REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Thèse de doctorat

(3ème cycle LMD)

SPECIALITE : Electronique

Ali HAMROUN

Modélisation, Optimisation et Contrôle des Réseaux de Voitures Electriques en libre-service.

Thèse soutenue le **08 Juin 2023**

Devant le Jury :

Mr. AMEUR Soltane	Professeur à l'UMMTO	Président
Mr. LAZRI Mourad	Professeur à l'UMMTO	Directeur de thèse
Mr. LABADI Karim	Professeur à ECAM-EPMI / Quartz-Lab	Co-directeur de thèse
Mr. BELHOCINE Mahmoud	Directeur de Recherche Habilité à CDTA	Examinateur
Mr. OUALLOUCHE Fethi	Maître de Conférences (A) à L'UMMTO	Examinateur
Mr. MOHIA Yacine	Maître de Conférences (B) à l'UMMTO	Invité

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du Laboratoire d'Analyse et Modélisation des Phénomènes Aléatoires (LAMPA) de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Il s'agit d'une collaboration scientifique avec l'ECAM-EPMI (Cergy-Pontoise (95) - France) et de son Laboratoire de Recherche en Eco-Innovation Industrielle et Energétique (LR2E).

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à Monsieur LAZRI Mourad, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour sa grande disponibilité pour la direction de cette thèse.

Je tiens également à remercier Monsieur Karim Labadi, Professeur au sein d'ECAM-EPMI pour sa proposition du sujet et plus particulièrement pour ses conseils toujours pertinents, son dynamisme, sa disponibilité et son suivi tout en long de mon travail. Il a éclairé ce travail de ses conseils judicieux, prodigué ses encouragements tout au long de la thèse et il a su me faire partager ses connaissances et sa vision scientifique du sujet.

Je suis extrêmement reconnaissant à Monsieur Ameur Soltane, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et Directeur de Laboratoire d'Analyse et Modélisation des Phénomènes Aléatoires (LAMPA), qui m'a permis de travailler au sein de son équipe et pour l'honneur qu'il me fait en sa qualité de Présidant du Jury.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur BELHOCINE Mahmoud, Directeur de Recherche Habilité au Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), qui a accepté de faire partie de mon Jury.

Je remercie vivement Monsieur OUALLOUCHE Fethi, Maître de Conférences (A) à l'UMMTO, d'avoir accepté d'examiner les travaux présentés dans ce mémoire. C'est avec un énorme plaisir de le voir prendre part à ce Jury.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur MOHIA Yacine, Maître de Conférences (B) à l'UMMTO, d'avoir accepté d'être membre invité à ce Jury.

Que tous les membres du LAMPA et toutes les personnes qui m'ont soutenu soient également remerciés.

A mes très chers parents

A mes frères et sœurs

A toute ma famille

A mes filles Inès et Céline

A ma femme Katia, pour sa présence précieuse, sa grande patience et le soutien permanent.

.

Résumé

Contribution à la Modélisation, Analyse et Contrôle des Réseaux de Voitures Electriques en Libre-Service.

Dans le domaine de la mobilité urbaine, les réseaux de transport en libre-service notamment au moyen de voitures électriques se sont récemment imposés comme l'une des alternatives prometteuses dans le paysage du transport durable, stimulé par les préoccupations environnementales et les enjeux majeurs pour la ville de demain.

Malgré le succès croissant du concept de la mobilité partagée dans le monde, la conception et la gestion de tels systèmes de mobilité urbaine impliquent de nombreux défis stratégiques, tactiques et opérationnels. Pour aider les concepteurs et les opérateurs, la conception, le design et le management de cette nouvelle forme de mobilité constituent un sujet de recherche émergeant et stimulant, visant à développer des techniques et des outils pour la modélisation, l'analyse et l'optimisation de ces systèmes dynamique complexes. Dans cette contribution basée sur la puissance des réseaux de Petri temporisés stochastiques en termes de modélisation et d'analyse, une approche de simulation à événements discrets est développée, prenant en compte la complexité de leur comportement dynamique due notamment à leur mode de fonctionnement en libre-service et à leurs multiples caractéristiques et/ou contraintes incluant les capacités des stations ; la taille de la flotte, l'autonomie des batteries ; le rééquilibrage et les activités de maintenance. Une application réelle est présentée, afin de démontrer l'applicabilité et le potentiel de l'approche de modélisation et d'analyse proposée.

Pour aider les concepteurs et les gestionnaires de programmes de mobilité partagée, le développement de modèles d'analyse de performances et d'outils d'optimisation est nécessaire. Dans ce travail, nous proposons une méthodologie utilisant les réseaux de Petri temporisés stochastiques d'une manière modulaire et paramétrable permettant la modélisation, la simulation et l'analyse de tels systèmes dynamiques complexes tout en prenant en compte l'ensemble de leurs activités et caractéristiques. Nous estimons au travers de nos résultats et publications que cette approche dynamique à événements discrets est d'une aide précieuse pour les acteurs de ces services et qu'elle peut influencer l'économie et l'efficacité opérationnelle de ces systèmes de transport urbain émergents.

Mots clés — Mobilité urbaine, réseaux de véhicules en libre-service, auto-partage, voitures électriques, réseaux de Petri stochastiques, modélisation, simulation, analyse de performances.

Abstract

Contribution to the Modeling, Analysis and Control of Self-Service Electric Car Networks.

In the field of urban mobility, self-service transportation networks, in particular with electric cars, have recently emerged as one of the promising alternatives in the sustainable transportation landscape, stimulated by environmental concerns and major challenges for the city of tomorrow.

Despite the growing success of the shared mobility concept worldwide, the design and management of such urban mobility systems involve many strategic, tactical and operational challenges. To help designers and operators, the conception, design and management of this new form of mobility is an emerging and challenging research topic, aiming at developing techniques and tools for the modeling, analysis and optimization of these complex dynamic systems. In this contribution based on the power of stochastic timed Petri nets in terms of modeling and analysis, a discrete event simulation approach is developed, taking into account the complexity of their dynamic behavior due to their self-service mode of operation and their multiple characteristics and/or constraints including station capacities; fleet size, battery autonomy; rebalancing and maintenance activities. A real application is presented to demonstrate the applicability and potential of the proposed modeling and analysis approach.

To help designers and managers of shared mobility programs, the development of performance analysis models and optimization tools is necessary. In this work, we propose a methodology using stochastic timed Petri nets in a modular and parameterizable way allowing the modeling, simulation and analysis of such complex dynamic systems while taking into account all their activities and characteristics. Through our results and publications, we believe that this discrete-event dynamic approach is a valuable aid for the actors of these services and that it can influence the economics and operational efficiency of these emerging urban transport systems.

Keywords — Urban mobility, self-service vehicle networks, car-sharing, electric cars, stochastic Petri nets, modeling, simulation, performance analysis.

Table des matières

Introduction Générale **1**

1. Contexte général : 1

2. Verrous scientifiques : 2

3. Contributions : **3**

4. Publications scientifiques : **4**

Chapitre1 Etude des systèmes de voitures en libre-service

1.1.Réseaux de voitures électriques en libre-service 5

1.1.1. Introduction à l'autopartage 5

1.1.2. Evolution de l'autopartage 6

1.1.3. Différents modes opérationnels 7

1.1.4. Complexité et problématiques 9

1.1.5. Stratégies de management 11

1.2.Défis, challenges et littérature 11

1.2.1. Défis et chalenges 11

1.2.2. Synthèse de la littérature 12

1.2.3. Positionnement de notre contribution 13

1.3.Description du système d'étude 14

1.3.1. Représentation générale du système 14

1.3.2. Descriptif fonctionnel du système 15

Conclusion **17**

Chapitre 2 Modélisation à l'aide des Réseaux de Petri temporisés stochastiques

2.1.Introduction aux réseaux de Petri 18

2.1.1. Concept et facteurs de succès 18

2.1.2. Formalisme et définitions de base 19

2.1.3. Evolution dynamique d'un RdP 20

2.1.4. Réseaux de Petri temporisés/stochastiques 21

2.1.5. Exemple illustratif de modélisation 23
2.2.Modélisation d'un réseau d'autopartage en libre-service 24
2.2.1. Descriptif général du modèle développé 25
2.2.2. Descriptif module de la station et de la recharge 27
2.2.3. Descriptif module de la demande des utilisateurs 29
2.2.4. Descriptif module de la maintenance / station « parking » 30
Conclusion **31**

Chapitre 3 Evaluation et Analyse de Performances à l'aide de la simulation à événements discrets

3.1.Analyse à l'aide des réseaux de Petri 32
3.1.1. Evaluation de performances 33
3.1.2. Comportement dynamique "Etat/Temps" 35
3.1.3. Formalisation des indicateurs de performances : 35
3.1.4. Exploitation du modèle développé 38
3.2.Présentation de l'outil de simulation utilisé 40
3.2.1. Architecture générale de la simulation d'un RdP 40
3.2.2. Choix d'un outil de simulation 41
Conclusion **43**

Chapitre 4 Application à un cas réel

4.1.Présentation du Cas d'Etude 44
4.1.1. Données, paramètres et hypothèses 46
4.1.2. Configuration du modèle RdP stochastique 47
4.1.3. Outil et paramètres de simulation 49
4.2.Simulation et analyse de performances 50
4.2.1. Résultats graphiques de la simulation 51
4.2.2. Evaluation analyse de performances 53
4.2.3. Analyse paramétrique 55

4.2.4. Régulation statique (pendant la nuit) 57
Conclusion **61**
Conclusions et perspectives générales **62**
Bibliographie **66**
Annexe **72**

Listes des Figures

Fig 1.1 Evolution du nombre d'utilisateurs de l'autopartage..... 6
Fig 1.2 Réseau de voitures électriques en libre-service..... 15
Fig.2.1 Un exemple illustratif de l'évolution d'un réseau de Petri(3états) Formellement..... 20
Fig.2.2 Un exemple illustratif de réseau de Petri (cycle de charge et de décharge)..... 23
Fig.2.3 Modèle RdP d'un système d'autopartage de voitures électrique en libre-service..... 24
Fig.2.4 Zoom sur le module d'une station S_i la demande des usagers..... 27
Fig.2.5Discrétisation du niveau de la charge/décharge d'une batterie..... 28
Fig.2.6 Zoom sur le module de la maintenance et de la station « parking »..... 30
Fig.3.1 Trajectoir « Temps / Evénement (transition) / Etat (marquage) » comportement dynamique)..... 34
Fig 3.2 Exploitation générale du modèle développé au chapitre 2..... 39
Fig3.3 Architecture générale de la simulation d'un Réseau de Petri..... 40
Fig 3.4 Illustration du logiciel GRIF Petri..... 41
Fig 4.1 Plan Google Map – du réseau Yelomobile..... 45
Fig4.2 Exemple de station et du Suivi en temps réel de la disponibilité des voitures..... 45
Fig4.3. Temps de recharge d'un niveau X% à EL*% = 70% (seuil de disponibilité)..... 48
Fig4.4 Simulation du modèle RdP du réseau considéré à l'aide du logiciel GRIF..... 50
Fig4.5 Comportement dynamique stochastique des voitures de location (Évolution du marquage de la place PCU représentant les voitures en cours de service)..... 51
Fig4.6 Comportement dynamique stochastique au sein de la Gare St Maurice (Départ et Arrivée des voitures)..... 51
Fig4.7 Dynamique des différentes stations S1-S13 (départ et arrivée des voitures)..... 52
Fig4.8 Évolution de la satisfaction des usagers (%) en fonction du nombre de voitures déployées..... 56
Fig 4.9 Évolution de la fréquence moyenne de franchissement des transitions (TUS_i, TUD_i, TUD_i) en fonction du nombre de voitures déployées..... 57
Fig4.10Évolution du temps moyen de location de voiture (temps moyen de séjour de la place PCU) en fonction du nombre de voitures déployées..... 57
Fig4.11Comportement dynamique stochastique de la Gare St Maurice (Départ et Arrivée des voitures) – Avec Régulation Statique Static_R(1-50%)..... 59
Fig4.12 Comportement dynamique stochastique de toutes les stations S1-S13 (départ et arrivée des voitures) – Avec régulation statique Static_R(1-50%)..... 60

