer l'outil 3D de simulation offre un gain de temps considérable sur la réalisation du projet et permet ainsi de se concentrer sur le coeur du projet, à savoir la modélisation et le déplacement des véhicules.

Le modèle 3D de bus simulé est une copie des bus hybrides "Lion's city" fabriqués par MAN et utilisés par la ville de Belfort, sur son système de transport public. De plus, le modèle 3D de véhicule utilisé représente un véhicule électrique KONA, du fabricant Hyundai. Unity3D possède un moteur physique que l'on peut configurer en fonction du véhicule que l'on souhaite utiliser. On peut ainsi spécifier la masse du véhicule, son centre de gravité ou encore son coefficient de traînée. Unity3D permet également aux utilisateurs d'intégrer le modèle de pneu en fournissant les valeurs de friction, avant et latérale (glissement extrême, glissement asymptote). La simulation tient également compte de la masse non suspendue du véhicule et du système de suspension (taux d'amortissement, distance de suspension, distance du point d'application de la force). Les valeurs de couple maximales et les limites de vitesse des deux véhicules sont également programmées dans le simulateur. Ces fonctionnalités aident à affiner la physique de la simulation, permettant d'intégrer la plupart des véhicules dans Unity3D et rendant la simulation polyvalente pour, plus tard, complexifier la simulation en intégrant une flotte de véhicules.

La simulation développée vise à reproduire un peloton, composé dans un premier temps uniquement d'un véhicule suiveur et d'un véhicule leader, pour réaliser une application de conduite en convoi (platooning). Dans la simulation, le véhicule leader (le bus) est programmé pour se déplacer en suivant un chemin prédéfini. Le véhicule suiveur, lui, est programmé pour suivre le véhicule leader (le bus) de manière totalement autonome. Son déplacement est donc conditionné pour s'effectuer grâce aux données de télémétries mesurées entre le véhicule suiveur et le véhicule leader. Ensuite, une fois les données de télémétries acquises par le véhicule suiveur simulé, celles-ci sont également transmises au véhicule suiveur réel, à savoir, le véhicule en modèle réduit. Grâce à ces informations, le véhicule suiveur réel est donc capable de se déplacer et, dans notre réalité, de suivre un véhicule virtuel.

Le déplacement du bus est modélisé comme suivant. En utilisant des points de passage, nous définissons le chemin que le bus doit emprunter. Au début de la simulation, nous rassemblons tous les points de passage et les stockons dans un tableau pour garder la trace des points. Pour diriger le bus, nous calculons un vecteur relatif au prochain point de passage à partir de la position actuelle du bus, ce qui nous renvoie une valeur entre  $[-1, 1]$ , indiquant la direction (une valeur négative implique que le point est à gauche du cap du bus et au contraire, une valeur positive indique un point à droite). Ensuite, pour déterminer l'angle de braquage, on multiplie le vecteur relatif par l'angle de braquage maximal et lorsque le bus se situe à moins de 5 m du waypoint courant, on calcule l'angle de braquage vers le prochain waypoint du tableau. Pour contrôler la vitesse du bus, nous appliquons un couple aux roues arrière du bus correspondant à la distance jusqu'au prochain point de passage et réduisons cette valeur à mesure que nous approchons du point de passage, ainsi que dans le cas où un virage serré doit être pris. Enfin, la valeur de direction et la valeur du couple sont actualisées à une fréquence de 50 Hz.

Concernant le véhicule suiveur simulé (KONA électrique), une méthode similaire est utilisée pour faire en sorte que le véhicule se déplace en suivant le bus. À l'instar du bus, nous utilisons un point de suivi (tracking point) placé sur l'essieu arrière du bus. Ce tracking point nous permet de calculer une distance et de déterminer un angle de braquage entre le véhicule suiveur et le bus. Pour suivre le bus et se maintenir à distance, le véhicule suiveur utilise une boucle d'asservissement basée sur sa vitesse. Ainsi, un contrôleur Proportionnel-Intégral-Différentiel (PID) (Valeurs de gain  $P : 80, I : 30, D : 35$ ) permet d'ajuster la vitesse transmise aux roues du véhicule pour maintenir une distance de sécurité de 10 mètres entre le véhicule suiveur et le bus. Le contrôleur recalcule la vitesse du KONA à une fréquence de 10 Hz. Enfin, à un intervalle de temps donné, la simulation Unity3D reçoit des coordonnées de positionnement dans l'environnement en provenance du véhicule réel. Dès que ces données sont reçues, la position du véhicule dans l'environnement simulé est mise à jour, pour que le véhicule simulé soit positionné de la même manière que le véhicule réel.

La société Siemens a développé une bibliothèque open-source en C# pour communiquer avec ROS depuis des applications .NET, telle qu'Unity3D en utilisant des sockets TCP/IP (disponible sur GitHub sous le nom de `ros_sharp`). La bibliothèque comprend des éditeurs de messages standard (publishers), des boîtes de réception de messages standard (subscribers) et des serveurs d'action. Pour notre application, un nouvel objet a été créé, contenant un `ros_connector`, deux publieurs de données et une boîte de réception de données. Le script `ros_connector` a pour rôle de connecter la simulation sur Unity3D au serveur ROS exécuté sur notre plateforme de test. De plus, deux éditeurs de données, codés sur 32-bit float, ont été modifiés (`std_msgs` ROS) pour transmettre les informations de vitesse du véhicule simulé, ainsi que d'angle de braquage du véhicule simulé au véhicule réel. Notre boîte de réception est basée sur la bibliothèque `ros_sharp` pour recevoir les coordonnées du véhicule réel, générées par un algorithme de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

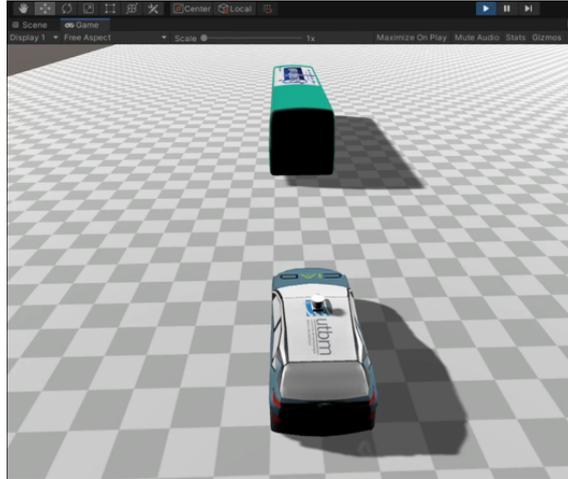


FIGURE 5.4 – ViL : simulation Unity

### 5.3.3 Système d'exploitation : ROS

Robot Operating System (ROS) est une suite d'outils informatiques qui permettent le développement d'applications de robotique, distribués gratuitement sous licence libre BSD. À l'origine, ROS était développé par la société Willow Garage en 2007, pour son robot Personal Robot 2, et est maintenant soutenu et développé par l'Open Robotics, qui est une société à but non lucratif qui a pour but de travailler avec des industriels et des gouvernements pour offrir ces solutions libres et gratuites sur un large secteur de la recherche, du développement et des services de conseil.

ROS est une suite logicielle qui fonctionne comme une OS permettant de centraliser les échanges de messages entre les différentes composantes mise en jeu, et qui met également des algorithmes à disposition tels que des algorithmes de Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Pour cette application, nous avons utilisé la version de ROS "Noetic Ninjemys", qui bénéficie d'un bon soutien de la communauté et d'une bonne compatibilité avec les paquets requis pour ce projet.

Concernant les paquets nécessaires au projet, le premier identifié est la bibliothèque `rosbridge_suite`. Cette bibliothèque contient un paquet `rosbridge_server` avec un fichier de lancement `rosbridge_websocket` qui crée un serveur avec l'adresse IP de la RPi. Ensuite, il suffit d'un code python pour s'abonner `/speed` et `/steer` en provenance de la simulation et récupérer les données qu'ils contiennent. Enfin, de par une bibliothèque modifiée, fournie par le fabricant SUNFOUNDER, il est possible de contrôler le véhicule avec les données reçues.

Le Lidar du véhicule publie ces données sous un sujet (Topic) qui lui est propre : `/slam`. Les données, sous la forme d'un nuage de point, sont captées et visualisées sous la solution de représentation 3D RVIZ, mise à disposition par ROS, en utilisant le package fourni par SLAMTEC. La centrale inertielle du véhicule dispose également d'un Topic qui lui est propre sur lequel publier ces données : `/imu`. Disposant maintenant des données du Lidar et de l'IMU, il est possible de fusionner ces données afin de calculer très exactement la position du véhicule sur la une carte 2D

créée par le nuage du point du Lidar. Pour cela, trois algorithmes de SLAM sont mis à disposition par ROS : mapping, Cartographer et Hector SLAM. Notre objectif étant de fusionner les données du Lidar et de l'IMU, notre choix s'est porté sur l'algorithme Hector SLAM. Cet algorithme de SLAM utilise un filtre de Kalman étendu (EKF) pour calculer les coordonnées de la position du robot dans son environnement. Cette information de positionnement étant publiée sous un Topic dédié /slam\_out\_pose. De plus, cette information de positionnement est ensuite envoyée à la simulation Unity3D, via le serveur ROS, pour repositionner le véhicule suiveur dans son environnement en accord avec la position du véhicule réel.

### 5.3.4 L'architecture de la solution

Dans les sections précédentes, nous avons pu détailler le rôle et le fonctionnement de chacune des composantes du projet, à savoir, le véhicule, la simulation Unity3D et le middleware ROS. Grâce à la figure suivante, nous disposons d'un schéma du fonctionnement global du projet, ainsi que des échanges d'informations entre chacune des couches.

Ainsi, en partant de la simulation Unity3D, le véhicule suiveur va, de par la télémétrie, récupérer des informations de distance et d'angle entre lui et le véhicule leader. Ces données sont ensuite transmises au middleware ROS, par le biais d'un bridge ROS, sur un Topic dédié et transmises au véhicule qui les utilise pour modifier sa vitesse et son rayon de braquage. Ensuite, toujours sur le véhicule, le Lidar et l'IMU émettent des données sur leur Topic propre pour alimenter un algorithme de SLAM, appelé Hector SLAM, qui calcule la position du véhicule réel dans son environnement. Pour finir, cette information de positionnement dans l'environnement est publiée sur un Topic ROS pour être transmise à la simulation Unity3D. Une fois reçue, la position du véhicule suiveur de la simulation Unity3D dans son environnement va pouvoir être mise en concordance avec la position du véhicule réel.

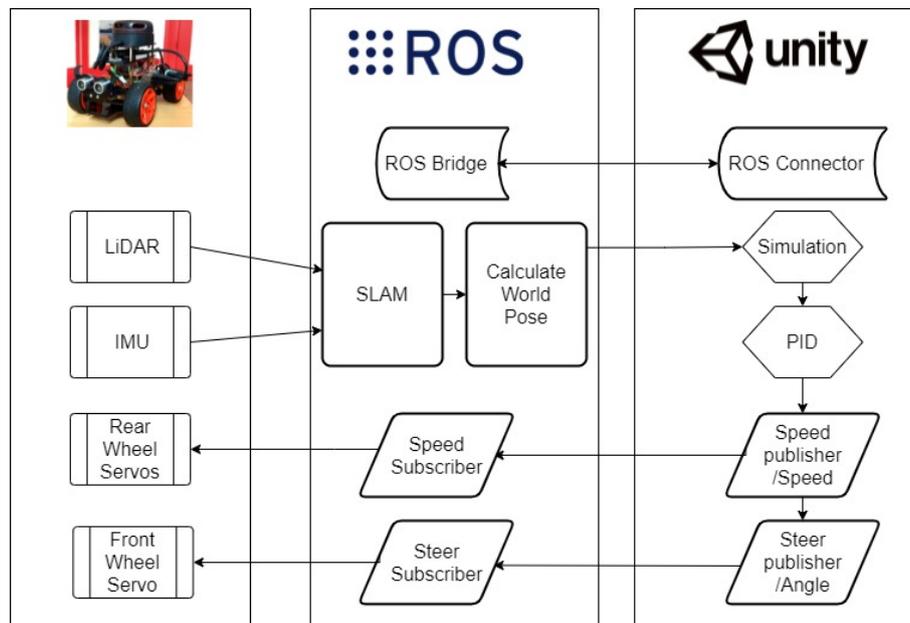


FIGURE 5.5 – ViL : Architecture

## 5.4 Expérimentation et résultats

L'expérimentation, que nous allons mener dans cette section, vise à valider la cohérence et la concordance de la trajectoire du véhicule réel comparée à celle du véhicule suiveur simulé. Dans la simulation Unity3D, le bus décrit une trajectoire ovale, qui va donc être suivie et réalisée par le véhicule suiveur. Ainsi, en marquant au fur et à mesure de son déplacement, les coordonnées du véhicule suiveur et en faisant de même avec le véhicule réel, nous allons pouvoir comparer les deux trajectoires réalisées et valider, ou non, leur cohérence.

Chaque expérience correspond au bus effectuant un tour complet (sauf indication contraire) de l'ovale tout en étant suivi de près (distance de 10 m) par la voiture dans la simulation. Cette section fournira des détails concernant l'analyse et les résultats des performances de notre simulateur de réalité mixte, sur la base de trois critères principaux : le délai, l'écart de la simulation par rapport à la position dans le monde réel et l'analyse de l'algorithme SLAM.

### 5.4.1 Les délais internes à la solution de test

Comme nous travaillons sur un système en temps réel, il est crucial de déterminer le délai entre la transmission des données, l'actionnement du système et le retour d'information. L'anticipation de ce délai peut améliorer l'efficacité des stratégies de contrôle. Un ping de 20 ms est généralement observé dans les connexions sans fil fonctionnant à 2,4 GHz, mais le délai varie pour chaque requête. ROS est connu pour avoir des délais longs dans la communication entre les nœuds, ce qui peut influencer le système. Nous avons identifié trois composants qui constituent le délai total dans notre système : les messages pour atteindre ROS depuis Unity, le temps nécessaire pour traiter les données et la mise à jour des données de positionnement (WorldPose) de ROS à Unity.