Liste des tableaux

TABLE1.I Différents Modes Operationnels..... 8
TABLE 1.II Stratégies De Management..... 10
TABLE 1.III QUESTIONS ET PARAMETRES DETERMINANTS..... 13
TABLE 2.I DESIGNATION ET INTERPRETATION DES PLACES..... 25
TABLE 2.II DESIGNATION ET INTERPRETATION DES TRANSITIONS..... 26
TABLE3.INOTATIONS UTILISEES POUR LA FORMALISATION DES INDICES DE PERFORMANCES... 36
TABLE 4.I DESIGNATION ET CAPACITES DES STATIONS..... 46
TABLE 4.II PARAMETRES DU MODULE DE LA RECHARGE ELECTRIQUE..... 48
TABLE 4.III PARAMETRES DES MODULES « STATIONS » ET « DEMANDES »..... 49
TABLE 4.IV PARAMETRES DU MODULE DE MAINTENANCE..... 49
TABLE 4.V % NIVEAU DE SATISFACTION DE LA DEMANDE DES USAGERS..... 53
TABLE 4.VI MARQUAGES MOYENS DES STATIONS ET TEMPS DE SEJOUR MOYENS DES VOITURES..... 53
TABLE 4.VII % DE TEMPS DE STATIONS VIDES ET PLEINES (SITUATIONS CRITIQUES)..... 54
TABLE 4.VIII TAUX MOYENS DE FRANCHISSEMENTS DES TRANSITIONS (MODULES USAGERS).. 54

Introduction Générale

1. Contexte général :

Aujourd'hui, l'avènement des villes éco-intelligentes devient de plus en plus une réalité grâce à de nombreuses initiatives et alternatives innovantes dans de nombreux domaines tels que l'habitat, l'énergie, les télécommunications et autres. Dans ce contexte, le transport constitue un enjeu majeur pour les services publics et reste un perpétuel défi pour les ingénieurs et chercheurs. En effet, le développement des villes, les préoccupations environnementales, le réchauffement climatique et la hausse des prix de carburants ont fait du transport et de sa gestion un enjeu crucial pour la ville de demain. La congestion, la pollution, les nuisances sonores et l'insécurité routière incitent les acteurs du transport à l'innovation et au développement du transport intelligent et durable. Portés conjointement par des révolutions technologiques, environnementales et sociétales, les projets innovants se multiplient et de nouvelles solutions de mobilité émergent dans les quatre coins du monde. Hormis les nombreux projets révolutionnaires, voire futuristes, (Hyperloop, Clip-Air, SkyTran, AeroMobil, Solar Impulse, Immortus, …), la voiture électrique, la voiture autonome et le transport en libre-service font partie des récentes préoccupations en termes de projets de recherche et de développement de ces nouveaux modes de mobilité. Malgré les grands progrès réalisés dans ces domaines, de nombreux défis restent encore préoccupants à différents niveaux pouvant être technologiques, organisationnels et scientifiques.

Au cours de ces dernières années, le transport en libre-service constitue une nouvelle forme de mobilité urbaine. Efficace, écologique et économique, ce nouveau concept permet de faire des déplacements de proximité en milieu urbain. Ce mode de transport a su s'inscrire dans les villes du monde entier, connaissant une expansion des plus remarquables. Après le succès fulgurant des réseaux de vélos en libre-service, avec notamment leur dernière génération utilisant les vélos à assistance électrique, ce nouveau concept s'étend à l'usage des voitures électriques. Par ailleurs, derrière ce grand phénomène du transport en libre-service se cache une réalité bien compliquée pour les exploitants de tels services. Afin d'assurer un déploiement efficace de ces systèmes et de garantir un service de qualité, de nombreuses questions telles que la taille des stations (parkings), le dimensionnement de la flotte de véhicules) l'emplacement des stations (et des bornes de recharge) et plus particulièrement le contrôle et la régulation des réseaux de stations. Ces multiples questions sont déterminantes pour le succès et la viabilité de ces réseaux de transport en mode libre-service. Elles soulèvent de nombreux défis scientifiques et sont sources de plusieurs projets de recherche.

2. Verrous scientifiques :

Du point de vue scientifique, les systèmes de transport en libre-service soulèvent de nombreuses problématiques complexes dont les verrous vont s'articuler autour de la modélisation, de la simulation et de l'optimisation en vue d'un déploiement, d'un contrôle, d'une régulation et d'un management efficaces d'un tel mode de transport. Ces systèmes et réseaux associés sont dynamiques, stochastiques et très complexes et nécessitent des méthodes de modélisation et d'analyse performantes pouvant prendre en compte toutes leurs caractéristiques à la fois structurelles, organisationnelles et comportementales (réseaux denses, dynamique stochastique, autonomie restreinte, disponibilité de véhicules aléatoire, demandes des usagers non déterministes, …).

La littérature scientifique dans ce domaine est particulièrement dominée par le développement de modèles de recherche opérationnelle (RO) pour optimiser certains de leurs problèmes spécifiques liés à leur conception (design) et/ou à leur gestion. Le problème de rééquilibrage de la distribution des véhicules (vélos ou voitures) dans les stations est l'un des sujets le plus traité dans la littérature [16]-[23]-[31]. Malgré l'intérêt de ces modèles d'optimisation reposant sur la RO, d'un certain point de vue, ils ne sont pas adaptés pour capturer le comportement dynamique de ces systèmes. En effet, l'ajout de variables "temporelles" et "stochastiques" dans ces modèles les rend complexes et difficiles à résoudre [20]-[12]-[23].

A l'image du travail réalisé dans le cadre de cette thèse de doctorat, la modélisation et la simulation du comportement dynamique des systèmes de mobilité en libre-service [38]-[41] sont essentielles en vue de l'amélioration de leurs performances et/ou l'optimisation de leurs différents enjeux stratégiques, tactiques et opérationnels. Parmi les formalismes largement utilisés pour modéliser des systèmes dynamiques, les réseaux de Petri [61] présentent de nombreux avantages en raison de leur solide fondement mathématique et graphique qui permet une analyse formelle via des méthodes analytiques et/ou par simulation dynamique. Les réseaux de Petri ont été utilisés non seulement pour aborder les problèmes de modélisation et d'analyse de performances, mais aussi pour étudier des sujets plus spécifiques tels que le contrôle ; la supervision et détection de défauts ; l'ordonnancement ; la planification et la conception de nombreux systèmes, notamment les systèmes de production et de fabrication [63], les systèmes logistiques et d'inventaires [26]-[33]; les systèmes d'entrepôts automatisés [18]-[19] ; les systèmes de trafic urbain [15]-[17]-[36]–[40] et plus récemment les systèmes de transport en libre-service [4]-[6].

L'intérêt des réseaux de Petri comme outil de modélisation a conduit à diverses extensions pour répondre aux spécificités des phénomènes et/ou aux besoins d'analyses de systèmes de plus en plus complexes. Parmi ces extensions, nous citons les réseaux de Petri temporisés ; les réseaux de Petri stochastiques ; les réseaux de Petri colorés ; les réseaux de Petri hybrides et d'autres réseaux de Petri de haut niveau. En lien avec ce travail de thèse, la pertinence du choix des réseaux de Petri, comme outil de modélisation, d'analyse et de simulation-optimisation des systèmes de vélos en libre-

service a été démontrée pour la première fois dans les travaux de [6]-[35]-[49] en les considérant comme des systèmes stochastiques à événements discrets [38] -[41] -[30].

A l'image des systèmes de vélos en libre-service, les réseaux de voitures électriques constituent une nouvelle alternative à la mobilité douce et à l'avenir de l'Electromobilité. En revanche, ce type de transport nécessite un management beaucoup plus complexe que celui des vélos. En effet, en plus du mode libre-service nécessitant un contrôle et une régulation efficaces des zones de stationnement associés à des déplacements (fréquentations) non déterministes des usagers, d'autres nouvelles contraintes telles que l'autonomie des voitures électriques, la gestion des bornes de recharge ou encore les pannes et la maintenance des voitures sont à prendre compte. Dans ce contexte, plusieurs problématiques peuvent être considérées (contrôle, régulation, ordonnancement, affectation, maintenance, …) en vue de développer des méthodes et des outils assurant un design, un contrôle et un management optimisés de ces réseaux de transport en libre-service [46].

3. Contributions :

Ce travail de thèse s'inscrit dans cette thématique en considérant les réseaux de voitures électriques en libre-service comme des systèmes dynamiques et stochastiques dont la complexité nécessite des méthodes de modélisation et d'analyses performantes pouvant prendre en compte leurs caractéristiques structurelles, organisationnelles et comportementales (réseaux denses, dynamique stochastique, autonomie restreinte, disponibilité de véhicules aléatoire, demandes des usagers non déterministes, …).

Cette thèse s'organise autour de quatre chapitres dont les principaux objectifs sont décrits dans les paragraphes suivants :

- **Chapitre 1** — Le premier chapitre est consacré à la présentation générale et à l'étude bibliographique des systèmes de voitures électriques en libre-service. Ces systèmes sont décrits sous différents aspects, notamment leur développement, leur utilisation, leurs impacts, et en particulier leurs défis stratégiques, tactiques et opérationnels pour devenir une alternative efficace au transport public. Évidemment, l'objectif principal de ce chapitre est de passer en revue les études existantes ; les approches de modélisation et d'optimisation proposées dans la littérature.

- **Chapitre 2** — Après une introduction générale sur les réseaux de Petri et plus particulièrement les réseaux de Petri temporisés stochastiques, ce deuxième chapitre est consacré au développement de notre méthodologie en vue de la modélisation, simulation et analyse de performances des réseaux de voitures électriques en libre-service. Partant d'une structure réaliste d'un réseau de voitures électriques en libre-service, un modèle RdP modulaire et paramétrable est développé en prenant en compte les multiples caractéristiques de ce type de systèmes.

- **Chapitre 3** — Dans ce nouveau chapitre, nous développons des outils d'analyse et d'évaluation de performances pour l'exploitation du modèle développé. Un ensemble d'indicateurs de performances sont formalisés et permettront de quantifier la performance d'un réseau de voitures électriques en libre-service. Les indicateurs formalisés concernent les différentes activités et l'état du système (nombre moyen de voitures dans une station, % de situations de stations pleines ou vides ; l'état des voitures en service ou en phase de recharge ; taux de satisfaction ou de rejet des demandes des usagers, taux de maintenance des voitures ; …).

- **Chapitre 4** — Ce dernier chapitre de thèse constitue une application concrète pour démontrer le potentiel de notre approche. Cette application repose sur le cas de YELLOMOBILE, un service de voitures électriques en libre-service, lancé en 1999 par la Rochelle (France). Après la présentation du système considéré et les données utilisées pour nos scénarios d'études, nous appliquons notre méthodologie pour la modélisation, la simulation et l'analyse du réseau. Les résultats obtenus montrent la richesse et le grand potentiel de notre approche pour ce type de systèmes.

Bien évidemment, cette thèse sera conclue par une conclusion et un ensemble de perspectives de travail.

4. Publications scientifiques :

Les travaux présentés dans la suite de ce document ont été valorisés par plusieurs publications scientifiques listées ci-dessous :

- **1 Article de Revue internationale de Rang A – IEEE TASE - Impact Factor 6,64.**

A. Hamroun, K. Labadi, M. Lazri, J.-P. Barbot (2022) "A Petri Nets-Based Simulation Methodology for Modular Modeling and Performance Evaluation of Car-Sharing Networks" IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (TASE), In Press 28/06/2022. pp. 1-17 Print ISSN: 1545-5955 Online ISSN: 1558-3783 DOI: 10.1109/TASE.2022.3189405. 10.1109/TASE.2022.3189405.

- **1 Article de conférence Internationale avec publication indexée Scopus (3S Web Conf)**

A. Hamroun, K. Labadi and M. Lazri (2020), "Modelling and Performance Analysis of Electric Car-Sharing Systems Using Petri Nets », 3S Web Conf. Volume 170, 2020, 6th International Conference on Energy and City of the Future (EVF'2019). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017003001 Article N° 03001.

Chapitre 1

Etude des systèmes de voitures en libre-service

Ce chapitre est consacré à une étude générale sur l'autopartage au moyen de voitures électriques en libre-service. Tout d'abord, nous réalisons une présentation générale de ce nouveau mode de mobilité urbaine afin de comprendre leurs organisation, fonctionnement, caractéristiques et ainsi les problématiques qu'ils soulèvent. Dans un second temps, une étude bibliographique est réalisée pour faire un état de l'art sur les études fondamentales conduites pour la mise en œuvre, l'exploitation et/ou l'optimisation de ces systèmes de mobilité, récents dans le paysage de la mobilité urbaine.