#### 5.4.1.1 Temps de transfert : depuis Unity3D à ROS

Des messages ont été envoyés depuis Unity à l'aide de la bibliothèque `ros_sharp` pour être capables de quantifier les délais de transmission, des données émises depuis Unity vers ROS. Avant d'être envoyées, les données sont converties pour s'adapter au système de coordonnées de ROS (droitier, avec X en avant, Y à gauche et Z en haut), car Unity utilise une convention gauchère, Y en haut, Z en avant et X à gauche. L'en-tête d'un message type est constitué de l'heure à laquelle les données sont prêtes à être envoyées depuis la simulation Unity à destination du serveur ROS.

Ensuite, une fois un message réceptionné dans ROS, l'heure de réception dudit message est enregistrée dans un fichier de log. Dans le même temps, le message réceptionné est analysé pour récupérer l'heure d'émission, enregistrée dans son en-tête. Une fois ces deux opérations réalisées, les deux horodatages sont enregistrés, comme une seule entrée, dans un fichier de log "ROSBag". Par la suite, le fichier de log est analysé sous Matlab pour calculer les temps de transfert des messages envoyés et les tracer dans un graphique.

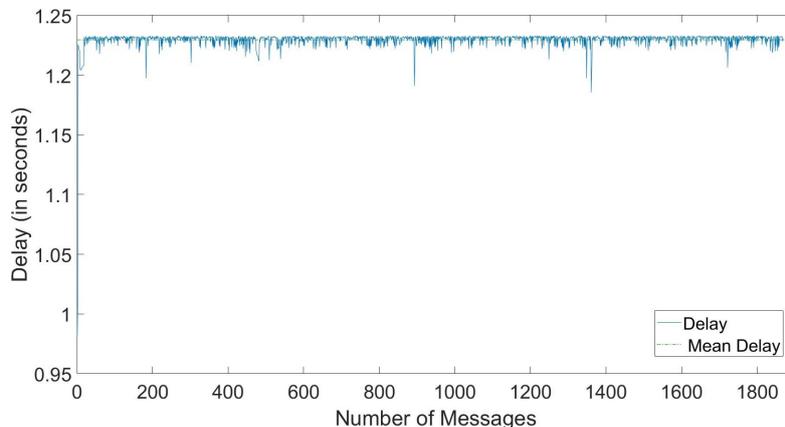


FIGURE 5.6 – Temps transfert : Unity - ROS

Cette opération est réalisée sur plus de 1 870 messages (à une fréquence d'échantillonnage de 50Hz). De par la figure 5.6, on observe que le premier message est réceptionné dans ROS après un temps de transfert de 0,98 seconde. Après quoi, le temps de transfert des messages suivants varie de plus ou moins 2,5 millisecondes autour d'une moyenne de temps de transfert de 1,22 seconde.

#### 5.4.1.2 Temps de transfert : depuis ROS vers Unity

De la même manière qu'il existe un délai, lors de la transmission des données de Unity vers ROS, il existe un délai de transmission entre les données émises depuis ROS en direction d'Unity3D. Nous nous attendons à ce que ce délai soit le même que pour les messages envoyés depuis Unity vers ROS.

Pour quantifier ce délai, nous avons mis en place la même expérimentation que pour les messages envoyés depuis Unity vers ROS. Avant d'envoyer la position dans l'environnement (WorldPose) du véhicule réel à Unity, notre message type est donc constitué d'une en-tête composée de l'heure à laquelle le message est envoyé et de la donnée de WorldPose. Ensuite, dès qu'un message est réceptionné dans Unity, son horodatage est effectué et enregistré dans un fichier de log. De plus, pour chaque enregistrement du fichier de log, l'horodatage du message correspondant (contenu dans son en-tête) est ajouté à l'entrée du log. Pour finir, le fichier de log est importé sous Matlab pour calculer les temps de transfert et tracer le graphiqueX.

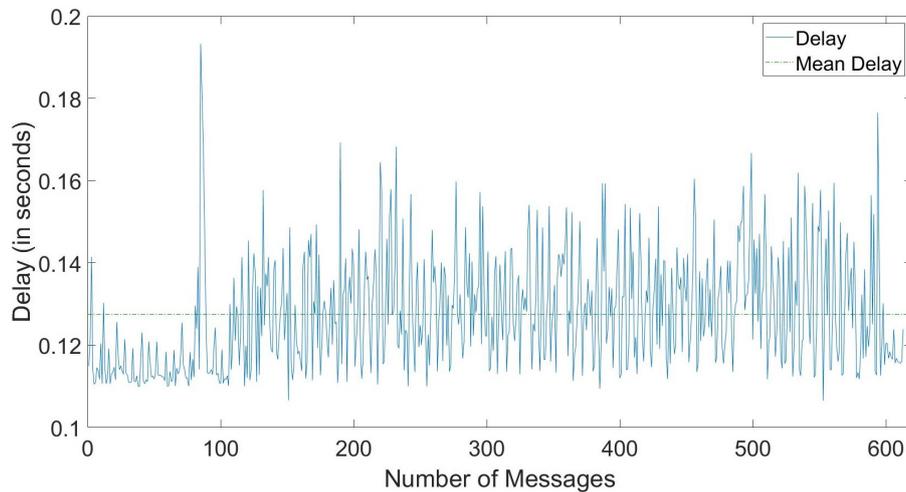


FIGURE 5.7 – Temps transfert : ROS - Unity

De par l'analyse du graphique, on constate que le temps de transfert moyen entre ROS et la simulation sous Unity3D est en moyenne de 130 millisecondes. Autour de cette moyenne, les temps de transfert varient entre 110 millisecondes et 190 millisecondes. De plus, il est intéressant de constater que les temps de transfert, depuis ROS en direction d'Unity3D, sont bien plus courts qu'à l'inverse, de l'ordre d'un facteur 10.

### 5.4.1.3 Les temps de traitements

Dans ce cas-ci, nous souhaitons quantifier le temps, une fois le message réceptionné, pour que l'information soit transmise à un autre nœud ROS, pour qu'une loi de commande soit réalisée, permettant de mettre le véhicule en mouvement. Pour mettre en place cette mesure, nous nous sommes placés dans le pire cas possible, considérant le véhicule à l'arrêt. Ainsi, outre le temps de transfert inter-noeud dans ROS et le temps de calcul, il est possible de mesurer la période de temps nécessaire au système pour mettre le véhicule en mouvement, en horodatant le phénomène, dès que l'IMU détecte un mouvement sur l'axe des X.

Deux boucles distinctes sont utilisées pour traiter les données de vitesse et d'angle de braquage reçues dans ROS. L'utilisation de ces deux boucles augmente donc le temps de traitement des données. Lorsqu'un message est reçu, le contenu du message et l'heure sont imprimés dans la fenêtre de commande. L'IMU est suffisamment sensible pour détecter chaque mouvement. Un message avec l'heure actuelle est imprimé sur la fenêtre de commande dès qu'il y a un changement d'accélération dans l'axe X au-dessus d'une valeur de seuil de 0,2g. La différence entre l'horodatage du premier message reçu de Unity et l'horodatage lorsqu'il y a un mouvement fournit le temps nécessaire au traitement.

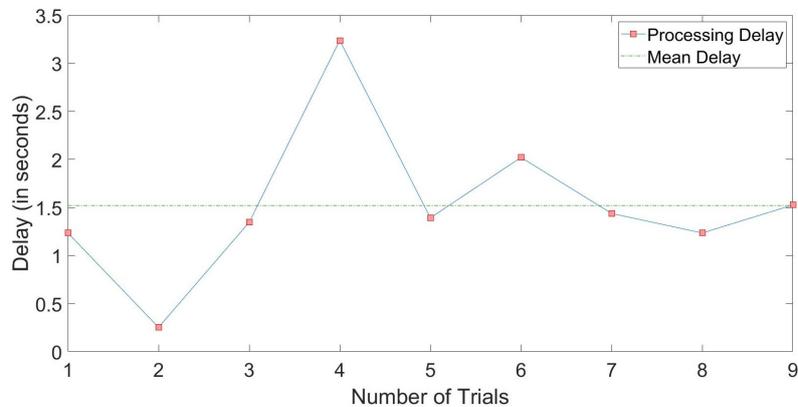


FIGURE 5.8 – Temps de traitement

Sur neuf essais réalisés, pour déterminer le délai entre la réception de la commande et la mise en mouvement du véhicule, nous observons un délai moyen de 1,5 seconde, figure 5.8. Ce délai s'explique par le temps de transfert long, constaté dans la figure 5.8, et le temps de transfert inter-noeud de ROS étant réputé pour être relativement long. Ainsi, le temps d'échange inter-noeud, le temps de traitement de l'information et le temps nécessaire aux moteurs pour vaincre la force contre électromotrice peut être estimé à une demi-seconde.

### 5.4.2 Quelle déviation du véhicule virtuel dans son environnement ?

Notre simulation mettant en œuvre un modèle physique pour le véhicule suiveur simulé, le plus proche possible du véhicule réel, il est important de pouvoir modéliser en quoi les différences, entre le modèle physique simulé et celui du véhicule réel, peuvent affecter la simulation. De plus, les résultats de cette expérimentation permettront de trancher sur l'intérêt de l'utilisation, ou non, d'un modèle physique pour le véhicule suiveur simulé.

Pour mettre en lumière en quoi le modèle physique du véhicule suiveur simulé affecte la simulation, nous avons proposé une expérimentation durant laquelle on enregistre, toutes les secondes, les WorldPoses successives du véhicule simulé. De plus, à chaque enregistrement est ajouté la WorldPose correspondante du véhicule réel, transmise par ROS à la simulation Unity3D. Une fois l'expérimentation terminée, le fichier de log est importé sous Matlab pour calculer un vecteur entre les deux WorldPoses (de la simulation et de l'environnement réel) d'une même entrée et tracer les résultats obtenus dans un graphique.

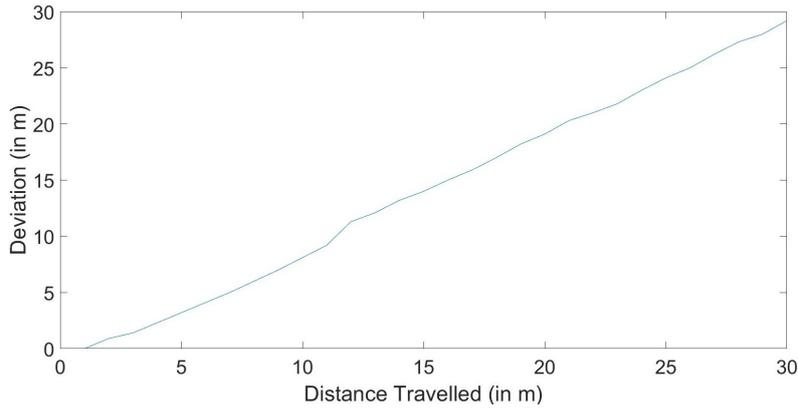


FIGURE 5.9 – Déviation de la WorldPose

Grâce à l'analyse du graphique 5.9, on peut observer que, pour chaque mètre parcouru, la déviation entre les deux WorldPoses augmente de manière linéaire. Au début de la simulation, l'écart est relativement faible car, la vitesse des véhicules est basse. Comme cela a été prouvé précédemment, la voiture RC est en retard de plus d'une seconde sur la simulation. Combiné au fait qu'Unity utilise actuellement un modèle générique de physique de voiture, il y a une déviation significative de la trajectoire reproduite par le robot par rapport à la voiture virtuelle. Ce résultat prouve la nécessité d'un modèle physique précis pour le véhicule virtuel, pour reproduire le comportement du véhicule réel.

### 5.4.3 SLAM : Précision du positionnement dans l'environnement ?

La proximité de l'emplacement, fourni par l'algorithme SLAM avec les mesures effectuées sur le terrain, va permettre d'augmenter notre confiance dans nos mesures (ce qui nous permettra de naviguer en toute sécurité dans des environnements urbains densément peuplés). Pour tester la précision du SLAM, une grille de papier (1 cm de côté) est disposée sur le sol. La voiture RC est positionnée sur l'un des bords de la cellule de la grille. Nous exécutons un cycle de la simulation, tout en filmant le robot depuis une vue orbitale. Les données de position du SLAM sont enregistrées dans un fichier de log "rosbag". Enfin, chaque 3 secondes, nous notons la position du robot à partir de la vidéo en comptant le nombre de cellules parcourues sur la grille et les coordonnées données par le SLAM dans ROS.

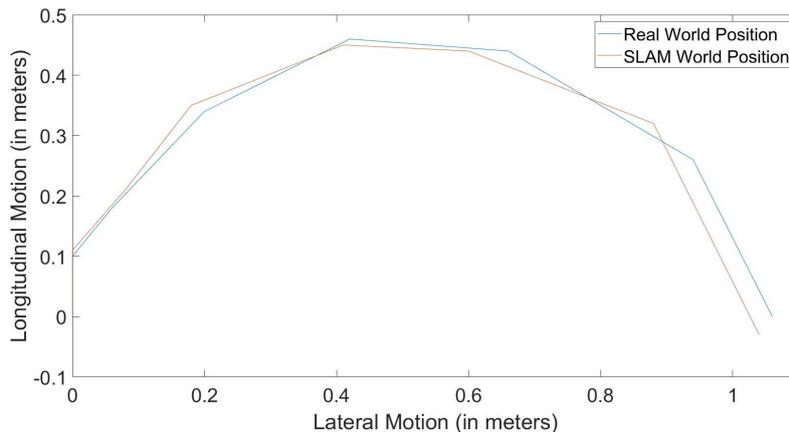


FIGURE 5.10 – Précision du SLAM

Nous traçons les deux points pour recréer le chemin suivi par le robot dans le monde réel. Le SLAM peut localiser le robot avec une bonne précision en fusionnant les données LiDAR et IMU. Le robot n'est pas capable de recréer le circuit oval dessiné dans Unity3D en raison de la différence de modèle physique. L'optimisation de la vitesse et de l'angle de braquage produit un mouvement semi-circulaire sur trois révolutions dans Unity, contrairement aux autres expériences. Nous n'avons pas pu obtenir suffisamment de points pour évaluer le SLAM avec une seule révolution du véhicule dans la simulation.