1.1 Réseaux de voitures électriques en libre-service

1.1.1 Introduction à l'autopartage

Dans le domaine de la mobilité urbaine, les systèmes de mobilité au moyen de vélos ou de voitures en libre-service se sont imposés comme l'une des alternatives prometteuses, stimulée à la fois par les problématiques environnementales et celles du transport affectant aujourd'hui plusieurs villes denses dans le monde [20]-[58]-[24]. De plus, dans le contexte actuel lié à l'avènement des villes intelligentes et durables et de la transition écologique et énergétique, de nombreuses villes dans le monde encouragent leurs populations à utiliser les services d'autopartage plutôt que les véhicules privés plus polluants. Le concept principal de l'autopartage en libre-service est de partager une flotte de voitures entre des utilisateurs (clients). Principalement introduit dans des zones urbaines denses, l'autopartage permet aux usagers la location de voitures en libre-service et constitue une alternative à l'usage des voitures personnelles. L'organisation qui loue les voitures peut être une entreprise commerciale ; un organisme public ; ou une coopérative. Les coûts liés à l'assurance ; à l'entretien ; au carburant ou à l'électricité ; aux taxes et à l'amortissement sont pris en charge par ces

organisations prestataires de services. Selon les modèles économiques associés, ces frais déterminent les tarifs appliqués en termes de coûts de location ou d'abonnement des usagers.

Historiquement parlant, l'autopartage a commencé en 1948 avec une coopérative à Zurich, en Suisse, connue sous le nom de "Sefage". Une organisation de covoiturage originale est née d'une coopérative de logement basée à Zurich. C'était la première expérience du concept qui n'a malheureusement pas duré longtemps. Durant plusieurs années plus tard, presque tous les efforts d'organisation de programmes d'autopartage se sont soldés par un échec jusqu'au début des années 1990. De multiples raisons des échecs essuyés sont identifiées. On cite les limitations technologiques ; l'acceptabilité sociétale et le manque de soutien financier fragilisant la viabilité économique et la qualité de service des projets initiés. Aujourd'hui, le concept se développe et devient plus attractif en utilisant internet, les smartphones et les nouvelles technologies de l'information et de communication qui rend le service plus pratique pour les usagers et plus facile à manager par les opérateurs.

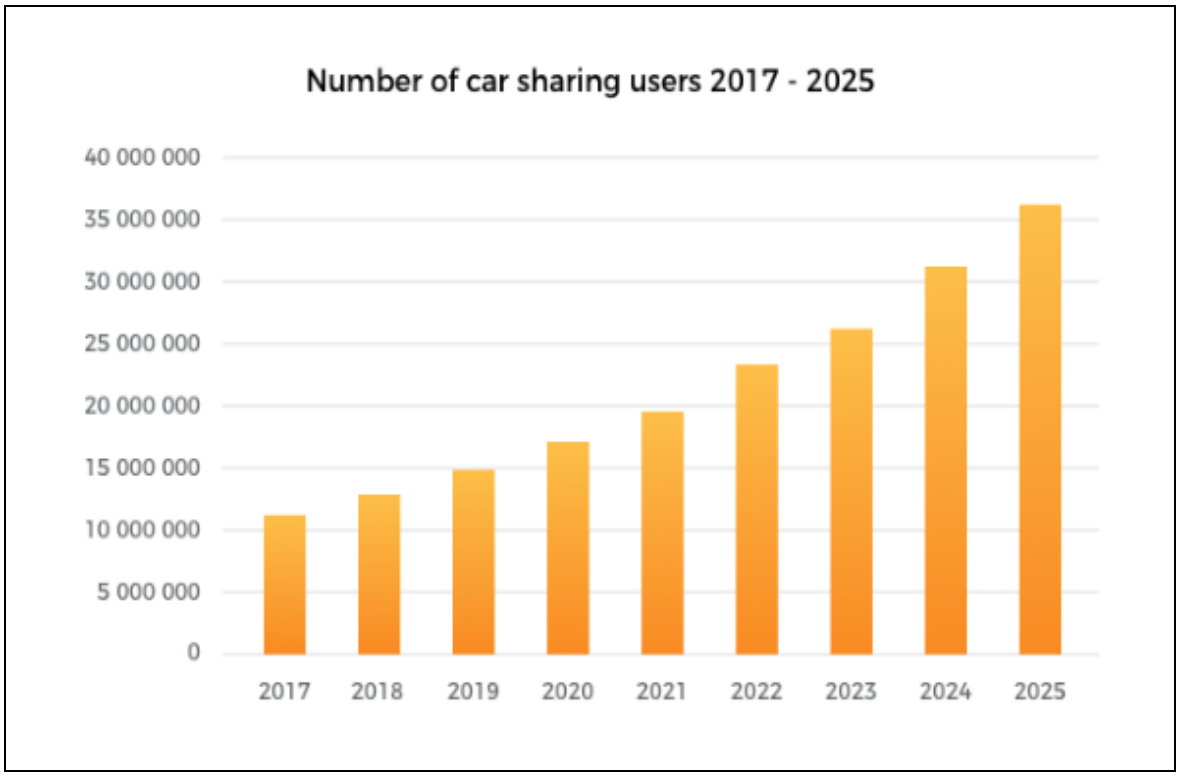


Fig 1.1 Evolution du nombre d'utilisateurs de l'autopartage (Source : Frost & Sullivan, Future of Car Sharing Market to 2025).

1.1.2 Evolution de l'autopartage

Selon le rapport du TSRC « Innovative Mobility : Car-sharing Outlook », le nombre de pays qui ont introduit des programmes d'autopartage est passé de 35 en 2014 à 46 en octobre 2016. Aujourd'hui, ces programmes opèrent dans six continents

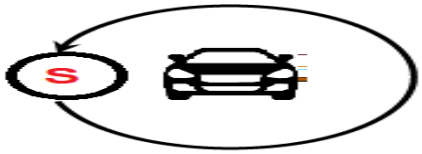
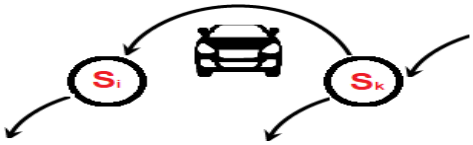
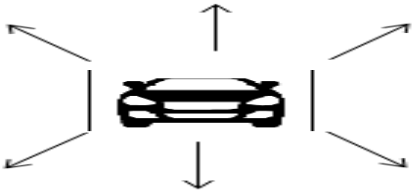
représentant plus de 2 000 villes et 157 000 voitures environ [56]. Depuis 2015, le concept a même été adopté en Afrique, notamment au Maroc et en Afrique du Sud, considérés comme le deux premiers pays africains pilotes de ce type de mobilité dans le continent. En 2017, on comptait déjà environ 10 millions de personnes utilisant ce type de service, et selon une étude de Frost & Sullivan, d'ici 2025, leur nombre atteindra 36 millions, maintenant le taux de croissance annuel de 16,4% (Voir Fig.1.1)

Après identification des raisons de l'échec des premières expériences et grâce aux récentes avancées technologiques intégrées au concept de base, la dernière décennie a enregistré la plus forte croissance du marché de l'autopartage. À l'instar des réseaux de vélos en libre-service, l'autopartage au moyen de voitures électriques devient de plus en plus attrayant et constitue une sérieuse alternative adéquate au développement des villes durables prônées dans le monde. Le principe d'un réseau d'autopartage en libre-service s'appuie sur un réseau de stations réparties sur une zone urbaine et une flotte de voitures électriques accessibles aux usagers. Sur la base d'une location à l'heure ou par abonnement et selon les déplacements à effectuer, les usagers empruntent librement des voitures depuis une station de départ et la restituent (déposent) dans une autre station (pouvant être la même).

1.1.3. Différents modes opérationnels

Du point de vue opérationnel, l'autopartage utilisant des voitures en libre-service compte trois schémas de principe classés, illustrés et décrits dans le Tableau 1.I. Ces schémas représentent trois modes à savoir : « Mode unidirectionnel », « Mode bidirectionnel » et « Mode flottant »[21].

TABLE 1-1
DIFFERENTS MODES OPERATIONNELS.

Mode	Mode opératoires	Avantages / désavantages
Mode bidirectionnel (basé sur la station)	— Le mode **« bidirectionnel »** permet aux usagers d'effectuer des déplacements de type "**Aller-Retour**". Autrement dit, les usagers doivent déposer la voiture louée dans la même station de départ, à la fin de leurs services (déplacements). 	— Ce mode opérationnel offre moins de flexibilité aux usagers. Les déplacements de type « Aller/ Retour » restreindrait le service des usagers. — En revanche, ce mode opératoire est facile à manager par les opérateurs. La gestion du service et de la flotte est maitrisable.
Mode unidirectionnel (basé sur la station)	— Le mode **« unidirectionnel »** est également appelé mode **« Aller Simple »**. Il permet aux usagers de se déplacer d'une station de départ vers une autre station de destination. 	— Ce mode opératoire permet plus de liberté de mobilité aux usagers. Ils peuvent se déplacer d'un point A vers un point B définis selon les trajets souhaités. — D'un point de vue opérationnel, ce mode opératoire peut engendrer un déséquilibre de la distribution de la flotte entre les différentes stations. Ceci impose à l'exploitant de définir des stratégies de régulation au quotidien.
Mode flottant (sans stations)	— Le mode « flottant » repose sur une flotte de voitures en libre-service **sans stations dédiées**. Les voitures peuvent se trouver dans des parkings quelconques dans un espace urbain défini. Les voitures sont localisables par les usagers via des applications web ou smartphones. 	— Cette dernière génération offre une liberté totale aux usagers au détriment d'une complexité élevée à l'exploitant. — Ce mode opératoire est le moins répondu sur le terrain.

Selon les programmes développés, le type de voitures utilisées peuvent être thermiques, hybrides ou électriques. Aujourd'hui, l'usage de la voiture électrique est de plus en plus privilégié par les exploitants, même si l'autonomie des batteries peut constituer une contrainte au service et un facteur de limitation des trajets. Par ailleurs, les récents progrès de l'industrie automobile sont encourageants pour l'avenir de l'électromobilité en général.

1.1.4. Complexité et problématiques

Malgré leur succès fulgurant dans le monde entier, le management des réseaux d'autopartage en libre-service peut s'avérer complexe. Leur complexité est due à plusieurs facteurs, dont la stochasticité de la demande des clients ; les déplacements non déterministes des usagers ou encore la survenue d'incidents nécessitant des activités de maintenance. Ces dernières années, le monde entier incite à accroitre l'utilisation globale des voitures électriques afin de réduire l'empreinte environnementale de la mobilité urbaine [50]. Dans ce contexte, un développement récent des systèmes d'autopartage consiste en l'introduction de voitures électriques et d'infrastructures adaptées. Malgré un impact positif sur l'environnement, ce mode de déplacement rend l'autopartage plus complexe à mettre en œuvre et à manager, en raison de l'infrastructure à déployer et de la contrainte liée à l'autonomie des véhicules à mettre à la disposition des usagers. Par conséquent, les systèmes d'autopartage au moyen de véhicules électriques constituent un sujet émergent et stimulant. C'est une thématique qui doit répondre à de nombreux défis tactiques et stratégiques structurés dans le Tableau 1.III et cet ensemble qui doit inclure les contraintes liées à la gestion énergétique de la flotte. Ceci doit être pris en compte explicitement dans les modèles et méthodes à développer.

TABLE 1-II
STRATEGIES DE MANAGEMENT.

Stratégies	Description des stratégies
Stratégie basée sur l'Opérateur	En utilisant des stratégies basées sur l'opérateur, toutes les activités opérationnelles, y compris l'entretien des voitures et les opérations de relocalisation (rééquilibrage), sont effectuées par des opérateurs spécialisés. Les opérations de rééquilibrage peuvent être effectuées de deux manières différentes : — Mode de rééquilibrage statique : la redistribution des voitures peut être effectuée en fin de journée au moment où le taux de service est négligeable (faible utilisation). Ce mode permet une meilleure répartition des voitures pour prévoir le service du lendemain. — Mode de rééquilibrage dynamique : La redistribution des voitures peut être effectuée périodiquement dans la journée (durant service). Ce mode est particulièrement utile dans le cas de grands réseaux avec un déséquilibre persistant nécessitant une intervention.
Stratégie basée sur l'Utilisateur	Le problème de rééquilibrage est opérationnellement plus difficile que dans le cas des systèmes de vélos en libre-service. Dans ces derniers, on peut utiliser un camion pour déplacer plusieurs vélos en même temps, alors qu'on ne peut pas le faire dans le cas de voitures en libre-service en raison de la taille des voitures et de la difficulté de charger et décharger un lot de voitures dans des camions ! Le rééquilibrage doit être fait voiture par voiture. Le problème de rééquilibrage est un véritable casse-tête pour les opérateurs. La grande majorité des réseaux de voitures en libre-service utilisent des stratégies basées sur l'utilisateur, également appelées stratégies incitatives. Certains utilisateurs peuvent être disponibles pour effectuer certains déplacements nécessaires ou modifier leurs trajets, s'ils sont motivés par des bonus tarifaires.