Un autre graphique, pour représenter l'écart dans le temps, est tracé en calculant un vecteur résultant entre les deux points. Nous constatons une erreur moyenne de 0,03 m entre les deux mesures. L'erreur ne s'accumule pas avec le temps en raison de la présence d'un EKF dans l'algorithme SLAM, qui peut prédire la trajectoire du robot, réduisant ainsi la déviation par rapport à la position réelle. L'erreur pourrait être encore réduite en fusionnant les données d'un odomètre.

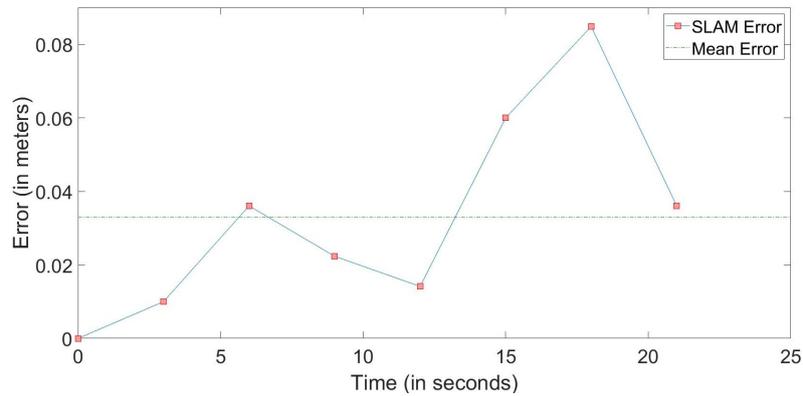


FIGURE 5.11 – Convergence du SLAM

## 5.5 Discussions

### 5.5.1 Concernant les temps de transfert

Pour rappel, le système proposé dans ce chapitre se base sur l'exploitation d'un véhicule en modèle réduit. Ainsi, bien qu'équipé de la carte Raspberry Pi la plus puissante du marché (Pi4 modelB 8Go), il nous est impossible de faire tourner la partie simulation sur la carte. Partant de ce constat et le véhicule devant évoluer de manière autonome dans un environnement ouvert, nous sommes obligés de faire tourner la simulation sur un PC distant et d'envoyer les informations nécessaires au véhicule via communication sans fil, ici la technologie Wifi 2,4 GHz. Cependant, l'utilisation d'une communication sans fil pour l'échange de paquet d'information implique des temps de transfert, qu'il est primordial de pouvoir mesurer.

Si l'on considère le cas de l'échange d'information entre la simulation Unity3D et le véhicule avec un serveur ROS via un bridge ROS, nous avons pu constater des temps de transfert excessivement longs. Ces temps de transfert sont de l'ordre, en moyenne, de 1,20 seconde, ce qui, même pour une communication Wifi reste difficilement explicable. Dans un précédent article de recherche sur le sujet [10], une étude similaire avait été menée pour étudier les temps de transfert de paquet d'information via Wifi, entre le Raspberry et la simulation sur un PC distant et déjà, dans cette première expérimentation, nous avons obtenu des résultats similaires.

Après investigation, plusieurs potentielles sources de problème ont pu être identifiées comme pouvant jouer un rôle dans de délai important du transfert d'informations. Partant de la simulation, celle-ci tournant sur Unity3D, cela implique l'utilisation du langage C pour l'envoi des données. Comme expliqué dans cet article technique [86], à première vue, l'utilisation du C au lieu du C++, ne devrait pas amener des différences de performances notables, surtout que de telles différences peuvent être constatées dans des applications à hautes performances, mais ce qui n'est pas notre cas, dans cette application. De plus, comme introduit précédemment, nous utilisons la bibliothèque "ros\_sharp" développée par Siemens, pour mettre en place la communication entre la simulation Unity et ROS. Après examen de la bibliothèque, aucune mention n'est faite quant aux temps de transfert minimums permis par la bibliothèque. Cette absence d'information pose un problème, car interroger sur les performances offertes par la bibliothèque. Enfin, le nœud ROS de publication, offert par la bibliothèque, a été adapté à nos besoins pour publier nos données (distance, angle de braquage), utilisant des variables codées sur 32 bits. Cependant, 8 bits auraient largement été nécessaires pour stocker nos données. Enfin, le dernier point d'intérêt à évaluer concerne le nœud ROS embarqué sur le véhicule en modèle réduit pour transmettre aux autres nœuds, les informations récupérées. Le nœud ROS utilisé étant implémenté en langage Python, ce qui, à nouveau, interroge sur la perte de performance vis-à-vis d'un nœud ROS implémenté en C++.

Si l'on s'intéresse maintenant au cas contraire, considérant l'échange d'information entre le serveur ROS et la simulation Unity3D. Nous pouvons alors constater des temps de transfert étonnamment performants, de l'ordre de 130 millisecondes. Bien que satisfaisant, ce gain en performance reste difficilement explicable, la transmission de ROS vers Unity3D étant réalisée avec la même bibliothèque "ros\_sharp". Une potentielle explication pourrait être le nœud publieur utilisé, non modifié, car utilisé pour envoyer une seule information. Cependant, si l'on change de perspective et que l'on considère les deux systèmes comme étant managés par deux OS différentes (ce qui est bien le cas), une telle différence de performance pourrait être expliquée par une désynchronisation des horloges des deux OS.

### 5.5.2 À propos de la précision du SLAM

Le SLAM est un élément clef de notre application, car il permet au véhicule réel de se positionner dans son environnement. Le fait de connaître le positionnement du véhicule réel dans son environnement est primordial, non pas pour le véhicule réel, mais pour le véhicule suiveur dans la simulation. En effet, le véhicule suiveur simulé est obligé de se mouvoir à l'image du véhicule réel, pour que la télémétrie réalisée, entre lui et le bus simulé, soit pertinente pour le véhicule réel. L'expérimentation mise en place dans ce chapitre et les résultats obtenus ont permis de valider la concordance entre le positionnement du véhicule réel dans son environnement et le véhicule suiveur simulé dans la simulation. L'utilisation d'un SLAM basé sur la fusion des données en provenance du Lidar et de l'IMU permet une grande précision dans les résultats obtenus. De plus, l'utilisation d'un SLAM basé sur un filtre de kalman étendu (EKF) permet d'éviter la déviation du modèle. En effet, on peut l'observer dans la figure 5.10, le modèle dévie légèrement entre 9 et 17 secondes, mais cette déviation est ensuite compensée, grâce au EKF mis en place.

### 5.5.3 Quelle déviation de positionnement pour le véhicule virtuel ?

Nous l'avons dit précédemment, le positionnement du véhicule suiveur dans l'environnement virtuel est primordial pour notre application. En effet, un positionnement cohérent du véhicule suiveur simulé permet d'assurer que la télémétrie réalisée entre lui et le bus est exacte. Ainsi, des lois de contrôles cohérentes peuvent être mises en place pour assurer le bon comportement de ce dernier dans son environnement.

Pour rappel, la méthode étudiée dans ce chapitre consiste à doter le véhicule suiveur simulé d'une physique la plus proche possible du véhicule réel, pour que son déplacement autonome dans la simulation soit l'équivalent de celui effectué par le véhicule réel. Ainsi, le véhicule virtuel étant capable de se mouvoir de manière autonome, il doit être capable de suivre le bus par lui-même, en restant à une distance donnée de celui-ci. Pour cela, une loi de commande, via P.I.D, est implémentée. En elle-même, la simulation montre que le comportement du véhicule suiveur simulé est celui espéré. Le véhicule se déplace en restant à distance du bus. Cependant, simuler la physique d'un véhicule reste une tâche sensible.

Pour étudier les limites du modèle physique proposé par Unity3D, nous avons cherché à mesurer la différence entre les positions successives de véhicule suiveur par rapport aux positions équivalentes, calculées et envoyées par l'algorithme de SLAM. De par les résultats obtenus, nous pouvons constater que la position de notre véhicule suiveur simulé dérive dans le temps, par rapport aux positions réelles de notre véhicule (réel). De par la figure 5.9, on s'aperçoit que la dérive de la position du véhicule suiveur simulé ne fait que s'accroître, plus la distance parcourue par le système augmente.

## 5.6 Conclusion

À mesure que l'utilisation des véhicules autonomes prend de l'ampleur, les innovations dans le domaine des tests deviennent essentielles. Ce chapitre tend à évaluer l'adoption d'une solution de test *Vehicle in the Loop* pour valider le comportement du véhicule autonome devant réaliser des livraisons de marchandises dans l'aire urbaine, en utilisant le système de réseau public d'une ville, comme proposé dans [104].

Au travers des expérimentations mises en place et des résultats obtenus, nous avons pu juger des performances de la solution de test proposée, visant à éprouver le comportement de notre véhicule autonome, en simulant son évolution dans un environnement urbain. Les résultats des différentes expérimentations menées ont permis de mettre en lumière les limites de notre simulateur. Concernant les temps de transfert entre la simulation et le véhicule réel et inversement, l'utilisation du logiciel Unity3D, faisant usage du langage C#, implique de trop nombreuses potentielles sources de problème, à l'instar de la bibliothèque C ROS, pour communiquer avec le véhicule réel. De plus, concernant le véhicule en lui-même, les temps de transfert inter-noeud de ROS, réputés longs, restent une source de latence conséquente dans le système. Pour pallier à l'ensemble de ces problèmes, plusieurs solutions sont à considérer. Une première solution consiste à privilégier l'emploi du langage C++ pour garantir les performances du système. Pour cela, un changement de logiciel de simulation 3D, pour passer de Unity3D à L'Unreal Engine 5, sera obligatoire. Ce moteur étant développé en C++, il permettra l'utilisation de bibliothèque native C++ pour communiquer avec le Serveur ROS. Ensuite, la deuxième solution proposée consiste à abandonner ROS pour son homologue ROS2, qui lui est spécialement développé pour répondre à des contraintes de temps réel. Enfin, la dernière solution pour améliorer les performances de notre logiciel de test, concerne la partie simulation. Si dans un premier temps, nous avons considéré utiliser un véhicule suiveur autonome dans la simulation, la difficulté à lui intégrer un modèle physique, très proche du modèle physique du véhicule réel, reste une source de problème. Pour répondre à la problématique, la piste privilégiée consiste, non seulement, à utiliser un modèle physique plus poussé pour le véhicule suiveur, mais également à coupler l'information de positionnement envoyée par ROS2 à un filtre de Kalman étendu. Considérant une telle solution, le véhicule suiveur simulé pourra se déplacer de manière beaucoup plus fidèle à la réalité, mais aura également, de par le filtre de Kalman, la possibilité de prédire le prochain point de positionnement du véhicule leader. Cette prédiction permettant d'ajuster la direction du véhicule suiveur pour améliorer le suivi du véhicule leader.

Nous l'avons mise en avant au travers des résultats obtenus, à l'heure actuelle, notre implémentation de logiciel de test de type *Vehicle in the Loop*, bien que fonctionnel, ne répond pas à des critères de performance temps réel nécessaires à des tests de véhicules autonomes en condition réelle. Cependant, au vu de la littérature scientifique sur le sujet et de la technique quant au simulateur ViL, considérant ce projet de recherche comme une preuve de concept, qui, se dit en passant, a été validé, ouvre la voie à de futurs travaux de recherches. Certes, à l'heure actuelle, cette preuve de concept souffre de défauts qui ont tous été mis en avant comme sources d'amélioration, néanmoins, nous sommes en mesure, au vu des propositions présentées précédemment, de répondre à chaque problème identifié. Ainsi, en guise de conclusion sur le futur de ce projet de recherche, une remise à plat complète de sa conception sera obligatoire pour permettre des gains notables en termes de performances.

Pour finir, nous rappelons qu'actuellement, le projet est développé sur un modèle réduit de véhicule autonome et qu'un travail futur important sera de porter le projet sur un véhicule autonome à taille réelle. Pour cela, le projet SURATRAM se propose d'exploiter un véhicule électrique de la marque Hyundai, le modèle étant un KONA électrique, qui a été entièrement robotisé de l'entreprise FAAR industry. Une fois le logiciel de test remis à plat et développé sur le modèle réduit, un tel véhicule permettra de passer aux tests en conditions réelles, dans un premier temps sur circuit, puis lorsque le comportement du véhicule aura été certifié, en condition réelle, sur le système de transport public de la ville de Belfort, en suivant l'un de ses bus.

## Chapitre 6

# Conclusion Générale & Perspectives

### 6.1 Synthèse des travaux de recherche

Les STI sont nés du besoin de gestion du trafic et sont maintenant tous liés à la recherche de la réduction de la pollution sonore et atmosphérique (CO<sub>2</sub>, Nox, etc.) et à l'optimisation de l'impact du transport sur les espaces urbains et péri-urbains. Les STI traduisent le besoin de repenser le transport, tant dans son fonctionnement et ses méthodes, qu'au travers du paradigme par lequel il est analysé. Ils tendent également à sortir du cadre du transport routier, pour se généraliser à d'autres domaines du transport, tels que le transport maritime, le transport ferroviaire, le transport aérien et dans l'avenir, le transport spatial.

Depuis les premiers travaux, pour la prise en compte de la gestion du trafic par les USA et le Japon au début des années 70, les systèmes de transport intelligent (STI) n'ont cessé d'évoluer de par le développement des technologies, mais aussi grâce à la prise de conscience des possibilités offertes par ces derniers, dans l'amélioration et le développement du domaine du transport. Ainsi, les STI, comme Super entité agrégative et organisatrice pour le domaine du transport, ont évolué et se composent maintenant de 13 domaines d'activité, depuis 2015, comme définis par la norme ISO-14813. De plus, sur ces 13 domaines d'activité, il est possible d'identifier quatre grandes catégories d'activité telles que le service aux usagers, les services de secours, l'analyse de la donnée et l'optimisation, et enfin le trafic routier.

Les domaines du transport, qu'ils portent sur le transport de personnes (particuliers ou collectifs) ou qu'ils portent sur le transport de marchandises, ont longtemps été considérés comme deux domaines de recherche différents et n'étant que très faiblement connectés. Ainsi, chacun de ces domaines a développé indépendamment des outils, méthodes et réglementations dans l'objectif de répondre ponctuellement aux problèmes auxquels ils devaient faire face. On peut prendre pour exemple le domaine du transport de marchandises, dans lequel une multitude d'outils d'optimisation ont été développés pour déterminer les chemins les plus à même de garantir la livraison des marchandises, mais qui ne tenaient pas compte de la congestion occasionnée par l'encombrement des véhicules de livraison en zone urbaine. Plus récemment, un autre exemple peut être mis en avant concernant l'impact de la mobilité des particuliers sur la mobilité collective. L'arrivée des services de déplacement, comme UBER, coïncide avec le besoin de facilitation de la mobilité en zone urbaine, les déplacements personnels et collectifs surchargés n'assurant plus leur fonction. Dans un premier temps, une diminution du nombre de véhicules en circulation a certes pu être observée, mais cette disponibilité du réseau a rapidement été comblée par une flotte de véhicules de service. Par la suite, une forte baisse de la fréquentation des transports publics a été constatée, ce qui, sur le long terme, peut agir comme un frein au développement des transports en commun. Constatant les limites de la réponse ponctuelle dans le domaine du transport, les STI mettent en avant une vision systémique, dans laquelle le plus d'éléments possibles (qu'ils soient en interaction directe ou indirecte) doivent être pris en compte dans l'optimisation d'un domaine donné.

Le projet SURATRAM, développé dans le cadre de cette thèse, s'inscrit dans un programme de recherche plus global et ambitieux qui vise à proposer un nouveau type de système de gestion de marchandises en centre urbain [104]. Pour ce faire, le projet ambitionne d'aborder la gestion des marchandises d'un point de vue systémique, en intégrant la gestion au domaine des Systèmes de Transport de Marchandises Intelligent (STI). Cette vision systémique de la gestion des marchandises en zone urbaine passe par l'emploi de véhicules électriques et autonomes pour assurer les tâches de livraison et d'enlèvement de marchandises. De plus, pour circuler, ces véhicules auront la possibilité d'utiliser le réseau de transport public existant des villes, pour se déplacer depuis un centre de distribution urbain (CDU) vers des points de livraison finaux. Enfin, toujours concernant les véhicules électriques et autonomes, la vision systémique des STI implique d'intégrer au processus d'optimisation, pour la livraison et l'enlèvement des marchandises, l'ensemble des caractéristiques intrinsèques propres aux technologies mises en œuvre, telles que le véhicule électrique à batterie (VEB) et les véhicules autonomes.

Ensuite, lors de leur déplacement sur le système de transport public de la ville, les véhicules devront interagir avec les bus de la ville, sans les gêner dans leur mission, ni détériorer les performances du système de transport. Pour cela, les véhicules se déplaceront en suivant les bus, selon une méthodologie de conduite en convoi (platooning). La conduite en convoi se fera grâce à une fonction d'accroche immatérielle (autrement dit, purement logicielle) entre le véhicule de livraison et les acteurs du transport public (bus, tram, ...). Par la suite, avant son arrivée sur son prochain point de livraison, le véhicule informera son client de son arrivée, pour minimiser le temps d'attente sur place. Puis, lorsqu'un véhicule sera arrivé sur son point de livraison (arrêt du bus), celui-ci se décrochera (de son encrage immatériel) pour se stationner, de manière autonome, sur un emplacement réservé, situé à proximité de la station de bus. Enfin, une fois la livraison effectuée, le véhicule de livraison quittera son emplacement pour se raccrocher (logiciellement), et de manière autonome, au prochain bus passant à proximité. Il pourra alors continuer sa livraison ou retourner au centre de distribution urbain, afin d'être rechargé.

Ce projet s'inscrit donc dans le développement des véhicules autonomes industriels et plus particulièrement dans la thématique du transport de marchandises dans les couloirs de bus (difficulté de niveau 4 avec une exploitation à l'horizon 2030). Ainsi, ce projet devrait permettre de lever les verrous d'une telle solution et d'envisager, à terme, le développement de solutions de transition vers le tout autonome.

Un projet de recherche, ambitieux comme celui-ci, nécessite un vaste champ d'expertise sur un large panel de domaines de compétences : Que ces domaines soient directement liés à la technique devant être mise en œuvre qu'ils soient connexes à la théorie qui alimente la recherche de solutions et leur possible implémentation et qu'ils gravitent autour du projet, comme le cadre écologique, le cadre législatif, le cadre économique ou encore le cadre social. Tous, sans exception, caractérisent le projet. Qui plus est, c'est le respect, de chacune des composantes d'un tel projet, qui permettra de garantir une étude adaptée aux besoins de l'humain et répondant à ces problématiques.

Soucieux de développer le transport de marchandises en centre urbain pour que celui-ci s'intègre dans la démarche de développement social, économique et écologique des villes, le projet SURATRAM (Système Urbain et Rural Autonome de TRansport de Marchandises) innove en promouvant le transport de marchandises tout électrique et autonome, couplé aux dernières avancées de la logistique urbaine. Le projet SURATRAM pose les bases d'un nouveau système de transport intelligent de marchandises à destination des habitants des centres urbains et péri-urbains, ainsi que des professionnels opérant dans ce secteur. Ce nouveau système est dit complexe, car il repose sur plusieurs couches de briques technologiques. La couche de base étant identifiée comme la couche élémentaire, faisant intervenir les différentes technologies clefs du projet (véhicule électrique, véhicule autonome, etc.), suivie de la couche intermédiaire qui permet l'interconnexion du système, et enfin on retrouve une dernière couche, identifiée comme couche de haut niveau, laquelle ayant affaire à la gestion de l'information et à la prise de décision.

En abordant le transport de marchandises, en zone urbaine et péri-urbaine, sous l'angle des Systèmes de Transport Intelligent (STI), on cherche à développer une vision systémique du domaine afin de prendre en compte l'ensemble des sous-systèmes avec lesquels il interagit directement ou indirectement. L'objectif, derrière cette approche, est de pouvoir optimiser le transport de marchandises en ayant une connaissance globale du système, et non seulement centrée sur un aspect donné. Ainsi, avant de pouvoir prendre une décision, quant à l'optimisation du système, il faut que chacune des briques technologies de la couche élémentaire assure un bon fonctionnement.

Pour cela, c'est un ensemble de trois briques qui forme la couche élémentaire et qui, pour chacune, va permettre de lever les verrous scientifiques identifiés qui leur sont associés. On retrouve, tout d'abord, la brique d'optimisation qui a pour but d'incorporer l'aspect véhicule électrique en intégrant ses caractéristiques intrinsèques dans le processus d'optimisation et non plus calquer son utilisation sur celle du véhicule thermique, ce qui était fait jusqu'à présent dans la bibliographie. De plus, ce processus d'optimisation devra également intégrer l'aspect véhicule autonome. On retrouve ensuite la brique consacrée à la technologie électrique des véhicules utilisés. Cette brique, en se basant sur les résultats de la brique d'optimisation, doit permettre de proposer une méthode de dimensionnement qui permette d'exploiter au mieux le(s) problème(s) type(s) de livraison et d'enlèvement identifiés, tout en respectant les caractéristiques intrinsèques des batteries lithium. Pour finir, la brique dédiée à la technologie des véhicules autonomes doit permettre de poser les bases d'une solution de test pour la caractérisation des algorithmes en condition réelle. Pour cela, la solution de test développée prend la forme d'un simulateur de réalité mixte permettant de déployer un véhicule réel dans un environnement virtuel reproduisant le plus fidèlement possible un environnement réel.

Le chapitre 3 de cette thèse a été consacré aux besoins de dynamique, nécessaire au processus de livraison et d'enlèvement des marchandises. En effet, l'application proposée devant être capable de s'adapter aux aléas du système routier d'une ville, les véhicules doivent être dotés d'une capacité d'adaptation pour pouvoir réévaluer leur trajet, si nécessaire, entre eux et le prochain point à visiter. Le processus d'optimisation proposé étant basé sur l'utilisation d'algorithme de colonie de fourmis (ACO), l'objectif a donc été de trouver un moyen permettant de s'assurer de la convergence d'un tel algorithme, sans la supervision d'un humain.

Concernant la méthode proposée, nous avons souhaité explorer la question suivante : Quelle influence peut avoir l'environnement sur les éléments qui évoluent en son sein. De quelle manière l'environnement, la jungle par exemple, va indirectement ou directement influencer une fourmi pour que celle-ci emprunte un chemin plutôt qu'un autre, ou dans le cas qui nous intéresse, quelle caractéristique d'un environnement virtuel peut être considérée comme vecteur de convergence pour notre algorithme d'ACO.

Pour répondre à cette question, des expérimentations ont été menées dans la section 3.3.4.2 pour chercher à identifier quels critères d'un environnement virtuel pourraient être vecteurs de convergence, dans l'objectif de développer une méthode bio-inspirée, basée sur l'influence de l'environnement, permettant de déterminer le critère de terminaison d'un ACO, tout en garantissant la qualité de la solution trouvée. Les expérimentations menées ont été réalisées sur des graphes représentant le type de problème que l'on cherche à adresser avec notre nouvelle méthode. Ainsi, nous avons pu montrer que pour les ACO, implémentés dans ce cas précis, le taux de connexion moyen d'un graphe est vecteur de convergence.

Pour conclure, notre méthode, outre le fait qu'elle ait permis de valider notre hypothèse quant à l'influence de l'environnement comme vecteur de convergence pour les algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis, cette dernière a permis de compléter l'approche bio-inspirée mise en place par Dorigo à la création des colonies de fourmis artificielles.

Le chapitre 4 de cette thèse fut consacré au processus d'optimisation en lui-même, ainsi que son lien direct avec la batterie lithium d'un véhicule électrique, pour une bonne utilisation de cette dernière. Pour cela, la première partie de ce chapitre fut spécifiquement dédiée à la variante d'algorithme d'optimisation de tournée, développée pour le projet SURATRAM. Cette variante permettant d'intégrer les caractéristiques intrinsèques des véhicules électriques dans le processus d'optimisation, pour tenir compte du vieillissement des batteries des véhicules électriques, qui, selon les recherches effectuées, n'est actuellement pas traité dans la littérature scientifique actuelle. De plus, est également couplé à cette nouvelle variante, l'utilisation de véhicules autonomes, amenant à un changement de paradigme quant au temps de trajet maximal autorisé d'une tournée, ainsi

que sa distance maximale. Pour finir, la deuxième partie, quant à elle, fut dédiée à la réutilisation des résultats de la première partie, pour offrir un dimensionnement de batterie lithium de véhicule électrique qui permette de couvrir les problèmes types de tournée de véhicule rencontrés, tout en garantissant la meilleure utilisation possible de la batterie.

Pour répondre aux besoins du projet en termes d'optimisation et qui intègrent l'ensemble des **briques technologiques** précédemment citées, le **processus d'optimisation** de tournée mis en place intègre au problème de tournée de véhicules électriques (EVRP), **une dimension autonome**, ainsi que la prise en compte du **phénomène de dégradation interne des batteries**, au sein d'une nouvelle variante baptisée **Electric Health Autonomous Capacited Load Vehicle Routing Problem (EHACLVRP)**. Cette nouvelle variante tenant également compte de la distance, du temps et du volume de marchandises transporté, caractérisant une application de livraison de marchandises de dernier kilomètre.

Au travers des résultats obtenus, nous avons pu montrer que le vieillissement des batteries au lithium est un point clé pour une bonne intégration de la technologie des véhicules électriques dans le domaine du transport de marchandises, et que considérer l'importance du vieillissement amène non seulement à prolonger la durée d'un véhicule, mais également à bénéficier d'un impact concurrentiel indéniable vis-à-vis des autres transporteurs du secteur, d'un point de vue écologique, d'image de marque, mais plus important encore, financier.

De plus, considérer une stratégie de DOD (Depth Of Discharge) impliquant l'utilisation d'un faible pourcentage de la plage de capacité énergétique disponible, couplée à un dimensionnement adapté au problème étudié, a été identifiée comme la méthode à employer pour maximiser la durée de vie d'un véhicule électrique. De par les résultats obtenus, dans les conditions données, maximiser la durée de vie d'une batterie électrique au lithium a permis de passer d'un remplacement tous les ans, à un remplacement tous les 18 ans. Bien entendu, cette augmentation de la capacité énergétique d'une batterie à un coût, nécessitant de multiplier par 5 uniquement le prix de la batterie. Néanmoins, cette augmentation du prix de la batterie due au dimensionnement proposé, pouvant être rentabilisé sur 18 ans, ne représente pas un impact majeur pour une entreprise de transport de marchandises.

Pour conclure, la "surconsommation" de matières premières, que l'on met en avant de par notre méthode de dimensionnement de véhicule, est dans notre cas préférable pour une gestion durable et de long terme, des ressources naturelles. On peut ajouter à cela que la batterie que nous proposons de déployer se dégrade très lentement, étant donné que l'on intègre à son utilisation la minimisation du facteur de vieillissement. Cette considération a un deuxième effet positif, permettant de favoriser la seconde vie de la batterie.

Le chapitre 5 de cette thèse a concerné le développement de la solution de test en réalité mixte, permettant d'éprouver et de valider le comportement de véhicules autonomes en milieu urbain. Un tel système, comme celui du projet SURATRAM, évoluant à un tel niveau d'autonomisation doit pouvoir être testé et mis en condition pour être validé avant toute mise en circulation sur un système de transport public ou sur un système routier. L'ensemble des interactions du système, qu'elles soient humain/machine, machine/machine, machine/système, doivent également pouvoir être modélisées et validées avant toute mise en place de tests en condition réelle dans l'aire urbaine. De plus, outre les interactions, le comportement du véhicule, induit par des algorithmes tels que celui de l'accroche immatérielle ou celui de la conduite en convoi, se doit d'être testé et validé.