1.1.5. Stratégies de management

Comme indiqué dans le Tableau 1.I, contrairement au mode « bidirectionnel » (Aller/Retour), les modes unidirectionnels et flottants peuvent être sujets quotidiennement au problème de déséquilibre de la répartition des véhicules dans les différentes stations. Dans de tels cas, les opérateurs doivent définir des stratégies opérationnelles pour redistribuer efficacement les voitures entre les stations, afin d'éviter des situations de stations vides ou pleines, qui sont indésirables pour les utilisateurs et critiques pour la qualité du niveau de service. Une telle redistribution pourrait répondre aux besoins à court terme de certaines stations sujets au déséquilibre pouvant être dû à leurs localisations, capacités et/ou fréquentations par les usagers. Dans la pratique, la redistribution peut s'appuyer sur une prévision basée sur l'historique du service permettant d'estimer la demande future pour planifier de manière proactive les redistributions des véhicules entre les stations.

Le problème de rééquilibrage (dit régulation ou relocalisation) [42]-[1] concerne plus particulièrement les réseaux d'autopartage de grande taille (denses). Il est accru pour le cas de réseaux qui disposent de nombreuses zones de stationnement relativement éloignées les unes des autres avec des fréquentations déséquilibrées (demandes de clients non homogènes). Cette problématique a été responsable de l'échec du système Diracc de Honda à Singapour et en partie de l'Auto-lib de Paris dont les services sont interrompus respectivement en 2008 et 2018. Comme décrit dans le Tableau 1.II, dans la pratique, des stratégies basées sur « l'opérateur » ou « l'utilisateur » peuvent être utilisées ou combinées pour atténuer ce problème opérationnel et de gestion.

1.2. Défis, challenges et littérature

1.2.1. Défis et chalenges

Malgré leur grand succès dans le monde entier (voir Fig. 1.1), les réseaux d'autopartage en libre-service soulèvent plusieurs enjeux stratégiques, tactiques et opérationnels, résumés dans le Tableau 1.III. Ces enjeux constituent une source de nombreuses recherches dans le domaine traitant des questions multiples et variées. Les approches de modélisation ; les techniques d'évaluation de performances ; les modèles d'optimisation et les outils d'aide à la décision constituent des sujets incontournables dans ce domaine de recherche émergent. D'une manière générale, la recherche vise à aider les concepteurs et les opérateurs à mieux concevoir et/ou gérer de tels systèmes dynamiques.

Au cours des dernières années, la littérature académique est très abondante dans ce domaine [11], notamment dans le cas des systèmes de vélos en libre-service [28]-[35]-[6]-[59]-[60]. De nombreux chercheurs de différentes communautés, tels que ceux de la recherche opérationnelle (RO) et ceux de la communauté des systèmes à événements

discrets et de la simulation informatique, visent à aider les concepteurs et/ou les exploitants de ces services de mobilité à mettre en œuvre des réseaux efficaces en terme de design (localisation des stations ; taille de la flotte ; capacité des stations ; …) et une gestion opérationnelle viable (rééquilibrage, planification, affectation, …) de tels systèmes de mobilité urbaine. Pour une revue structurée de la littérature récente dans ce domaine émergent, le lecteur pourra se référer [12]-[58]-[10]-[21]-[23]-[24].

1.2.2. Synthèse de la littérature

La recherche scientifique dans le domaine de l'autopartage en libre-service peut prendre diverses orientations liées à de nombreuses questions soulevées dont la modélisation ; l'analyse de performances et l'optimisation des problèmes de décision pouvant être stratégiques, tactiques et opérationnelles, comme le structure le Tableau 1. III. Les décisions stratégiques visent à déterminer le nombre, la taille et l'attribution des stations, ainsi que le nombre de voitures à déployer [25]-[10]-[62]. D'autre part, les décisions opérationnelles sont particulièrement liées aux activités de rééquilibrage pour rendre le système encore plus efficace et plus rentable pendant le service [54]-[7]-[31]. Différentes approches et méthodologies ont été proposées, y compris des approches de programmation mixte en nombres entiers [51]-[54]-[25] ; approches d'optimisation heuristiques et méta-heuristiques [33]-[32] ; « Data mining » et modèles de prédiction statistique [27]-[55] ; modélisation par Réseaux de Petri et réseaux de file d'attente [39]-[14]-[3]-[48]-[46]-[30] ou encore des méthodologies de simulation pour des objectifs d'analyse et/ou d'optimisation de performances [38]-[2]-[41]-[37]-[57]-[53]-[13]. Cependant, à l'instar du cas des systèmes de vélos en libre-service [6]-[9]-[8]-[5], la communauté de la recherche opérationnelle (RO) est très active dans ce domaine émergent. Elle développe divers modèles mathématiques pour résoudre certains problèmes d'optimisation spécifiques tels que la localisation des stations ; le dimensionnement des stations et le rééquilibrage de la distribution de véhicules [24]. Plus souvent, les modèles de recherche opérationnelle sont développés et résolus en exploitant les similitudes des problèmes posés par les systèmes d'autopartage avec des problèmes d'optimisation classiques tels que les tournées de véhicules ; la gestion de stocks ; affectation de ressources, localisation de sites, etc.

TABLE 1-III
QUESTIONS ET PARAMETRES DETERMINANTS

Niveaux Décisionnels	Questions / paramètres déterminants
Niveau stratégique (Long-terme)	– Localisation, nombre et capacités des stations – Types et nombre de voitures (hybride, électrique, …) – Disponibilité de bornes de recharge électrique – Disponibilité d'une infrastructure de maintenance
Niveau tactique (Moyen-terme)	– Spécification des itinéraires, informations aux usagers et stratégies incitatives – Délai de réservation, tarification des services, types d'abonnement – Politiques de rééquilibrage (fréquences, ressources, mode statique ou dynamique, …)
Niveau opérationnel (Court-terme)	– Redistribution des voitures entre les stations (Activités de rééquilibrage) – Maintenance des véhicules et gestion des incidents techniques – Recharge électrique des voitures et gestion de l'autonomie des batteries.

Malgré l'utilité des modèles issus de la recherche opérationnelle, ils présentent un certain nombre de limites notamment :

- Les modèles développés ne sont pas génériques. Ils sont généralement spécifiques à un problème décisionnel donné, avec une perception restreinte de ces systèmes. Ils ne permettent pas une analyse de performances selon une multitude d'indicateurs. Ces modèles se limitent souvent à un seul critère.
- Les modèles ne prennent pas toute la complexité de ces systèmes notamment par rapport aux paramètres stochastiques et aléatoires qui les caractérisent. En effet, l'ajout des variables "temps" et "stochastiques" peut rendre ces modèles insolubles avec une approche de recherche opérationnelle.

1.2.3. Positionnement de notre contribution

Outre les approches de recherche opérationnelle qui dominent la littérature dans le domaine de l'autopartage en libre-service, d'un certain point de vue, ces systèmes peuvent bien être considérés comme des systèmes dynamiques stochastiques. Ainsi, ils peuvent être modélisés à l'aide de formalismes adaptées aux systèmes à événements discrets. Ceci va nous permettre une modélisation dynamique et stochastique et une

analyse et/ou optimisation de performances à l'aide de techniques formelles ou basées sur la simulation à événement discrets [38]-[2]-[41]-[37]-[57]-[53]-[13]-[30].

Plus généralement, cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet « Shared Mobility Lab » lancé depuis 2010 par le Prof. Labadi et son équipe au sein d'ECAM-EPMI. Ce projet repose sur deux axes. Des modèles de la recherche opérationnelle [6] - [35] - [9] - [8] - [5] et des approches issues des systèmes à événements discrets ont été développés et/ou combinés dans le cas des systèmes de vélos en libre-service. En particulier, il a été démontré [35] - [6] que réseaux de Petri temporisés stochastiques sont adéquats pour une modélisation complète et une riche analyse de performances des systèmes de vélos en libre-service [38] - [41] - [2] - [30].

Dans le cadre de cette thèse conduite au sein de LAMPA (Univ. de Tizi-Ouzou) en collaboration avec ECAM-EPMI, nous nous intéressons aux cas de réseaux d'autopartage au moyen de véhicules électriques qui attirent de plus en plus l'attention. Les programmes se multiplient dans le monde et il y a un besoin en termes de méthodes et d'outils pour soutenir leur développement et management [58]. Plus particulièrement nous considérons le mode « unidirectionnel », permettant une meilleure flexibilité aux usagers comme décrit au Tableau I. Dans la littérature anglophone, les systèmes considérés sont appelés « *One-Way Electric Car-Sharing Networks* »[50]. L'association du mode « unidirectionnel » avec l'usage de véhicules électriques est relativement récente et soulève de nombreux défis (voir Tableau 1-II).

Dans ce travail, nous proposons une méthodologie utilisant les réseaux de Petri temporisés stochastiques d'une manière modulaire et paramétrable permettant la modélisation, la simulation et l'analyse de tels systèmes dynamiques complexes tout en prenant en compte l'ensemble de leurs activités et caractéristiques. Nous estimons au travers de nos résultats et publications que cette approche dynamique à événements discrets est d'une aide précieuse pour les acteurs de ces services et qu'elle peut influencer favorablement la viabilité économique et l'efficacité opérationnelle de ces systèmes de transport urbain.

1.3. Description du système d'étude

1.3.1. Représentation générale du système

La représentation générale du réseau considéré pour le développement de notre approche de modélisation et d'analyse est représentée par la Fig. 1.2. Elle illustre une structure réaliste d'un « réseau de véhicules électriques en libre-service » en mode unidirectionnel déployé dans une ville et autour de sa zone industrielle et commerciale.

Cette représentation va constituer notre support pour le développement et la description de notre méthodologie de modélisation au Chapitre 2. Ce dernier sera suivi d'une étude de cas réel exposé au Chapitre 4, après le Chapitre 3 dédié pour l'évaluation et l'analyse de performances via la simulation.