Au travers des expérimentations mises en place et des résultats obtenus, nous avons pu juger des performances de la solution de test de type Vehicle in the Loop (ViL) proposée, visant à éprouver le comportement d'un véhicule autonome, en simulant son évolution dans un environnement urbain simulé. Étant donné les résultats obtenus aux différentes expérimentations mises en place, la solution de test développée offre bien un cadre de test et de validation adaptés, permettant à un véhicule physique (réel) de se déplacer tout en suivant un véhicule virtuel. Cependant, il est important de ne pas oublier de considérer ce projet de recherche comme une preuve de concept. Ainsi, celle-ci souffre de défauts tels que ceux concernant les temps de transfert qui, pour l'instant, ne répondent pas à des critères de performance temps réel, nécessaires à des tests de véhicules autonomes en condition réelle, ou encore la déviation de la position du véhicule virtuel au sein de son environnement virtuel. Toutefois, pour chacune des limitations techniques rencontrées, une analyse complète a été proposée et un ensemble de solution concret a été identifié pour pallier les limitations techniques. L'ensemble de ces solutions ouvre la voie à de futurs travaux de recherche pour proposer une version plus aboutie de la solution de test Vehicle in the Loop (ViL) proposée.

## 6.2 Perspectives

Le projet de recherche SURATRAM est un projet de recherche vaste et ambitieux, qui ne peut pas être uniquement couvert dans le cadre d'une seule thèse. Chaque chapitre, présenté lors de cette thèse, aurait pu faire l'objet d'une thèse à part entière. Ainsi, des perspectives de travaux de recherche sont à considérer pour chacune des problématiques soulevées dans chacun de ces derniers. De plus, de par l'aspect système intégratif, introduit par l'utilisation des Systèmes de Transport Intelligent (STI), un aspect résultant n'a pas pu être abordé durant cette thèse : la remontée d'information pour la prise de décision.

Concernant le chapitre 3, les travaux menés sont nés d'une intuition, quant au moyen de répondre à un besoin identifié durant le développement de notre application d'optimisation de transport de marchandises en zone urbaine. La méthode proposée n'est pas une démonstration rigoureuse d'une propriété de l'algorithme utilisé, mais cherche au contraire à éprouver une intuition pour résoudre un problème dans un contexte donné. Ainsi, l'expérimentation menée ne permet donc pas de conclure sur le caractère général de notre solution. En conséquent, pour que notre nouvelle méthode puisse être considérée comme utilisable pour tout type de problème complexe résolu via l'utilisation d'algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis, il sera nécessaire de mettre en place un plan d'expérimentation complet et rigoureux permettant de démontrer le caractère universel, ou non, la solution proposée.

Concernant le chapitre 4, pour chacun des graphes considérés dans notre expérimentation et en analysant le coût énergétique par point de livraison, on constate que l'énergie nécessaire, pour visiter un point de livraison dans un graphe, est fonction de la taille du graphe considéré, selon le modèle trouvé. Cet élément ouvre la voie à des travaux de recherche futurs concernant le dimensionnement d'une flotte de véhicules électriques et autonomes de capacité énergétique hétérogène. En outre, ayant intégré le phénomène de vieillissement des batteries au processus d'optimisation, l'état de santé de la batterie (SOH) de chacun des véhicules est donc connu et suivi. L'introduction d'une flotte de véhicules électriques dans le processus implique donc aussi de pouvoir être capable de gérer une flotte dont l'état de santé des batteries est non homogène.

Concernant le chapitre 5, nous l'avons conclu, une remise à plat complète de sa conception sera une étape obligatoire dans tous futurs travaux de recherche, pour permettre des gains notables en termes de performance et de fiabilité. En outre, on rappelle, la solution de test développée dans ce chapitre utilise un modèle réduit de véhicule autonome. Un futur travail de recherche, conséquent, sera de porter le projet sur un véhicule autonome à taille réelle. Pour cela, le projet SURATRAM se propose d'exploiter un véhicule électrique de la marque Hyundai, le modèle KONA électrique, qui a été entièrement robotisé, par l'entreprise FAAR Pronergy. Le véhicule permettra de passer aux tests en conditions réelles, dans un premier temps sur circuit, puis lorsque le comportement du véhicule aura été certifié, en conditions réelles, sur le système de transport public de la ville de Belfort, en suivant l'un de ses bus.

Concernant le processus de prise de décision. Le chapitre 3 et 4 ont permis d'établir et identifier l'ensemble des verrous techniques à lever pour assurer la livraison des marchandises dans l'aire urbaine. Nous l'avons introduit, le projet SURATRAM se propose également de traiter de l'enlèvement de marchandises dans l'aire urbaine, qui plus est, de manière dynamique, lors de la tournée des véhicules de la flotte. Pour cela, une perspective de recherche future sera de concevoir un modèle de prise de décision, permettant de dérouter le véhicule de la flotte le plus à même de réaliser l'enlèvement des marchandises identifiées. De plus, ce modèle, toujours dans cette vision systémique traitée tout au long de cette thèse, devra intégrer les critères intrinsèques des briques élémentaires de l'application.

# Bibliographie

- [1] T. Abdallah. The plug-in hybrid electric vehicle routing problem with time windows. *Master Thesis*, 2013.
- [2] E. ABOULKACEN and E. COMBES. Le véhicule autonome va-t-il transformer en profondeur le transport de marchandises? *IFSTTAR/AME/SPLOTT - Systèmes Productifs, Logistique, Organisation des Transports et Travail*, 2019.
- [3] A. Afshar and M. Shahrbanou. Ant colony optimization for continuous domains : Application to reservoir operation problems. In *a*, pages 13–18, 10 2008.
- [4] H. Al jed. *Influence de la recharge rapide sur les performances des accumulateurs lithium des véhicules électriques dans le cadre de l'utilisation postale*. Theses, Université de Bordeaux, 2014.
- [5] S.S. Amiri, S. Jadid, and H. Saboori. Multi-objective optimum charging management of electric vehicles through battery swapping stations. *Energy*, 165 :549–56, 2018.
- [6] A. Artmeier, J. Haselmayr, M. Leucker, and M. Sachenbacher. The shortest path problem revisited : optimal routing for electric vehicles,” in *ki 2010 : Advances in artificial intelligence*. Springer, page 309–316, 2010.
- [7] Kate A.S.M., J. W. Ross, G.W. John, and T. Yiqing. A knowledge discovery approach to understanding relationships between scheduling problem structure and heuristic performance. In Thomas Stützle, editor, *Learning and Intelligent Optimization*, pages 89–103, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg.
- [8] J. Barco, A. Guerra, L. Munoz, and N. Quijano. Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles : Case study. *CoRR* <https://arxiv.org/abs/1310.0145>, 2013.
- [9] J. Barco, A. Guerra, L. Munoz, and N. Quijano. Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles : Case study. <https://arxiv.org/abs/1310.0145>, 2013.
- [10] R. Baruffa, J. Pereira, P. Romet, F. Gechter, and T. Weiss. Mixed reality autonomous vehicle simulation : Implementation of a hardware-in-the-loop architecture at a miniature scale. *SIMUL*, 2020.
- [11] E Bekiaris and Y. Nakanishi. Economic impacts of intelligent transportation systems : Innovations and case studies. *Research in transportation economics*, 2004.
- [12] L. Bianchi, L.M. Gambardella, and M. Dorigo. An ant colony optimization approach to the probabilistic traveling salesman problem. In *7th International Conference, Parallel Problem Solving from Nature*, volume 2439, pages 883–892, 09 2002.
- [13] M. Birattari, P. Balaprakash, and M. Dorigo. Aco/f-race : Ant colony optimization and racing techniques for combinatorial optimization under uncertainty. *Metaheuristics*, 04 2005.
- [14] D. Bloch, T. Priem, S. Martinet, and C. Ngo. *Batterie Li-ion, du présent au futur*. EDP Science, 2020.
- [15] T. Bokc, M. Maurer, and G. Farber. Validation of the vehicle in the loop (vil) ; a milestone for the simulation of driver assistance systems. In *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 612–617, 2007.
- [16] B.E. Borders, W.M. Harrison, M.L. Clutter, B.D. Shiver, and R.A. Souter. The value of timber inventory information for management planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008.
- [17] K. Braekers, K. Ramaekers, and I. Van Nieuwenhuysse. The vehicle routing problem : State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 2016.

- [18] J. Branke and M. Guntsch. New ideas for applying ant colony optimization to the probabilistic tsp. In *Proceedings of the 2003 International Conference on Applications of Evolutionary Computing, EvoWorkshops'03*, page 165–175, Berlin, Heidelberg, 2003. Springer-Verlag.
- [19] O. Braysy and M. Gendreau. Vehicle routing problem with time windows, part i : route construction and local search algorithms. *Transportation Science*, 39(1) :104–118, 2005.
- [20] U. Breunig, R. Baldacci, R. Hartl, and T. Vidal. The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 103 :198–210, 2019.
- [21] R. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(1) :14–23, 1986.
- [22] M. Bruglieri, F. Pezzella, O. Pisacane, and S. Suraci. A matheuristic for the electric vehicle routing problem with time windows. <https://arxiv.org/abs/1506.00211>, 2015.
- [23] M. Bruglieri, F. Pezzella, O. Pisacane, and S. Suraci. A matheuristic for the electric vehicle routing problem with time windows,. <https://arxiv.org/abs/1506.00211>, 2015.
- [24] B. Bullnheimer, F. Richard, and C. Strauss. A new rank based version of the ant system : A computational study. In *Central European Journal of Operations Research*, 1997.
- [25] S. Bura, A. Drogoul, J. Ferber, and E. Jacopin. Eco-résolution : un modèle de résolution par interactions. *AF CET-RFIA*, 1991.
- [26] M. Butenuth, R. Kallweit, and P. Prescher. Vehicle-in-the-loop real-world vehicle tests combined with virtual scenarios. *ATZ worldwide*, 119 :52–55, 09 2017.
- [27] G.D. Caro, F. Ducatelle, and L.M. Gambardella. *AntHocNet : an adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks*. European Transactions on Telecommunications, 2005.
- [28] B. Catay and M. Keskin. The impact of quick charging stations on the route planning of electric vehicles. in *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2017.
- [29] V. Cerny. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45 :41–51, 1985.
- [30] I.Y.H. Chen, B. MacDonald, and B. Wunsch. Mixed reality simulation for mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, page 232–237, 2009.
- [31] T. Chira-Chavala and S.M. Yoo. Potential safety benefits of intelligent cruise control systems. *Accident Analysis and Prevention*, 1994.
- [32] H.K.H. Chow, K.L. Choy, W.B. Lee, and K.C. Lau. Design of a rfid case-based resource management system for warehouse operations. *Expert Systems with Applications*, 2006.
- [33] H.K.H. Chow, K.L. Choy, W.B. Lee, and K.C. Lau. Design of a rfid case-based resource management system for warehouse operations. *Expert Systems with Applications*, 2006.
- [34] Z. Christoph, P. Manfred, and J. Edelmann. Modelling, validation and characterisation of high-performance suspensions by means of a suspension test rig. *International Journal of Vehicle Design*, 2019.
- [35] G. Clarke and J. W. Wright. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 1964.
- [36] C. Combe and C. Maisonneuve. Quand le numérique aggrave la congestion ou les paradoxes de la modernité. <https://www.lafabriquedelacite.com/publications/quand-le-numerique-aggrave-la-congestion-ou-les-paradoxes-de-la-modernite/>, Février 2019.
- [37] R.G. Conrad and M. Figliozzi. The recharging vehicle routing problem. in *Proceedings of the 61st Annual Conference and Expo of the Institute of Industrial Engineers*, 2011.
- [38] J. Contet. Modèles multi-agents réactifs pour la navigation multi-véhicules : spécification formelle et vérification. *Thèse UTBM*, 2009.
- [39] A.E. Coronado Mondragon, C.S. Lalwani, E.S. Coronado Mondragon, C.E. Coronado Mondragon, and Pawar ; K.S. Intelligent transport systems in multimodal logistics : A case of role and contribution through wireless vehicular networks in a sea port location. *International Journal of Production Economics*, 2012.

- [40] T.G. Crainic, M. Gendreau, and J. Potvin. Intelligent freight transportation systems : Assessment and the contribution of the operations research. *Transportation Research Part C*, 2009.
- [41] B. Dafflon. Modèle multi-agents d’inspiration physique pour la prise de décision. *Thèse UTBM*, 2014.
- [42] G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 1954.
- [43] G. B. Dantzig and J. H. Ramser. The truck dispatching problem. *Management science*, 1959.
- [44] Ministère de l’économie des finances et de la relance. Eureka. <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/numerique/ressources/eureka>, 2021.
- [45] Université de Pau. Décharge de la batterie, 2018.
- [46] J. Decerle. Contribution à l’optimisation de la planification des tournées de soins pour l’hospitalisation à domicile. *Thèse UTBM*, 2019.
- [47] E. Demir, T. Bektas, and G. Laporte. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 223,(2) :346–359, 2012.
- [48] E. Demir, T. Bektas, and G. Laporte. The bi-objective pollution routing problem. *European Journal of Operational Research*, 232(3) :464–478, 2014.
- [49] E. den Boer, S. Aarnink, F. Kleiner, and J. Pagenkopf. An overview of state-of-the-art technologies and their potential. [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/CE\\_Delft\\_4841\\_Zero\\_emissions\\_trucks\\_Def.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/CE_Delft_4841_Zero_emissions_trucks_Def.pdf), 2013.
- [50] J.L. Deneubourg, A. Serge, S. Goss, and J. Pasteels. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *J. Insect Behav.*, 3 :159, 03 1990.
- [51] G. Desaulniers, F. Errico, S. Irnich, and S. Schneider. Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Operations Research*, 64(6) :1388–1405, 2016.
- [52] Dicolatin. Legere : Definition. <https://www.dicolatin.com/Latin/Lemme/0/LEGERE/index.html>, 2022.
- [53] A. Diewald, C. Kurz, P.V. Kannan, M. Gießler, M. Pauli, B. Göttel, T. Kayser, F. Gauterin, and T. Zwick. Radar target simulation for vehicle-in-the-loop testing. *Vehicles*, 2021.
- [54] E.W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 10(1) :269–271, 1977.
- [55] C. Doppstadt, A. Koberstein, and D. Vigo. The hybrid electric vehicle – traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 253(3) :825–842, 2016.
- [56] C. Doppstadt, A. Koberstein, and D. Vigo. The hybrid electric vehicle – traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 253(3) :825–842, 2016.
- [57] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle. Ant colony optimization : artificial ants as a computational intelligence technique. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1 :28–39, 2006.
- [58] M Dorigo, G. Di, Caro, and L.M. Gambardella. Ant algorithms for discrete optimization. *Artif Life*, 1999.
- [59] M. Dorigo and L.M. Gambardella. Ant colony system : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 1 :53–66, 1997.
- [60] M. Dorigo and L.M. Gambardella. Gambardella, l.m. : Ant colony system : A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *iee tr. evol. comp.* 1, 53-66. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 1 :53 – 66, 05 1997.
- [61] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colnari. Ant system : optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1) :29–41, 1996.
- [62] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colnari. Ant system : optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1) :29–41, 1996.
- [63] M. Dorigo and T. Stutzle. *The Ant Colony Optimization Metaheuristic : Algorithms, Applications, and Advances*, pages 250–285. Springer US, Boston, MA, 2003.

- [64] M. Dorigo and T. Stützle. *Ant Colony Optimization*. MIT press, 2004.
- [65] M. Dorigo, M. Vittorio, and A. Colorni. Positive feedback as a search strategy. *Tech rep., 91-016, Dip Elettronica, Politecnico di Milano, Italy*, 04 1999.
- [66] H. Dreyfus. *What Computers can't do : a Critique of Artificial Reason*. The MIT Press, 1979.
- [67] Parlement Européen du conseil. Directive 2010/40/ue du parlement européen et du conseil du 7 juillet 2010 concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0040>, Juillet 2010.
- [68] X. Duan, J. Cheng, L. Zhang, Y. Xing, Z. Chen, and Z. Zhao. X-ray cargo container inspection system with few view projection imaging. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009.
- [69] M. Dubarry, G. Baure, and D. Anseán. Perspective on State-of-Health Determination in Lithium-Ion Batteries. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 17(4), 03 2020. 044701.
- [70] Y. Dubois. La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée– de marc wiel. *Forum Vies Mobiles*, décembre 2012.
- [71] R. Ducret. Livraison de colis et logistique urbaine : quelles recompositions de la messagerie en milieu urbain? *Revue française de gestion industrielle*, 2012.
- [72] GF. DUMONT and L. CHALARD. Croissance et décroissance des villes françaises. la typologie des évolutions démographiques. *Population & Avenir*, 2010/4 (n° 699), 2010.
- [73] B. Durand and J. Gonzalez-Feliu. Logistique urbaine, durabilité et efficacité dans une perspective d'utilité collective. *Logistique & Management*, 23(1) :3–5, 2015.
- [74] E. Durr and G.A. Giannopoulos. Sits : A system for uniform intermodal freight transport information exchange. *International Journal of Transport Management*, 2003.
- [75] J.F. Ehmke, A. Steinert, and D.C. Mattfeld. Advanced routing for city logistics service providers based on time-dependent travel times,. *Journal of Computational Science*, 3(4) :193–205, 2012.
- [76] J. EHRLICH. Véhicule autonome et connecté - technologies, enjeux et déploiement. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/ingenierie-des-transportsth14/systemes-de-transport-intelligents-42575210/vehicule-autonome-et-connecte-trp1012/>, 2021.
- [77] J. Eisner, S. Funke, and S. Storandt. Optimal route planning for electric vehicles in large networks. in *Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 11 :1108–1113, 2011.
- [78] MA. EMMELHAINZ. Electronic data interchange. *New York*, 1990.
- [79] Larousse en ligne. Vieillesse : Définition. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/vieillesse/81927>, 2022.
- [80] EPFL. City alternative transport system – cats. <https://www.epfl.ch/research/domains/transportation-center/research-overview/mobility-analysis-social-behavior/urban-and-suburban-mobility/cats-city-alternative-transport-system/>, 2014.
- [81] T. Erdelic, M. Ravlic, and T. Caric. Travel time prediction using speed profiles for road network of croatia. in *Proceedings of the International Symposium ELMAR*, page 97–100, 2016.
- [82] T. Erdelić and T. Caric. A survey on the electric vehicle routing problem : Variants and solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019 :1–48, 05 2019.
- [83] S. Erdogan and E. Miller-Hooks. A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 48(1) :100–114, 2012.
- [84] COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. Plan d'action pour le déploiement de systèmes de transport intelligents en europe. *COMMUNICATION DE LA COMMISSION*, 2008.

- [85] ev specifications. Tesla model s 90d - specification. <https://www.evspecifications.com/en/model/7f5a49>, 2017.
- [86] Code Examples. c - sockets.net vs sockets c++ à haute performance. <https://code-examples.net/fr/q/812ccf>, 2022.
- [87] C.J. Eyckelhof and M. Snoek. Ant systems for a dynamic tsp - ants caught in a traffic jam. *Lecture Notes in Computer Science*, pages 88–99, 2002.
- [88] S.A. Fayazi and A. Vahidi. Vehicle-in-the-loop (vil) verification of a smart city intersection control scheme for autonomous vehicles. In *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, pages 1575–1580, 2017.
- [89] A. Felipe, M.T. Ortuno, G. Righini, and G. Tirado. A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 71 :111–128, 2014.
- [90] J. Ferber. La kenetique : des systemes multi-agents a une science de l’interaction. *Revue internationale de systemique*. 8(1), p. 13-27., 1994.
- [91] J. Ferber. *Vers une intelligence collective*,. Addison-Wesley, 1995.
- [92] P. Fontaine, T. Gabriel Crainic, O. Jabali, and W. Rei. Scheduled service network design with resource management for two-tier multimodal city logistics. *European Journal of Operational Research*, 294(2) :558–570, 2021.
- [93] Berkly California Partners for Advanced Transportation Technology. National automated highway systems consortium. <https://path.berkeley.edu/research/connected-and-automated-vehicles/national-automated-highway-systems-consortium>, 1997.
- [94] Atec ITS France. Atec its france. <https://atec-its-france.com/>.
- [95] A. Froger, J.E. Mendoza, O. Jabali, and G. Laporte. A matheuristic for the electric vehicle routing problem with capacitated charging stations. <https://www.cirrelet.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2017-31.pdf>, 2017.
- [96] A. Froger, J.E. Mendoza, O. Jabali, and G. Laporte. Improved formulations and algorithmic components for the electric vehicle routing problem with nonlinear charging functions. *Computers & Operations Research*, 104 :256–294, 2019.
- [97] T. Gabriel Crainic, M. Gendreau, and J.Y. Potvin. Intelligent freight-transportation systems : Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 17(6) :541–557, 2009.
- [98] F. Gaffiot. Dictionnaire latin français, page 837 colonne i. Hachette, 1934.
- [99] F. Gaffiot. Dictionnaire latin français,, page 898 colonne i. Hachette, 1934.
- [100] Y. Gajpal and P. Abad. An ant colony system (acs) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup. *Computers & Operations Research*, 36(12) :3215 – 3223, 2009. New developments on hub location.
- [101] L.M. Gambardella and M. Dorigo. Ant-q : A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Machine Learning*, pages 252–260, 01 1995.
- [102] L.M. Gambardella and M. Dorigo. Solving symmetric and asymmetric tsps by ant colonies. In *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pages 622–627, 1996.
- [103] M.R. Garey and D.S. Johnson. *Computers and Intractability - A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman, W.H. and Company, 1979.
- [104] F. Gechter, El-H. Aglzim, S. Sidi-Mohammed, N. Rodet-Kroichvili, C. Cappelle, and D. Fass. Transportation of goods in inner-city centers : Can autonomous vehicles in platoon be a suitable solution? In *IEEE-VPPC 2017 - Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1–5, 12 2017.
- [105] D.C. Gianni and M. Dorigo. Antnet : Distributed stigmergetic control for communications networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 9, 01 1999.
- [106] G.A. Giannopoulos. The application of information and communication technologies in transport. *European Journal of Operational Research*, 2004.

- [107] R. Gilleron. Notion d'intelligence, analyse et test. Edition Ellipse, 2019.
- [108] F.W Glover. Tabu search - part i. *INFORMS J. Comput.*, 1 :190–206, 1989.
- [109] D. Goeke and M. Schneider. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1) :81–99, 2015.
- [110] A. Gohar and N. Gianfranco. The role of 5g technologies in a smart city : The case for intelligent transportation system. *Sustainability*, 13(9), 2021.
- [111] F. Goncalves, S. Cardoso, and S. Relvas. Optimization of distribution network using electric vehicles : A vrp problem. *CEG-IST - Technical Report*, 2011.
- [112] S. Goss, S. Aron, J.L. Deneubourg, and J. Pasteels. Self-organized shortcuts in the argentine ant. *naturwissenschaften* 76 : 579-581. *Naturwissenschaften*, 76 :579–581, 12 1989.
- [113] P. P. Grasse. *Les Insectes Dans Leur Univers*. Ed. Du Palais de la decouverte, 1946.
- [114] P. P. Grasse. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez bellicositermes natalensis et cubitermes sp. la theorie de la stigmergie : Essai d'interpretation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux, vol. 6, pp. 41–81*, 1959.
- [115] W.J. Gutjahr. A converging aco algorithm for stochastic combinatorial optimization. In *SAGA*, 2003.
- [116] M. Gérard and M. Christophe. *Environnement - Ingénierie bio-inspirée - Principes et transition énergétique*. Ellipse, 2018.
- [117] E. Hache, C. Ternel, and L. Aissaoui. Intelligent transport system and mobility 30 : definition, challenges and players. *Panorama*, 2018.
- [118] M. E. Hallenbeck, E. McCormack, J. Nee, and D. Wright. Freight data from intelligent transportation system devices. *The Center.*, 2003.
- [119] B.C. Hardgrave, J. Aloysius, and S. Goyal. Does rfid improve inventory accuracy? a preliminary analysis. *International Journal of RF Technologies : Research and Applications*, 2009.
- [120] R.L. Helena, C.M. Olivier, and T. Stutzle. *Iterated Local Search*, pages 320–353. Springer US, Boston, MA, 2003.
- [121] G. Hiermann, R.F. Hartl, J. Puchinger, and T. Vidal. Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272(1) :235–248, 2019.
- [122] G. Hiermann, R.F. Hartl, J. Puchinger, and T. Vidal. Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272,(1) :235–248, 2019.
- [123] G. Hiermann, J. Puchinger, S. Ropke, and R.S. Hartl. The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *European Journal of Operational Research*, 252(3) :995–1018, 2012.
- [124] J. Hof, M. Schneider, and D. Goeke. Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an avns algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops. *Transportation Research Part B : Methodological*, 2017.
- [125] C. Hsu, I. Shih, H. H., and W. C. Wang. Applying rfid to reduce delay in import cargo customs clearance process. *Computers and Industrial Engineering*, 2009.
- [126] W. Huang, K. Wang, Y. Lv, and F. Zhu. Autonomous vehicles testing methods review. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 163–168, 2016.
- [127] A. Hussein, F. Garcia, and C. Olaverri-Monreal. Ros and unity based framework for intelligent vehicles control and simulation. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2018.
- [128] Inria. Véhicules autonomes et connectés. *Livre blanc Inria*, 2019.
- [129] INSEE. Transport de marchandises : définition. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2039>, novembre 2020.
- [130] INSEE. Prix moyens mensuels de vente au détail en métropole - gazole (1litre). <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000442588#Graphique>, Avril 2022.

- [131] ISO. Iso/tc 266. <https://www.iso.org/fr/committee/652577.html>, 2011.
- [132] ISO. Road vehicles — functional safety — part 1 : Vocabulary. <https://www.iso.org/standard/43464.html>, 2011.
- [133] ISO. Iso-14813, 2015.
- [134] B. Jacob and F. La Beaumelle. Improving truck safety : Potential of weight in-motion technology. *IATSS Research*, 2010.
- [135] S. Jan Erik, M.R. Zofka, J.S.T. Schumacher, F. Niewels, and J.M. Zöllner. Testing of advanced driver assistance towards automated driving : A survey and taxonomy on existing approaches and open questions. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 1455–1462, 2015.
- [136] Adler ; J.D. and Mirchandani ; P.B. Online routing and battery reservations for electric vehicles with swappable batteries. *Transportation Research Part B : Methodological*, 70 :285–302, 2014.
- [137] R. Jedermann, C. Behrens, D. Westphal, and W. Lang. Applying autonomous sensor systems in logistics—combining sensor networks, rfids and software agents. *Sensors and Actuators A : Physical*, 2006.
- [138] W. Jie, J. Yang, M. Zhang, and Y. Huang. The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations : formulation and efficient methodology. *European Journal of Operational Research*,, 272(3) :879–904, 2019.
- [139] D.B. Johnson. Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks. *Journal of the ACM*, 24(1) :1–13, 1977.
- [140] D.S. Johnson and L.A. McGeoch. The traveling salesman problem : A case study in local optimization. In *Local Search in Combinatorial Optimization*, 2008.
- [141] AA. Juan, CA. Mendez, J Faulin, J. Armas, and J. Grasman. Electric vehicles in logistics and transportation : A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. *Energies*, 2016.
- [142] N. Kalra and S.M. Paddock. Driving to safety : How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 94 :182–193, 2016.
- [143] I.B.G. Karl, F. Ruger, and F. Berthold. Driving behavior and simulator sickness while driving the vehicle in the loop : Validation of longitudinal driving behavior. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 5(1) :42–57, 2013.
- [144] SMM. Kate, J. van Hemert, and L. Xin Yu. Understanding tsp difficulty by learning from evolved instances. In Christian Blum and Roberto Battiti, editors, *Learning and Intelligent Optimization*, pages 266–280, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer Berlin Heidelberg.
- [145] M. Keskin and B. Catay. Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 65 :111–127, 2016.
- [146] M. Keskin and B. Catay. A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers. *Computers & Operations Research*, 2018.
- [147] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598) :671–680, 1983.
- [148] U. Kohler. An innovating concept for city-logistics. *MOBILITY FOR EVERYONE. 4TH WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS*, 1997.
- [149] P. Kompfner, P. Saleh, N. Hoose, and M. Annoni. Cooperative vehicle-infrastructure systems (cvis), deployment roadmap. *IST-2004-2.4.12 eSafety – Cooperative systems for road transport*, 2010.
- [150] N. Kumar and N. Kumari. Conceptual architectural design of indian railway intelligent transportation systems. *Communication Technologies for Vehicles*, 2012.
- [151] Sandia National Lab. Data for degradation of commercial lithium-ion cells as a function of chemistry and cycling. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/abae37>, 2020.
- [152] Larousse. Petit larousse illustré, librairie larousse. page 529, colonne ii, 1990.