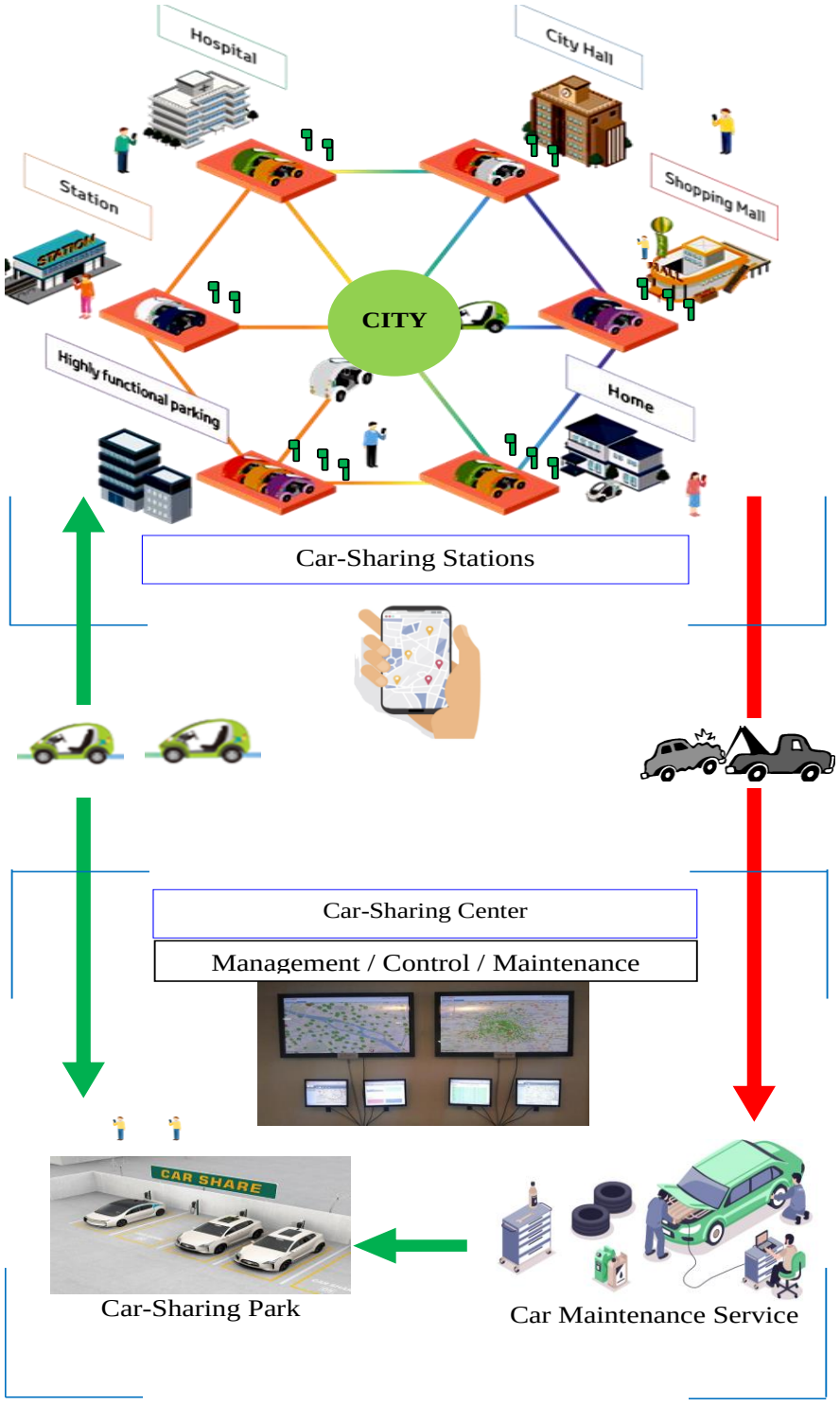


Fig 1.2. Réseau de voitures électriques en libre-service

1.3.2. Descriptif fonctionnel du système

Doté d'un centre de gestion et de maintenance, le réseau dispose de « N_S » parking (stations) désignés par S = {S_1, S_2… S_n}, placés dans des zones stratégiques autour de la ville (hôpital, gare routière, école, …).

Chaque station (S_i) constitue un parking de stationnement comprenant un nombre limité (C_i) de zones d'emplacement de voitures. Les stations sont équipées de bornes de recharge électrique. Le réseau compte une flotte de N_V véhicules électriques répartis dans les différentes stations. Selon le mode unidirectionnel, chaque voiture - lorsqu'elle est disponible et prête (suffisamment chargée) - peut être empruntée par un usager à partir d'une station de départ. Après la fin du service de l'usager, la voiture peut être restituée dans n'importe quelle autre station (pouvant être la station de départ), à condition qu'il y au moins une place disponible pour son stationnement. Après avoir garé la voiture, celle-ci redevient disponible pour d'autres utilisateurs après une durée de recharge de la batterie – si nécessaire – permettant une prochaine location.

Contrairement aux systèmes de vélos en libre-service, les incidents et accidents de voitures ne sont pas négligeables. Ils nécessitent un temps d'intervention et/ou de maintenance relativement long. Dans cette situation, des opérateurs spécialisés déplacent les voitures individuellement vers le centre de maintenance. On considère qu'à la fin de chaque maintenance, la voiture réparée est systématiquement réintroduite dans le réseau via la station la plus proche du centre de maintenance. Contrairement au mode flottant (sans stations), les voitures ne peuvent pas être déposées n'importe où et les capacités des stations doivent être respectées. Pour aider et faciliter l'usage du service par les clients, des applications web permettent aux usagers de connaître en temps réel la disponibilité des places ou de voitures dans les stations. Comme indiqué précédemment (voir Tableau 1.II), la gestion opérationnelle de ces systèmes est plus difficile que le cas des systèmes de vélos en libre-service. Dans ce dernier, des camions peuvent être utilisés pour déplacer plusieurs vélos en même temps entre les stations. Il est difficile de le faire pour les voitures en raison de leur taille et de la difficulté de charger et de décharger les voitures. C'est pourquoi des politiques basées sur l'utilisateur sont souvent appliquées.

Des paramètres plus spécifiques et des détails techniques sur le système réel considéré seront donnés au chapitre 4 dédié pour une application concrète.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour une étude générale sur l'autopartage au moyen de voitures électriques en libre-service. Après une présentation générale de ce nouveau mode de mobilité urbaine, une étude bibliographique a été réalisée. Ainsi, notre contribution a été confrontée aux travaux de la littérature.

Le chapitre suivant portera sur la modélisation de ces systèmes à l'aide des réseaux de Petri temporisés stochastiques. Le modèle sera développé d'une manière modulaire et paramétrables permettant de reproduire le comportement dynamique de ces systèmes, tout l'ensemble de leurs activités, caractéristiques et contraintes.

Chapitre 2

Modélisation à l'aide des Réseaux de Petri temporisés stochastiques

Ce chapitre a pour objectif de développer une approche de modélisation des réseaux de voitures en libre-service à l'aide des réseaux de Petri temporisés stochastiques. Nous considérons le cas de systèmes d'autopartage utilisant les voitures électriques en mode « unidirectionnel (aller simple) » appelés « *One-Way Electric Car-Sharing Networks* ». Notre approche de modélisation modulaire et paramétrable est développée en vue de l'évaluation et l'analyse de performances de ces systèmes. L'ensemble de notre méthodologie prend en compte la complexité dynamique des systèmes considérés. La capacité des stations, la recharge des batteries, l'entretien des voitures, la demande stochastique des usagers et bien d'autres caractéristiques ou paramètres sont pris en compte.

2.1. Introduction aux réseaux de Petri

2.1.1. Concept et facteurs de succès

Historiquement, le concept des réseaux de Petri (RdP) a été développé par le mathématicien Allemand Carl Adam Petri dans les années 1960/1962. C'est un outil graphique et mathématique permettant de décrire des relations existantes entre les conditions et les événements caractérisant le comportement d'un système dynamique. Le choix des réseaux de Petri peut être justifié par de nombreux avantages qui les distinguent des autres formalismes de modélisation

existants. Aujourd'hui, après plus de soixante ans de développement et d'applications, leurs facteurs de succès sont nombreux :

- Leur formalisme est à la fois graphique et mathématique. Il est d'une aide précieuse pour l'utilisateur ;
- Leur capacité à représenter des phénomènes divers notamment la synchronisation, le partage de ressources, le parallélisme, les conflits, la concurrence ;
- Leur grand intérêt a conduit à plusieurs variantes qui couvrent une diversité de systèmes à modéliser (systèmes continus, systèmes discrets, systèmes hybrides, systèmes stochastiques, etc.) ;
- Les méthodes d'analyse associées peuvent être des méthodes analytiques mais aussi des méthodes de simulation incontournables pour les systèmes complexes.
- Leur champ d'application est très large (systèmes de production, systèmes logistiques, systèmes de transport, systèmes de télécommunications, etc.) ;
- Les réseaux de Petri permettent la modélisation, l'analyse de performances, mais aussi l'étude des sujets plus spécifiques tels que contrôle, supervision, détection, ordonnancement, planification et conception

2.1.2. Formalisme et définitions de base

Cette section est décidée aux lecteurs non familiers avec l'usage des réseaux de Petri. Elle permet de rappeler quelques définitions et règles essentielles [61].
Comme description de base, un réseau de Petri défini comme :

$$PN = (P, T, Pré, Post, M0)$$

Avec :

$P = \{P_1, P_2, \ldots, P_n\}$	Ensemble fini et non vide de places
$T = \{ T_1, T_2, \ldots, T_m \}$	Ensemble fini et non vide de transitions
Pré : $\|P\|\times\|T\| \rightarrow N$	Matrice d'incidence avant qui définit les poids (entiers positifs non nuls) des arcs orientés des places vers transitions
Post : $\|T\|\times\|P\| \rightarrow N$	Matrice d'incidence arrière qui définit les poids (entiers positifs non nuls) des arcs orientés des transitions vers places
$M0 = \{M_0(P_1), M_0(P_2), \ldots\}$	Marquage (état) initial du réseau de Petri, c'est-à-dire le nombre de jetons initialement attribués à chaque place du réseau.
L'ensemble des places d'entrée (resp. de sortie) d'une transition T_j est noté $^\bullet T_j$ (resp. $T_j^\bullet$). Les poids d'un arc d'entrée et d'un arc de sortie sont respectivement notés $Pre(P_i, T_j)$ et $Post(P_i, T_j)$.	

D'un point de vue graphique, les places sont représentées par des cercles pouvant contenir des jetons représentés par des points. La distribution des jetons dans les différentes places représente le marquage du réseau. Les transitions sont représentées par des barres ou des rectangles. Elles sont reliées aux places ou vice-versa via des arcs orientés portant des poids. L'interprétation des places, des transitions et des arcs d'un réseau de Petri dépend du système modélisé. En général, les places peuvent représenter l'état des ressources matérielles ou informationnelles ; les transitions peuvent représenter le début ou la fin d'événements, d'opérations, de processus ou d'activités ; et les arcs peuvent représenter la direction de l'évolution du flux matériel ou d'information du système à modéliser.

2.1.3. Evolution dynamique d'un RdP

Le comportement dynamique d'un système modélisé à l'aide d'un réseau de Petri, peut être décrit par une succession de changements d'états (évolution du marquage) par franchissements de transitions validées marquage par marquage (exécution d'événement). Une transition ne peut être franchie que si elle est validée, ce qui signifie que toutes les conditions préalables pour l'activité correspondante sont remplies. En terme du RdP, il y a suffisamment de jetons disponibles dans toutes les places d'entrée de la transition à franchir. Lorsque la transition est validée, son franchissement se traduit par la suppression d'un ensemble de jetons dans toutes ses places d'entrée et par le rajout d'un ensemble de jetons dans toutes ses places de sortie. Le nombre de jetons supprimés ou rajoutés est déterminé par le poids de l'arc reliant la transition à la place correspondante. A noter que le poids d'un arc est de 1 lorsqu'il y a aucune indication (voir Fig. 2.1).

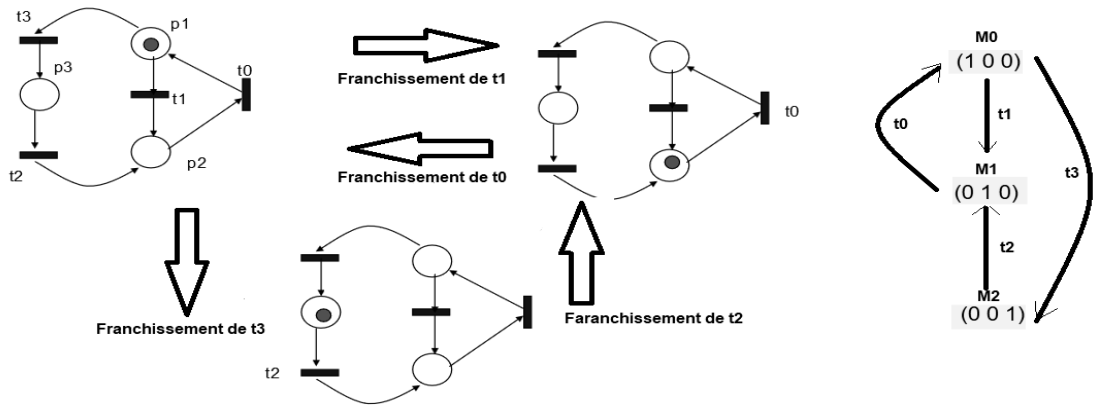


Fig. 2.1. Un exemple illustratif de l'évolution d'un réseau de Petri (3 états)

Formellement,

- Une transition T_j est dite validée (franchissable) pour un marquage donné M si seulement si :

$$\forall P_i \in {}^\bullet T_j, M(P_i) \geq Pre(P_i, T_j)$$

- Après le franchissement d'une transition validée T_j, le marquage M évolue à un nouveau M' comme suit :

$$\forall P_i \in P, \quad M'(P_i) = M(P_i) - Pre(P_i, T_j) + Post(P_i, T_j)$$

A titre d'illustration, la Figure 2.1 montre l'évolution d'un simple réseau de Petri avec 3 états (marquages accessibles).