- [153] Larousse. Dictionnaire erudit de la langue française, page 969, 2009.
- [154] B Latour. *La science en action : Introduction à la sociologie des sciences*. Éd. La Découverte, 1989.
- [155] E.L. Lawler, J.K. Lenstra, A.H.G Rinnooy Kan, and D. B. Shmoys. *The Traveling Salesman Problem : A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Wiley, 1991.
- [156] J.F. Lawrence, A. J. Owens, and M.J. Walsh. Artificial intelligence through simulated evolution. In *Biology*, 1966.
- [157] O. Lazzari. Les accumulateurs lithium-ion au japon. *Ambassade de France au Japon Service pour la Science et la Technologie*, 2006.
- [158] P. Lebeau, C. De Cauwer, J. Van Mierlo, C. Macharis, W. Verbeke, and T. Coosemans. Conventional, hybrid, or electric vehicles : which technology for an urban distribution centre ? *The Scientific World Journal*, 2015.
- [159] J. K. Lenstra and A. Kan. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 1981.
- [160] D. Lestel. *Contribution a l'étude du raisonnement experimental dans un domaine semantiquement riche*. ANRT, 1988.
- [161] J.Q. Li. Transit bus scheduling with limited energy. *Transportation Science*, 48(4) :521–539, 2014.
- [162] Li LI, L. Yuan-an, and T. Bi-hua. Snms : An intelligent transportation system network architecture based on wsn and p2p network. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2007.
- [163] C. Liao, S. Lu, and Z.M. Shen. The electric vehicle touring problem. *Transportation Research Part B : Methodological*, 86 :163–180, 2016.
- [164] Le Robert DICO EN LIGNE. Dynamique : Definition. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/dynamique>, 2022.
- [165] M. Lindholm and M. Browne. Local authority cooperation with urban freight stakeholders : A comparison of partnership approaches. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 13 :20–38, 2013.
- [166] Lohr-Industrie. Navette cristal. <https://lohr.fr/fr/new-mobilities/>, 2021.
- [167] M. Lu, W. Chen, W. Shen, H.C. Lam, and J. Liu. Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction sites. *Automation in Construction*, 2007.
- [168] K. Lumsden, P. Roudolphe, and L. Sjöstedt. Information as a value adder for the transport user. *Division of Logistics and Transportation, Chalmers University of Technology*, 1997.
- [169] Schiffer. M., S. Stutz, and J. Walther. Are ecvs breaking even? competitiveness of electric commercial vehicles in medium duty logistics networks. *Technical Report Working Paper*, 2016.
- [170] G. Macrina, L.D.P. Pugliese, F. Guerriero, and G. Laporte. The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows. *Computers & Operations Research*, 101 :183–199, 2019.
- [171] S. Mancini. The hybrid vehicle routing problem. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 78 :1–12, 2017.
- [172] A. Marchal. Tesla semi : Essais en conditions réelles par tesla heavy trucking. <https://www.automobile-propre.com/breves/tesla-semi-essais-en-conditions-reelles-par-tesla-heavy-trucking/>, Avril 2021.
- [173] A. Marell and K. Westin. Intelligent transportation systems and traffic safety—drivers perception and acceptance of electronic speed checkers. *Transportation research Part C*, 1999.
- [174] J. Martinez-Lao, F.J. Montoya, M.G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro. Electric vehicles in spain : An overview of charging systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [175] J. Martinez-Lao, F.J. Montoya, M.G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro. Electric vehicles in spain : An overview of charging systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 77 :970–983, 2017.

- [176] M. Mavrovouniotis, G. Ellinas, and M. Polycarpou. Ant colony optimization for the electric vehicle routing problem. *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence SSCI*, 2018.
- [177] S. Mazzeo and I. Loiseau. An ant colony algorithm for the capacitated vehicle routing. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 18 :181 – 186, 2004.
- [178] Mercedes-Benz Group Media. 1986 : Start of the prometheus research program. <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko/1986-Start-of-the-PROMETHEUS-research-program.xhtml?oid=9913541>, Octobre 2007.
- [179] G. Michael and M. Middendorf. Pheromone modification strategies for ant algorithms applied to dynamic tsp. In *a*, volume 2037, pages 213–222, 01 2001.
- [180] J. Michelet. introduction à l’histoire universelle, tome i. Bruxelles, Meline, Cans et Compagnie., 1840.
- [181] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino. Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Photonics for industrial applications*, page 282–292., 1995.
- [182] S.H. Mirmohammadi, E.B. Tirkolaee, A. Goli, and S. DehnavinArani. The periodic green vehicle routing problem with considering of time-dependent urban traffic and time windows. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 7 :143–156, 2016.
- [183] V. Mirzabeiki. An overview of freight intelligent transportation systems. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 14 :473–489, 2013.
- [184] V. Mirzabeiki and P. Sjöholm. Sharing tracking and tracing data to improve operations of supply chain actors. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 2012.
- [185] R. Montemanni, L.M Gambardella, A.E. Rizzoli, and A. Donati. Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. *J. Comb. Optim.*, 10 :327–343, 12 2005.
- [186] A. Montoy, C. Gueret, J.E. Mendoza, and J.G. Villegas. The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B : Methodological*, 103 :87–110, 2017.
- [187] J.A. Montoya. Electric vehicle routing problems : models and solution approaches. *PhD Thesis*, 2016.
- [188] AD. Moreau and D. Erhel. La messagerie, une approche systémique pour appréhender les réseaux de transport de colis. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 2008.
- [189] A. Mourad, A.T. Abdeljalil, Florent P., J. Wu, E.M. Abdellah, J. Buisson, and R. Zeo. Modeling and controlling an isolated urban intersection based on cooperative vehicles. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 28 :44–62, 2013. Euro Transportation : selected paper from the EWGT Meeting, Padova, September 2009.
- [190] S. Muthuramalingam, A. Bharathi, R. Kumar, N. Gayathri, R. Sathiyaraj, and B. Balamurugan. *IoT Based Intelligent Transportation System (IoT-ITS) for Global Perspective : A Case Study*, pages 279–300. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [191] A. Newell, J. C. Shaw, and H. A. Simon. Empirical explorations of the logic theory machine : A case study in heuristic. In *Papers Presented at the February 26-28, 1957, Western Joint Computer Conference : Techniques for Reliability*, IRE-AIEE-ACM ’57 (Western), page 218–230, New York, NY, USA, 1957. Association for Computing Machinery.
- [192] P. Nicolas, F. Saubion, and S. Igor. Answer set programming by ant colony optimization. In Sergio Flesca, Sergio Greco, Giovambattista Ianni, and Nicola Leone, editors, *Logics in Artificial Intelligence*, pages 481–492, Berlin, Heidelberg, 2002. Springer Berlin Heidelberg.
- [193] Japan Society of Civil Engineers. Intelligent transport systems (its) - introduction guide. *The Asian Civil Engineering Coordinating Council*, 2016.
- [194] United States Department of Transportation. <https://www.its.dot.gov/>.
- [195] United States Department of Transportation. Intelligent transportation systems joint program office - strategic plan 2020-2025. *UnitedStatesDepartmentofTransportation*, 2020.
- [196] A. Omidvar and R. Tavakkoli-Moghaddam. Sustainable vehicle routing : Strategies for congestion management and refueling scheduling. in *Proceedings of the IEEE International Energy Conference (ENERGYCON ’12)*, page 1089–1094, 2012.

- [197] H. Ortega-Arranz, D.R. Llanos, and A. Gonzalez-Escribano. The shortest-path problem : Analysis and comparison of methods. *Synthesis Lectures on Theoretical Computer Science*, 2014.
- [198] Ortolang. Automatique : Définition. <https://www.cnrtl.fr/definition/automatique>, 2022.
- [199] Ortolang. Science : Définition. <https://www.cnrtl.fr/definition/science>, 2022.
- [200] Ortolang. Technique : Définition. <https://www.cnrtl.fr/definition/technique>, 2022.
- [201] J. Oskarbski and D. Kaszubowski. Potential for its/ict solutions in urban freight management. *Transportation Research Procedia*, 16 :433–448, 2016. The 2nd International Conference "Green Cities - Green Logistics for Greener Cities", 2-3 March 2016, Szczecin, Poland.
- [202] J.M. Pasteels, J.L Deneubourg, and S. Goss. Self-organization mechanisms in ant societies. i. trail recruitment to newly discovered food sources. *Experientia. Supplementum*, pages 155–175, 1987.
- [203] S. Pelissier. Introduction au vieillissement des batteries lithium-ion et aux protocoles expérimentaux de test de durée de vie. *Laboratoire Transports et Environnement*, 01 2012.
- [204] S. Pelletier, O. Jabali, and G. Laporte. 50th anniversary invited article—goods distribution with electric vehicles : review and research perspectives. *Transportation Science*, 50(1) :3–22, 2016.
- [205] S. Pelletier, O. Jabali, and G. Laporte. Charge scheduling for electric freight vehicles. *Transportation Research Part B : Methodological*, 115 :246–269, 2018.
- [206] S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte, and M. Veneroni. Battery degradation and behaviour for electric vehicles : Review and numerical analyses of several models. *Transportation Research Part B : Methodological*, 103, 2017.
- [207] Z. Pietrzykowski. Maritime intelligent transport systems. *Transport Systems Telematics*, 2011.
- [208] T.C Poon, K.L Choy, and H.C.W. Lau. Rfid case-based logistics resource management system for managing order-picking operations in warehouses. *Expert Systems with Applications*, 2009.
- [209] G. Poonthalir and R. Nadarajan. A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (f-gvrp),. *Expert Systems with Applications*, 100 :131–144, 2018.
- [210] C. Prodhon and C. Prins. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1) :1–17, 2014.
- [211] project KAREN. Frame architecture. <https://frame-online.eu/library/frame-architecture>, September 2011.
- [212] Automobile Propre. <https://www.automobile-propre.com/breves/lautopilot-tesla-peut-desormais-reconnaitre-et-afficher-les-pietons/>, 2020.
- [213] M. Quinlan, A. Tsz-Chiu, J. Zhu, N. Sturca, and P. Stone. Bringing simulation to life : A mixed reality autonomous intersection. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.
- [214] M. Quinlan, A. Tsz-Chiu, J. Zhu, N. Sturca, and P. Stone. Bringing simulation to life : A mixed reality autonomous intersection. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 6083–6088, 2010.
- [215] Montemanni R., Gambardella L.M., Rizzoli A.E., and Donati A.V. Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 10 :327 – 343, 2005.
- [216] A.S.A. Rachman, A.F. Idriz, L. Shiqian, and S. Baldi. Real-time performance and safety validation of an integrated vehicle dynamic control strategy. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1) :13854–13859, 2017. 20th IFAC World Congress.
- [217] F. Ranaiefar. Intelligent freight transportation systems. *Spring*, 2012.
- [218] Reinelt. Tsplib—a traveling salesman problem library. *ORSA journal on computing*, 1991.
- [219] G. Reinelt. *The Traveling Salesman - Computational Solutions for TSP Applications*. Springer, 1994.

- [220] P. Reme-Harnay. L'emprise des sous-traitants de la messagerie vis à vis de leurs donneurs d'ordres : entre dépendance économique et reconnaissance professionnelle. *Colloque Les formes contemporaines de l'apos*, 2019.
- [221] J. Restrepo, J. Rosero, and S. Tellez. Performance testing of electric vehicles on operating conditions. in *Proceedings of the IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*, 2014.
- [222] R. Roberti and M. Wen. The electric traveling salesman problem with time windows. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 89 :32–52, 2016.
- [223] M. Rodolfo, R. De Grande, and A. Loureiro. *Intelligent Transport System in Smart Cities Aspects and Challenges of Vehicular Networks and Cloud*. Springer Cham, 05 2018.
- [224] P. Romet, F. Gechter, El-H. Aglzim, B. Lefort, and S. SidiMohammed. La place du véhicule autonome pour une mobilité propre. *La Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, 2019.
- [225] W. Ruske. City-logistics - solutions for urban commercial transport by cooperative operations management. In *a*, 1994.
- [226] S. J. Russell and P. Norvig. Artificial intelligence : A modern approach. *Prentice Hall*, 1995.
- [227] F. Rüger and B. Färber. Emergency steering systems – controllability investigations with the vehicle in the loop. *Springer*, 2018.
- [228] S. Sadeghi Esfahlani. Mixed reality and remote sensing application of unmanned aerial vehicle in fire and smoke detection. *Journal of Industrial Information Integration*, 15 :42–49, 2019.
- [229] O. Sassi, W.R. Cherif, and A. Oulamara. Vehicle routing problem with mixed fleet of conventional and heterogenous electric vehicles and time dependent charging costs. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal01083966>, 2014.
- [230] O. Sassi, W. Ramdane Cherif-Khettaf, and A. Oulamara. Multistart iterated local search for the mixed fleet vehicle routing problem with heterogenous electric vehicles. *Springer*, 138–149, 2015.
- [231] M. Schiffer, S. Stutz, and G. Walther. Are ecvs breaking even ? : Competitiveness of electric commercial vehicles in retail logistics. *Technical Report G-2017-47*, 2017.
- [232] M. Schiffer, S. Stutz ;, and G. Walther. Are ecvs breaking even ? : Competitiveness of electric commercial vehicles in retail logistics. *Technical Report G-2017-47*, 2017.
- [233] M. Schiffer and G. Walther. The electric location routing problem with time windows and partial recharging. *European Journal of Operational Research*, 260(3) :995–1013, 2017.
- [234] M. Schiffer and G. Walther. The electric location routing problem with time windows and partial recharging. *European Journal of Operational Research*, 260(3) :995–1013, 2017.
- [235] M. Schiffer and G. Walther. An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities. *Transportation Science*, 52(2) :331–352, 2018.
- [236] M. Schneider, A. Stenger, and D. Goeke. The electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, 48(4) :500–520, 2014.
- [237] J. Schumacher, M. Rieder, M. Gschweidl, and P. Masser. Intelligent cargo—using internet of things concepts to provide high interoperability for logistics system. *Springer*, 2011.
- [238] H.P. Schwefel. *Numerical optimization of computer models*. Wiley, 1981.
- [239] J. Searle. *The Rediscovery of the Mind*. MIT Press., 1991.
- [240] G.D.M. Serugendo, M.P. Gleizes, and A. Karageorgos. Self-organization in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 20 :165 – 189, 2005.
- [241] S. Shao, W. Guan, B. Ran, Z. He, and J. Bi. Electric vehicle routing problem with charging time and variable travel time. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017,.
- [242] A. Sheng-hai, L. Byung-Hyug, and Shin Dong-Ryeol. A survey of intelligent transportation systems. In *Proceedings of the 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, CICSYN '11, page 332–337, USA, 2011. IEEE Computer Society.
- [243] M. Sieber and F. Berthold. Driver perception and reaction in collision avoidance : Implications for adas development and testing. In *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 239–245, 2016.

- [244] K. Socha, J. Knowles, and M. Sampels. A max -min ant system for the university time tabling problem. *ANTS - 3rd International Workshop*, 2002.
- [245] F. J. Srouf and D. Newton. Freight-specific data derived from intelligent transportation systems : Potential uses in planning freight improvement projects. *Transportation research record*, 2006.
- [246] G. Stefansson and K. Lumsden. Performance issues of smart transportation management systems. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 2009.
- [247] S. Storandt. Quick and energy-efficient routes : Computing constrained shortest paths for electric vehicles. in *Proceedings of the 5th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science*, page 20–25, 2012.
- [248] T. Stützle. Local search algorithms for combinatorial problems - analysis, improvements, and new applications. In *DISKI*, 1999.
- [249] T. Stützle and H. Hoos. Max-min ant system and local search for the traveling salesman problem. In *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC '97)*, pages 309–314, 1997.
- [250] J. Stöcklein, C. Geiger, and V. Paelke. Mixed reality in the loop. *design process for interactive mechatronical systems*, pages 303–30, 2010.
- [251] T. Stützle. Parallelization strategies for ant colony optimization. In *a*, volume 1498, pages 722–731, 09 1998.
- [252] T. Stützle. Parallelization strategies for ant colony optimization. In *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, volume 1498, pages 722–731, 09 1998.
- [253] Z. Sun, W. Gao, B. Li, and L. Wang. Locating charging stations for electric vehicles. *Transport Policy*, 2018.
- [254] B. Sundarakani, AWK. Tan, and D. van Over. Enhancing the supply chain management performance using information technology : Some evidence from uae companies. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 2012.
- [255] T.M. Sweda, I.S. Dolinskaya, and D. Klabjan. Adaptive routing and recharging policies for electric vehicles. *Transportation Science*, 2017.
- [256] T.W. Sweda and D. Klabjan. Finding minimum-cost paths for electric vehicles. in *Proceedings of the IEEE International Electric Vehicle Conference*, pages 1–4, 2012.
- [257] E. TANIGUCHI, T. Russell, T. YAMADA, and R. van Duin. City logistics. network modeling and intelligent transport systems. *Elsevier*, 2001.
- [258] E Taniguchi and H. Shimamoto. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *Transportation Research Part C*, 2004.
- [259] D. Teodorovic and P. Lucic. Intelligent parking systems. *European Journal of Operational Research*, 2006.
- [260] D. Teodorovic and P. Lucic. Intelligent parking systems. *European Journal of Operational Research*, 2006.
- [261] T.S.M. Tettamanti, S. Vass, and V. Tihanyi. Vehicle-in-the-loop test environment for autonomous driving with microscopic traffic simulation. In *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pages 1–6, 2018.
- [262] B. Thiyagarajan, K. Umamaheswaran Raman, and B. Viswanathan Manihatty. An internet of things based intelligent transportation system. In *2014 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pages 174–179, 2014.
- [263] S.T. Thomas and M. Dorigo. Aco algorithms for the traveling salesman problem. *De ANTS*, 04 1999.
- [264] T. Thome, A. Vacavant, L. Robinault, and S. Miguët. A cognitive and video-based approach for multinational license plate recognition. *Machine Vision and Applications*, 2011.
- [265] E. Tomislav and T. Carić. A survey on the electric vehicle routing problem : Variants and solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. EVRPSuperPapier.
- [266] S. Tsugawa, M. Aoki, A. Hosaka, and K. Seki. A survey of present ivhs activities in japan. *Control Eng. Practics*, 1997.

- [267] S. Tsutsui and N. Fujimoto. Parallel ant colony optimization algorithm on a multi-core processor. In *ANTS Conference*, 2010.
- [268] M. Vanderschuren. Safety improvements through intelligent transportation systems : A south african case study based on microscope simulation modeling. *Accident Analysis and Prevention*, 2008.
- [269] G. VandeVijver. Emergence et explication. *Intellectica*, 25, p 7-23, 1997.
- [270] M. Veluscek, T. Kalganova, and P. Broomhead. Improving ant colony optimization performance through prediction of best termination condition. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pages 2394–2402, 2015.
- [271] I. C. Victoria and C. M. Walton. Freight data needs at the metropolitan level and the suitability of intelligent transportation systems in supplying mpos with the needed freight data. *University of Texas at Austin, Center for Transportation Research.*, 2004.
- [272] F.Y. Vincent, A.A.N.P. Redi, Y.A. Hidayat, and O.J. Wibowo. A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 53 :119–132, 2017.
- [273] N.A. Vlassis. *A Concise Introduction to Multiagent Systems and Distributed Artificial Intelligence*. Morgan and Claypool Publishers, 2009.
- [274] L.T. Wille and J. Vennik. *Computational complexity of the ground-state determination of atomic clusters*. Journal of Physics A : Mathematical and General, 1979.
- [275] M. Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems, Second Edition*. John Wiley & Sons, 2009.
- [276] M. Wooldridge and P. Ciancarini. Agent-oriented software engineering : The state of the art. *Springer-Verlag*, volume 1957 of Lecture Notes in Computer Science, 2001.
- [277] M. Wooldridge and Nicholas J.R. Intelligent agents : theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2) :115–152, 1995.
- [278] J. Yang and H. Sun. Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. *Computers & Operations Research*, 55 :217–232, 2015.
- [279] L. Yangxin, W. Ping, and M. Meng. Intelligent transportation system(its) : Concept, challenge and opportunity. In *2017 IEEE 3rd international conference on big data security on cloud (bigdatasecurity), IEEE international conference on high performance and smart computing (hpsc), and IEEE international conference on intelligent data and security (ids)*, pages 167–172, 2017.
- [280] Zhang Z., Z. Feng, and Z. Ren. Approximate termination condition analysis for ant colony optimization algorithm. In *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 3211–3215, 2010.
- [281] M. Zaher. Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes : Modélisation et vérification. *Thèse UTBM*, 2014.
- [282] S. Zhang, y. Gajpal, S.S. Appadoo, and M.M.S. Abdulkader. Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption. *International Journal of Production Economics*, 203 :404–413, 2018.
- [283] Y. Zhang, B. Aliya, and Y. Zhou. Shortest feasible paths with partial charging for battery-powered electric vehicles in smart cities. *Pervasive and Mobile Computing*, 50 :82–93, 2018.
- [284] M. Zofka, S. Ulbrich, D. Karl, T. Fleck, R. Kohlhaas, A. Roennau, R. Dillmann, and J. Zöllner. Traffic participants in the loop : A mixed reality-based interaction testbed for the verification and validation of autonomous vehicles. In *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 3583–3590, 11 2018.
- [285] S. Zsolt. Next generation x-in-the-loop validation methodology for automated vehicle systems. *IEEE Access*, 9 :35616–35632, 2021.
- [286] T. Zundorf. Electric vehicle routing with realistic recharging models. *Master Thesis, Karlsruhe Institute of Technology*, 2014.
- [287] T. Zundorf. Electric vehicle routing with realistic recharging models. *Master Thesis Karlsruhe Institute of Technology*, 2014.

# Table des figures

1.1	Les catégories d'activités des STI . . . . .	8
1.2	Les quatre domaines du transport . . . . .	9
1.3	Les STI forts . . . . .	10
2.1	ITS Japan - Architecture [242] . . . . .	19
2.2	ITS Japan - Chronologie [242] . . . . .	20
2.3	ITS Japan - Orienté Plateforme [242] . . . . .	20
2.4	ISO 14813-1 [133] . . . . .	25
2.5	SURATRAM - Architecture . . . . .	43
3.1	Informations attitudes . . . . .	53
3.2	Agent mixte . . . . .	56
3.3	ACO - Courbe de stagnation . . . . .	76
3.4	Approche pragmatique . . . . .	80
3.5	Raffinement de l'approche pragmatique - 1 . . . . .	81
3.6	Raffinement de l'approche pragmatique - 2 . . . . .	82
3.7	Raffinement de l'approche pragmatique - 3 . . . . .	82
3.8	Graphe : test . . . . .	84
3.9	Graphe : système transport public Belfort . . . . .	85
3.10	Raffinement de l'approche pragmatique - 4 . . . . .	86
3.11	Raffinement de l'approche pragmatique - 5 . . . . .	86
3.12	Raffinement de l'approche pragmatique - 6 . . . . .	87
3.13	Raffinement de l'approche pragmatique - 7 . . . . .	87
4.1	TSP World . . . . .	91
4.2	Batterie - cellule lithium - [45] . . . . .	105
4.3	Batterie - dégradation physique du lithium [203] . . . . .	105
4.4	Datalogger : Trajet non filtré . . . . .	111
4.5	Datalogger : Trajet filtré . . . . .	112
4.6	Datalogger : Altitude non filtrée . . . . .	112
4.7	Datalogger : Altitude filtrée . . . . .	113
4.8	Ensemble des forces appliquées à un véhicule. L'inertie des masses en rotation n'est pas prise en compte. . . . .	114
4.9	EVRP : Résultats notable . . . . .	124
5.1	Niveaux SAE . . . . .	130
5.2	Continuum de Milgram . . . . .	132
5.3	ViL : Véhicule de test - modèle réduit . . . . .	136
5.4	ViL : simulation Unity . . . . .	138
5.5	ViL : Architecture . . . . .	139
5.6	Temps transfert : Unity - ROS . . . . .	140
5.7	Temps transfert : ROS - Unity . . . . .	141
5.8	Temps de traitement . . . . .	142
5.9	Déviations de la WorldPose . . . . .	143
5.10	Précision du SLAM . . . . .	143
5.11	Convergence du SLAM . . . . .	144

# Liste des tableaux

4.1	Paramètres du modèle énergétique . . . . .	115
4.2	Cycle de vie de la batterie, fonction du DOD. Fin de vie atteinte à 80% de SOH .	115
4.3	Colis types et volumes . . . . .	116
4.4	Ensembles . . . . .	119
4.5	Paramètres . . . . .	119
4.6	Résultats pour chaque taille de graphe . . . . .	123
4.7	Ensemble de résultats pour minimiser l'énergie totale consommée . . . . .	125
4.8	Énergie dans la batterie en accord avec la stratégie de DOD utilisée . . . . .	125
4.9	Nombre de cycle charge/décharge en fonction de la stratégie de DOD utilisé avant la fin de vie . . . . .	126
4.10	Coût financier de la capacité énergétique en fonction de la stratégie de DOD utilisée	126
4.11	Coût financier par point de livraison . . . . .	127

**Titre :** SURATRAM - Système de Transport Intelligent pour la gestion du fret de marchandises en zone urbaine

**Mots clés :** Optimisation de tournée, véhicule électrique, véhicule autonome, batterie, vieillissement batterie, dimensionnement de batterie, dimensionnement de flotte

**Résumé :** Le projet développé dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans un programme de recherche plus global et ambitieux qui vise à proposer un nouveau type de système de gestion de marchandises en centre urbain. Pour ce faire, le projet ambitionne d'aborder la gestion des marchandises d'un point de vue systémique, en intégrant la gestion au domaine des Systèmes de Transport de Marchandises Intelligent (STI). Cette vision systémique de la gestion des marchandises en zone urbaine passe par l'emploi de véhicule électrique et autonome pour assurer les tâches de livraison et d'enlèvement de marchandises.

De plus, pour circuler, ces véhicules auront la possibilité d'utiliser le réseau de transport public existant des villes, pour se déplacer depuis un centre de distribution urbain (CDU) vers des points de livraison finaux. Enfin, toujours concernant les véhicules électriques et autonomes, la vision systémiques des STI implique d'intégrer au processus d'optimisation, pour la livraison et l'enlèvement des marchandises, l'ensemble des caractéristiques intrinsèques propres aux technologies mise en œuvre telles que le véhicule électrique à batterie (VEB) et les véhicules autonomes.

**Title :** SURATRAM - Intelligent Transport System for freight management in urban areas

**Keywords :** tour optimization, electric vehicle, autonomous vehicle, battery, battery aging, battery sizing, fleet sizing

**Abstract :** The project developed in the framework of this thesis is part of a more global and ambitious research program that aims at proposing a new type of goods management system in urban centers. In order to do so, the project aims to approach the management of goods from a systemic point of view, by integrating the management into the field of Intelligent Goods Transport Systems (ITS). This systemic vision of the management of goods in urban areas requires the use of electric and autonomous vehicles to ensure the tasks of delivery and collection of goods.

In addition, these vehicles will be able to use the existing public transport network of the cities to move from an urban distribution center (UDC) to the final delivery points. Finally, still concerning electric and autonomous vehicles, the systemic vision of ITS implies to integrate in the optimization process, for the delivery and collection of goods, all the intrinsic characteristics specific to the implemented technologies such as the battery electric vehicle (BEV) and the autonomous vehicles.