2.1.4. Réseaux de Petri temporisés/stochastiques

Le grand intérêt scientifique des réseaux de Petri a conduit au développement de plusieurs extensions comme : les réseaux de Petri temporisés, les réseaux de Petri stochastiques, les réseaux de Petri continus, les réseaux de Petri hybrides, ou encore les réseaux de Petri lots. Ces extensions sont développées afin d'élargir leur champ d'applications et de répondre aux besoins et/ou aux spécificités de divers systèmes dynamiques complexes. Aujourd'hui, les réseaux de Petri constituent formalisme privilégié notamment par la communauté des systèmes à événements discrets. Il est à la fois graphique et mathématique, performant aussi bien pour l'analyse et l'évaluation analytique que pour la simulation de systèmes dynamique.

Le rajout du **« temps »** a été un des facteurs de succès des réseaux de Petri qui fait d'eux un outil performant pour l'évaluation de performances (analyse quantitative). Dans la littérature, l'association du temps aux réseaux de Petri est faite soit sur les places pour temporiser (réserver) les jetons avant le franchissement (RdP P-temporisés) ou sur les transitions (RdP T-temporisés) permettant d'associer un délai avant le franchissement aux transitions.

Étant donné que les transitions sont souvent utilisées pour modéliser des événements pouvant être des opérations, des actions, ou des activités, le délai de franchissement d'une transition correspond au délai d'exécution de l'événement associé et le franchissement de la transition correspond à l'achèvement de l'événement. Deux types de transitions peuvent être utilisées pour la modélisation d'un système donnée :

- Les transitions immédiates avec un délai de franchissement nul représentant des événements immédiats ;
- Les transitions temporisées avec un délai de franchissement pouvant être déterministe ou stochastique.

Les modèles SPN, GSPN et DSPN sont largement utilisés dans la littérature [43]-[45], où une distribution exponentielle (de paramètre λ_j) est associée à chaque transition stochastique T_j, où $1/\lambda_j$ spécifie son délai moyen de franchissement (ou λ_j est le taux de franchissement moyen de la transition). L'évaluation et l'analyse de performances des systèmes modélisés par ce type de modèles peuvent se faire à l'aide de méthodes analytiques selon la caractérisation du processus stochastique associé. En particulier, la théorie Markovienne est exploitée sous certaines hypothèses.

Dans le cas de systèmes complexes réels pouvant conduire à une explosion combinatoire du nombre d'états et/ou à un processus stochastique non caractérisable notamment lorsque les transitions sont associées à des lois non exponentielles (uniforme, géométrique, déterministe, …) des méthodes de simulation ou d'approximation numérique sont incontournables. Dans ce cas, les réseaux de Petri sont également puissants comme outil ou approche de simulation à événements discrets.

De plus, pour modéliser finement un système dynamique, la puissance du formalisme des réseaux de Petri stochastiques/temporisés permet d'associer aux modèles des politiques appropriées pour gérer la « sélection des transitions à franchir » et la prise en compte de la « mémoire temporelle des transitions validées mais non sélectionnées ». Autrement dit, ces politiques permettent de gérer l'exécution des événements qui se produisent à des instants précis dans le temps et le timing (horloges) entre les différents événements. Brièvement, les principales politiques sont :

- La sélection de la transition à franchir : Quand un ensemble de transitions temporisées sont validées pour un marquage donné, la transition à franchir est celle dont le délai de franchissement est le plus petit (compétition). Lorsque plusieurs transitions peuvent être franchissables au même temps, une politique de priorité peut être également adoptée en cas de situation dite de conflit.
- La mémoire temporelle des transitions : Une fois une transition sélectionnée est franchie, la gestion du délai associé aux transitions validées mais non franchies se pose et se gère à base de deux politiques selon la réalité de l'événement représenté. Réactualisation de l'horloge (restart process) ou Enregistrement de l'horloge (continue process) [44].

Par ailleurs, une autre spécification à associer aux transitions concerne la politique de service pouvant être en mon-serveur (*single server*) ou en multi-serveur (*infinite serveur*) selon les événements modélisés.

2.1.5. Exemple illustratif de modélisation

À titre d'illustration en termes de modélisation, le réseau de Petri représenté par la Fig. 2.2 (a) modélise le cycle de charge et de décharge d'un véhicule électrique, comme un simple processus état/événement. Comme l'indique le marquage de la place p4 (M(p4) = 1), le véhicule électrique est initialement déchargé. Après un certain temps (durée moyenne $1/\lambda 1$) relatif à la transition stochastique t1 et de la disponibilité de la borne de recharge (M(p2) = 1), la recharge est déclenché par le franchissement de la transition t1, conduisant à un nouveau marquage M(p1) = 1, indiquant que le véhicule est en cours de recharge. Après la durée du processus de recharge fixée à $1/\lambda 2$ en moyenne, la transition t2 est franchie et par conséquent M(p2) = 1 pour indiquer que la borne de recharge est maintenant disponible et en même temps M(p3) = 1 pour spécifier que le véhicule électrique est maintenant chargé. Pendant l'utilisation de la voiture, sa batterie se décharge suivant le taux $\lambda 3$ associé à la transition t3. Le processus qui vient d'être décrit peut-être associé à un graphe de marquages, retraçant l'évolution état/transition du réseau de Petri (voir Fig. 2.2.(b)).

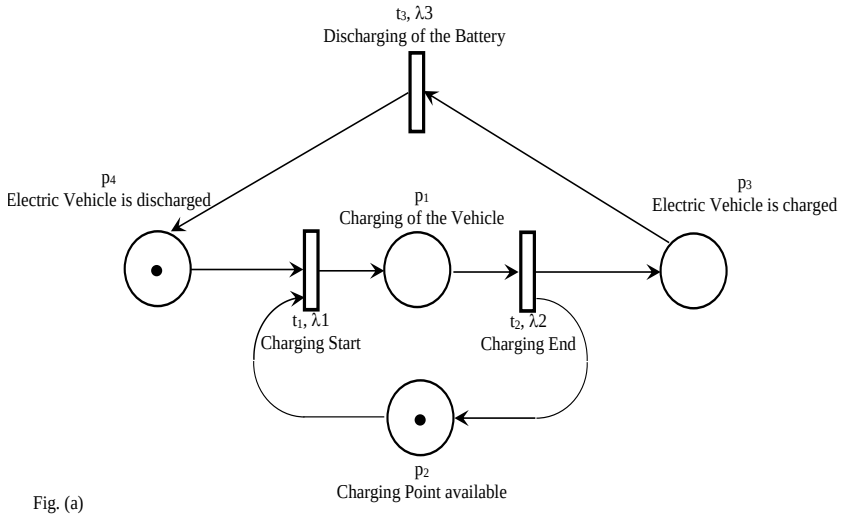


Fig. (a)

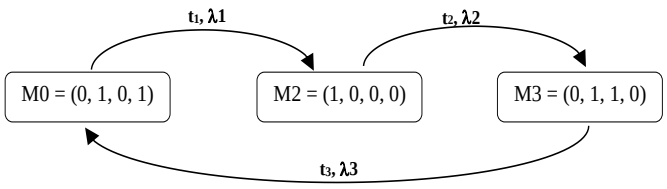


Fig. (b)

Fig. 2.2. Un exemple illustratif de réseau de Petri (cycle de charge et de décharge)

Pour la suite de ce travail, nous supposons que le lecteur est familier du fonctionnement et des propriétés de base des Réseaux de Petri.

2.2. Modélisation d'un réseau d'autopartage en libre-service

Cette section a pour objectif de développer une approche de modélisation des réseaux de voitures en libre-service à l'aide des réseaux de Petri temporisés stochastiques. Nous considérons le cas de systèmes d'autopartage utilisant les voitures électriques en mode « unidirectionnel (aller simple) » appelés « One-Way Electric Car-Sharing Networks ».

Notre approche de modélisation modulaire et paramétrable est développée en vue de l'évaluation et l'analyse de performances de ces systèmes. L'ensemble de notre méthodologie prend en compte la complexité dynamique des systèmes considérés. La capacité des stations, la recharge des batteries, l'entretien des voitures, la demande stochastique des usagers et bien d'autres caractéristiques ou paramètres sont pris en compte.

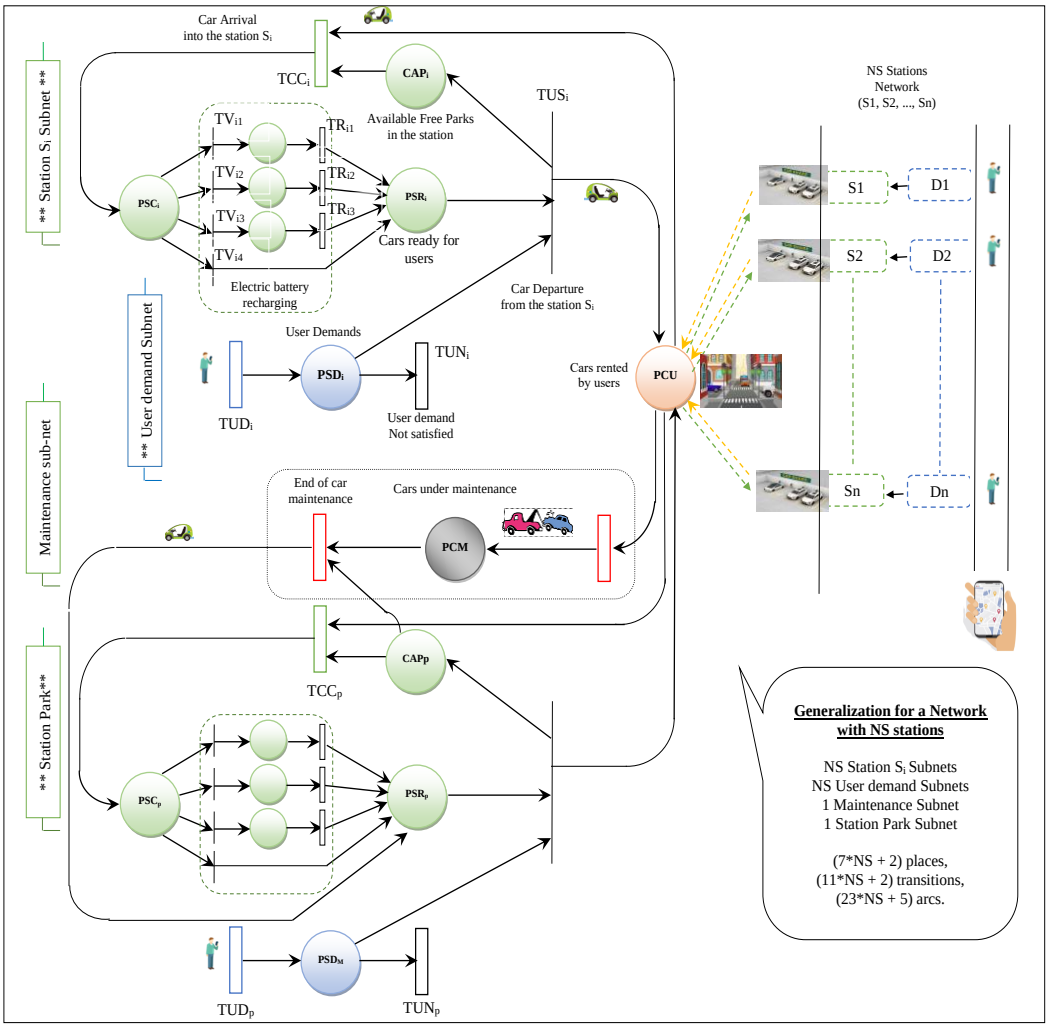


Fig. 2.3. Modèle RdP d'un système d'autopartage de voitures électriques en libre-service

2.2.1. Descriptif général du modèle développé

En partant d'une structure réaliste présentée dans le Chapitre (2) section 3, la modélisation à l'aide d'un réseau de Petri temporisé stochastique est représentée par la Fig. 2.3. Les Tableaux 2.I et 2.II donnés ci-dessous permettent au lecteur une compréhension de synthèse du modèle développé (Fig. 2.3). Grâce à la modularité du modèle, il peut être reproduit pour un grand réseau avec NS stations. A titre d'information, pour NS stations, le réseau de Petri contiendra (7*NS + 2) places, (11*NS + 2) transitions et (23*NS + 5) arcs.

TABLE 2.I
DESIGNATION ET INTERPRETATION DES PLACES

Places	Interprétation
UCP	Le marquage de la place PCU représente les voitures louées en cours d'utilisation par les usagers.
PSC_i	Le marquage de chaque place PSC_i représente les voitures entrantes dans la station S_i et seront soumises au processus de recharge en fonction du niveau d'énergie des batteries.
PV_{i1}, PV_{i2}, PV_{i3}	Ces places associées à chaque station S_i permettent une classification des voitures entrantes après le service selon leurs niveaux d'énergie des batteries.
PSR_i	Cette place et son marquage permettent de représenter le nombre de voitures électriques prêtes pour être utilisées par les usagers.
CAP_i	Cette place est utilisée pour représenter le nombre de places libres dans chaque station S_i. Autrement dit, elle est utilisée pour respecter la capacité C_i de chaque station S_i.
PSD_i	Cette place permet d'enregistrer les demandes des usagers en attente de service selon la disponibilité des voitures dans la station S_i.
MCP	Cette place permet la modélisation des opérations de maintenance. Son marquage représente les voitures en cours maintenance suite à des accidents ou incidents.
PSCp, PSRp, CAPp	Ces places modélisent une station particulière « Parking » similaire aux autres stations S_i, mais également utilisée par le service de maintenance pour réintroduire les voitures réparées dans le réseau en libre-service.

TABLE 2.II

DESIGNATION ET INTERPRETATION DES TRANSITIONS

Transitions	Signification
TUD_i	Cette transition modélise la demande des usagers au niveau de chaque station S_i.
TUS_i	Cette transition permet de modéliser l'exécution d'une demande d'un usager (satisfaction de la demande) et son départ de la station S_i avec une voiture en sa possession.
TUN_i	Cette transition permet la modélisation du rejet d'une demande d'un usager après un certain délai d'attente. Demande insatisfaite à cause de la non disponibilité de voitures dans la station S_i.
TCC_i	Cette transition permet la modélisation du retour de voitures vers la station S_i par les usagers. Chaque voiture entrante sera ensuite soumise au processus de recharge électrique selon le niveau de sa batterie.
TV_{i1}, TV_{i2}, TV_{i3}, TV_{i4}	Ces transitions permettent la classification de l'état des voitures entrantes en fonction du niveau de leurs batteries.
TR_{i1}, TR_{i2}, TR_{i3}	Ces transitions représentent au niveau de chaque station S_i les opérations de la recharge électrique selon les niveaux des batteries.
TCM	Cette transition représente les opérations de dépannage conduisant les voitures vers la réparation, entretien et/ou maintenance si nécessaire en cas d'incident ou accidents.
TMP_R	Cette transition permet de modéliser la fin d'une opération de maintenance d'une voiture et sa réintroduction dans le réseau comme voiture prête pour les usagers.
TCCp, TVp1, TVp2, TVp3, TVp4 TRp1, TRp2, TRp3, TUD_P, TUN_P, TUS_P	Ces transitions sont associées à la station particulière « Parking » similaire aux autres stations S_i, mais également utilisée par le service de maintenance pour remettre les voitures sorties de maintenance en service. Elles représentent respectivement le retour des voitures par les usagers (TCCp) ; la classification des voitures entrantes selon le niveau des batteries (TVp1, TVp2, TVp3, TVp4) ; la recharge électrique des voitures selon leurs niveaux de batteries (TRp1, TRp2, TRp3) ; la demande, satisfaction et non satisfaction des demandes au niveau de cette station (TUD_P, TUN_P, TUS_P)

Bien évidemment, les tableaux précédents et la Fig. 2.4 ne suffisent pas aux lecteurs pour comprendre intégralement les paramètres, les configurations et le fonctionnement dynamique du modèle développé. Une observation du modèle globale montre différents modules permettant plusieurs fonctions notamment la demande des usagers, le service (ou non satisfaction de la demande) des usagers, le départ et le retour des voitures d'une station, la recharge électrique des voitures selon l'état des batteries au retour, les activités de maintenance, etc. La Fig. 2.4 et les tableaux 2.I et 2.II désignant et interprétant l'ensemble des places et transitions permettent une description générale du modèle. Une description plus détaillée des principales fonctions est développée dans les sections suivantes.

2.2.2. Descriptif du module de la station et de la recharge

Comme le montre la Fig. 2.4, chaque station S_i est modélisée en utilisant six places (PSC_i, PV_{i1}, PV_{i2}, PV_{i3}, PSR_i et CAP_i) et tous les arcs et transitions associés. Le marquage de la place PSC_i représente les voitures entrantes disponibles dans la station S_i et classées dans les places PV_{i1}, PV_{i2}, PV_{i3} selon l'état de leurs batteries au retour dans cette station. Le marquage de la place CAP_i représente le nombre de places libres dans cette station et sert à limiter sa capacité à C_i.

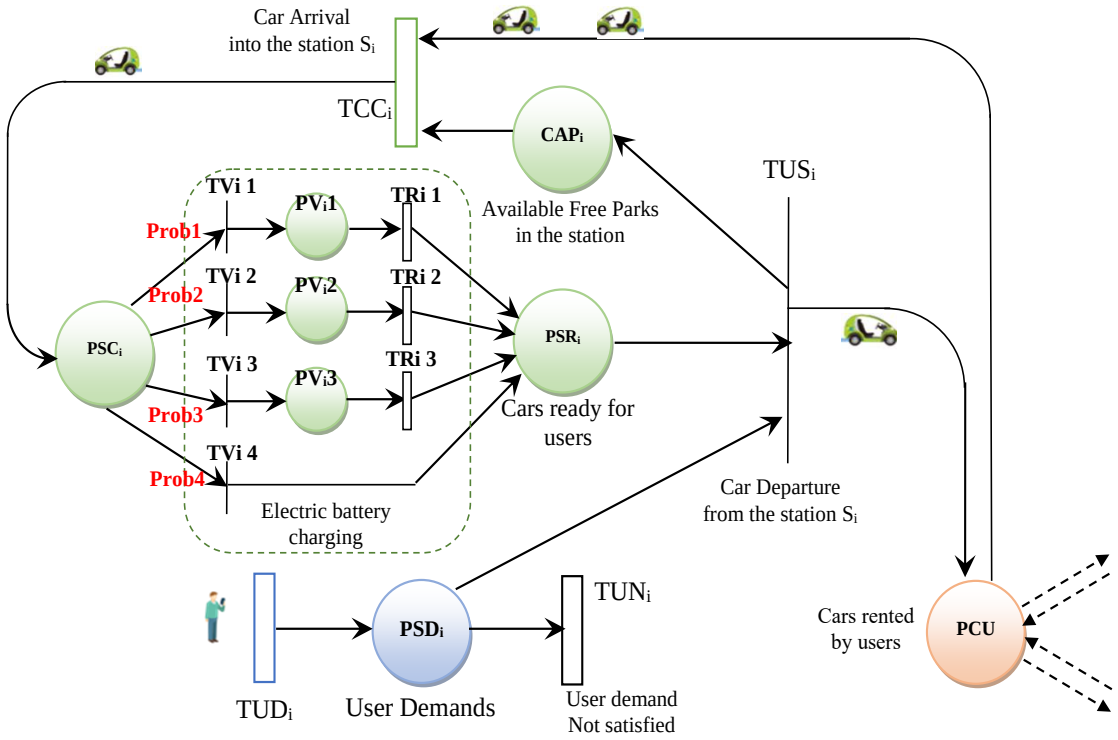


Fig. 2.4. Zoom sur le module d'une station S_i la demande des usagers

En considérant que la consommation de l'énergie électrique des voitures dépend des distances aléatoires parcourues de leurs retours dans une station S_i, nous avons "discrétiser" l'indicateur de l'état des batteries des voitures entrantes en quatre niveaux inclus dans les intervalles suivants : [0%--25%] ; [25%--50%] ; [50%--75%] ; [75%--100%] comme le montre la Fig. 2.5.

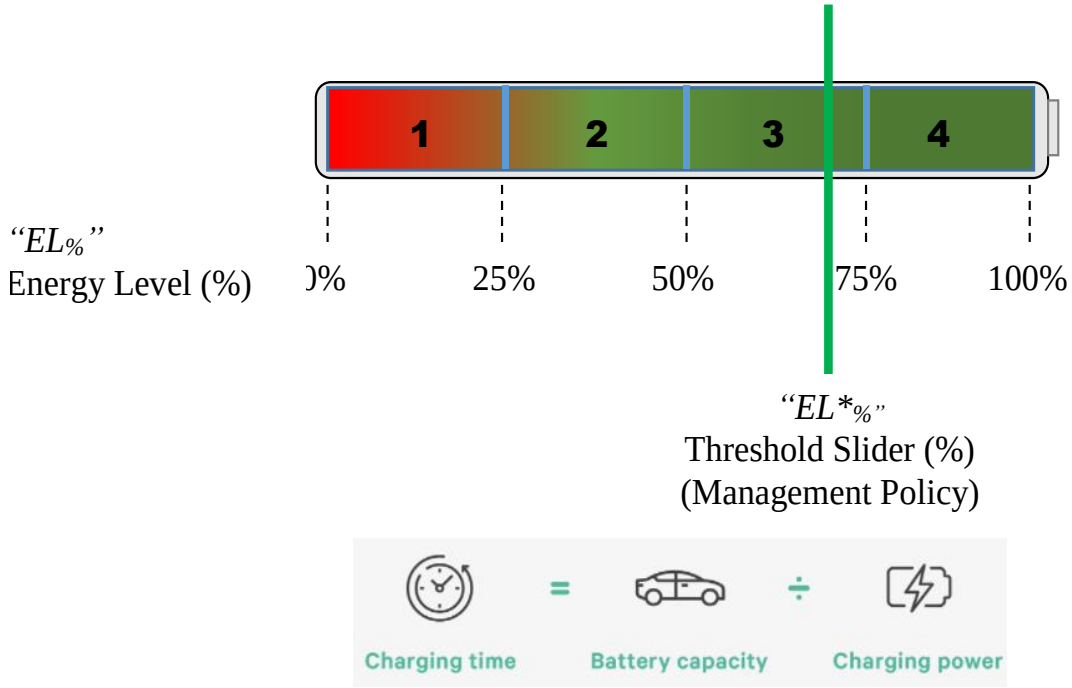


Fig. 2.5. Discrétisation du niveau de la charge / décharge d'une batterie

Ainsi, lorsqu'une voiture revient à la station S_i, la durée de sa recharge sera relative au niveau d'énergie actuel de sa batterie. Dans le modèle du réseau de Petri développé, les voitures arrivant dans la place PSC_i, en franchissant les transitions TCC_i, sont immédiatement soumises au processus de recharge électrique en fonction de leurs niveaux d'énergie.

Dès le retour d'une voiture à la station S_i par le franchissement de la transition TCC_i permettant le placement d'un jeton dans la place PSC_i, la sélection de l'état (niveau de la batterie) de chaque voiture s'effectue d'une manière « probabiliste » en franchissant l'une des transitions immédiates TV_{i1}, TV_{i2}, TV_{i3} et TV_{i4} en fonction des probabilités associées. Ainsi, ces franchissements permettent une classification des voitures entrantes selon quatre niveaux de recharge définis par la Fig. 2.5 dans les places PV_{i1}, PV_{i2} et PV_{i3}. Le marquage de la place PSR_i représente les voitures prêtes pour les usagers après une durée de recharge adéquate assurée par les délais de franchissement des transitions TR_{i1}, TR_{i2}, et TR_{i3}. A noter que le franchissement de la transition TV_{i4} correspond à d'éventuelles voitures pouvant

revenir déjà suffisamment chargées qui constitue le quatrième niveau de recharge possible. Dans ce cas, ces voitures sont prêtes pour de nouveaux usagers sans recharge électrique supplémentaire.

Le modèle permet une configuration du processus de recharge électrique en fonction des données sur le comportement de la mobilité des usagers d'un système réel. Une estimation des voitures entrantes en fonction de leurs niveaux d'énergie (EL_s% avec s = 1 à 4) de leurs batteries correspondant aux quatre situations considérées (0% < EL_1% ≤ 25 % ; 25 % < EL_2 % ≤ 50 % ; 50 % < EL_3 % ≤75 % ; 75 % < EL_4 % ≤ 100 %) comme illustré par la Fig.2.5. Comme indiqué précédemment, une sélection probabiliste d'un état est effectuée en utilisant des probabilités adéquates ($Prob_s$, avec s = 1 à 4) pour gérer les franchissements des transitions immédiates TV_{i1}, TV_{i2}, TV_{i3} et TV_{i4}.

Les voitures en cours de charge sont représentées par les marquages des places PV_{i1}, PV_{i2} et PV_{i3} et les durées de recharge à partir d'un niveau d'énergie donné "EL%" à un niveau d'énergie suffisant "EL*%", à fixer selon la stratégie de l'exploitant (politique de recharge), sont modélisés par les délais de franchissements générés par les transitions stochastiques TR_{i1}, TR_{i2} et TR_{i3}.

Malgré la « discrétisation » du niveau de la batterie selon la Fig. 2.5, la durée de la recharge reste probabiliste dans chaque intervalle. Pour cela, dans chaque intervalle définissant les quatre états possibles, des distributions uniformes adéquates sont à associer aux transitions TR_{i1}, TR_{i2} et TR_{i3} afin de générer uniformément sur un intervalle [CT_{min}, CT_{max}] les temps de recharge nécessaires à partir d'un niveau d'énergie donné "EL%"∈]X % , Y %] au niveau d'énergie suffisant fixé à "EL*%".

Notons que :

- CT_{min} est la durée de la recharge requise d'un niveau X % à un niveau EL* % de recharge et CT_{max} de Y% à "EL*%".
- "EL* %" représente le niveau de charge suffisant selon la politique de recharge adoptée rendant les voitures prêtes pour les utilisateurs.
-] X %, Y %]∈ {] 0 %, 25 %],] 25 %, 50 %],] 50 %, 75 %],] 75 %, 100 %]}.
- Comme indiqué sur la Fig. 2.5, le calcul des CT_{min} et CT_{max} pour chaque intervalle dépend de la capacité de la batterie des voitures déployées et de la puissance de recharge de la station.

2.2.3. Descriptif module de la demande des utilisateurs

En ce qui concerne le processus de la demande des usagers au niveau des différentes stations S_i, il est modélisé en utilisant des transitions exponentielle TUD_i (de paramètre λ_{TUDi}). Ainsi, la demande suit un processus de Poisson. Lorsqu'il y a des voitures disponibles dans la place PSR_i, l'acceptation de la

demande d'un usager est effectuée en franchissant la transition immédiate TUS_i. A l'image de la pratique, certaines demandes d'usagers peuvent être perdues (non satisfaites), après un délai d'attente stochastique, lorsqu'il n'y a plus de voitures disponibles et prêtes dans la station souhaitée. Un tel événement est représenté par la transition TUN_i. En considérant que le temps d'attente de chaque usager dépend de sa décision personnelle et de sa propre patience (phénomène sans mémoire), nous supposons que la transition TUN_i est distribuée de manière exponentielle, générant un temps d'attente moyen de $1/\lambda_{TUNi}$ unités de temps.

2.2.4. Descriptif du module de la maintenance / station « parking »

Comme le montre la Fig. 2.6, les activités de maintenance des voitures notamment en cas d'accidents et/ou d'incidents sont prises en compte. La transition désignée par TCM est utilisée pour modéliser le remorquage d'une voiture vers le service de maintenance représenté par la place PCM. Le délai de franchissement associé à la transition TCM est lié au taux moyen d'accidents/incidents estimé dans le cas d'un système réel à étudier.

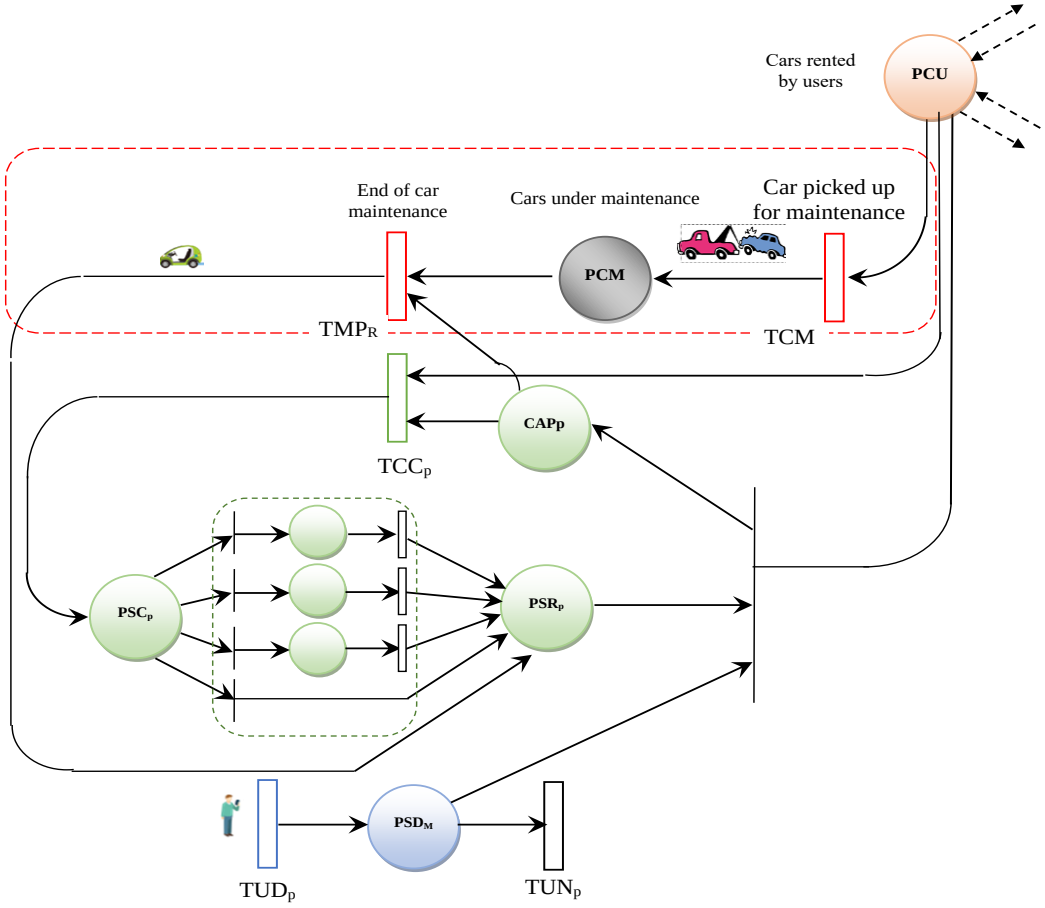


Fig. 2.6. Zoom sur le module de la maintenance et de la station « parking »

Le marquage de la place PCM représente les voitures en cours d'une opération de maintenance à un instant donné. Chaque franchissement de la transition stochastique TMP_R modélise la fin de cette opération de maintenance. Le délai de franchissement associé doit correspondre au taux moyen de réparation/entretien d'une voiture. En franchissant la transition TMP_R, nous considérons qu'à la fin de chaque opération de maintenance, la voiture réparée/entretenue est systématiquement réintroduite dans le réseau de voitures en libre-service via la station la plus proche au service de maintenance, appelée « station parking ». Du point de vue des usagers, cette station est identique aux autres stations notées par S_i. La seule différence réside dans le fait qu'elle est aussi exploitée par le service de maintenance pour la réintroduction les voitures réparées / entretenues, d'où le rajout des places et transitions (PCM, TCM, TMP_R) spécifiques pour représenter les activités de maintenance. Le reste des composants du module représenté par la Fig. 2.6 reste le même avec toutes les autres stations S_i.

Conclusion

Après notre motivation concernant le choix des réseaux de Petri et la présentation de leurs concepts de base comme un outil de modélisation et d'analyse de performances, ce chapitre a permis de développer une approche de modélisation des réseaux de voitures en libre-service à l'aide des réseaux de Petri temporisés stochastiques. Nous avons considéré le cas de systèmes d'autopartage utilisant les voitures électriques en mode « unidirectionnel (aller simple) » appelés « One-Way Electric Car-Sharing Networks » décrit dans le chapitre précédent.

Notre approche de modélisation modulaire et paramétrable est développée en vue de l'évaluation et de l'analyse de performances de ces systèmes. Le modèle présenté prend en compte la complexité dynamique des systèmes considérés. La capacité des stations, la recharge des batteries, la maintenance des voitures, la demande stochastique des usagers et bien d'autres caractéristiques ou paramètres sont pris en compte.

Après le prochain chapitre portant sur l'exploitation du modèle pour l'évaluation et l'analyse de performances, le dernier chapitre portant sur une application réelle va permettre au lecteur de mieux comprendre tous les aspects de paramétrage, de configurations et toute la pertinence du modèle développé sur un cas d'étude.

Chapitre 3

Evaluation et Analyse de Performances à l'aide de la simulation à événements discrets

Ce chapitre a pour objectif de développer une méthodologie pour l'exploitation du modèle développé au chapitre précédent en vue d'évaluation et d'analyse de performances. La complexité dynamique et la densité des réseaux associés aux systèmes d'autopartage utilisant les voitures électriques nous imposent de s'appuyer sur une approche de simulation à événements discrets. Ce type d'approche est bien adapté au modèle développé et aux systèmes considérés. Un ensemble d'indicateurs de performances sera formalisé pour l'analyse de performances de ces systèmes du point de vue opérationnel.

3.1. Analyse à l'aide des réseaux de Petri

Un des grands facteurs de succès des réseaux de Petri est de pouvoir combiner entre deux types d'analyse à savoir l'analyse qualitative et l'analyse quantitative.

- L'analyse qualitative, qui se réalise sur la base d'un modèle non temporisé, permet l'étude d'un ensemble d'éléments qualitatifs tels que les blocages, les conflits, la vivacité, la bornitude, etc. L'analyse de ce type de propriétés est particulièrement utile pour la validation du modèle réalisé et par conséquent de s'assurer des bonnes propriétés du système modélisé.
- L'analyse quantitative porte sur l'évaluation de performances du système étudié. Elle se fait au travers du modèle temporisé représentant le système à étudier. En fonction de la nature de ce dernier et des objectifs recherchés,

- Plusieurs indices de performances peuvent être évalués et analysés (temps de cycle, taux de panne, niveau de stock, niveau de service, etc.).

3.1.1. Evaluation de performances

Pour l'évaluation de performances et l'analyse de tout système modélisé à l'aide d'un réseau de Petri temporisé stochastique, des approches analytiques ou des techniques de simulation peuvent être envisagées. Le choix dépend de certaines conditions ou d'hypothèses associées au modèle développé en lien avec les caractéristiques du système représenté.

- Les approches analytiques peuvent être appliquées en particulier lorsque le processus stochastique associé au réseau de Petri est identifiable et analytiquement solvable [43]-[45]-[22]. Les méthodes analytiques reposent sur l'étude du processus stochastique associé qui dépend notamment du type des lois stochastiques associées. De nombreux résultats théoriques et des méthodes analytiques ont été développés en exploitant l'analyse Markovienne adaptée dans le cas notamment d'un réseau de Petri ayant des transitions exponentielles (sans mémoire). Techniquement, ces méthodes se basent sur la résolution du processus stochastique associé au réseau de Petri. Elles permettent le calcul des probabilités des états nécessaires pour estimer un ensemble d'indicateurs de performances moyennes formalisé sur la base des places et des transitions constituant le réseau de Petri. Les méthodes analytiques sont souvent :

    - Limitées aux systèmes dynamiques dont le réseau de Petri associé génère un nombre d'états (marquages) fini. En effet, cette caractéristique n'est pas toujours assurée notamment dans le cas de systèmes réels tels que les systèmes de transport urbains souvent de grande taille et se caractérisent par de nombreux paramètres et variables. Une des limites des méthodes analytiques réside dans l'explosion combinatoire caractérisant les réseaux de Petri.

    - Restrictives par rapport aux types de lois stochastiques associées aux transitions permettant de représenter la stochasticité des délais d'exécution et/ou d'occurrence des événements associés au système modélisé. Hormis les transitions exponentielles (sans mémoire) permettant de s'appuyer sur la théorie markovienne, associer des lois quelconques aux transitions d'un réseau de Petri peut rendre le processus stochastique associé complexe à caractériser ou à résoudre analytiquement.

- En revanche, les restrictions des méthodes analytiques sont levées lorsque le modèle est étudié via la simulation à événements discrets. Cette dernière s'avère incontournable pour l'étude de systèmes complexes et les Réseaux de Petri s'y adaptent pertinemment à ce type d'approches grâce à leur formalisme mathématique permettant la programmation de leur dynamique sous forme d'outils de simulation. Ainsi, dans le cas de systèmes dynamiques de grande taille et/ou complexes dont les processus stochastiques ne sont pas caractérisables ou non solvables pour les raisons évoquées précédemment, des techniques de simulation deviennent utiles. C'est le cas des réseaux d'autopartage utilisant les voitures électriques en libre-service perçus comme des systèmes à événements discrets.

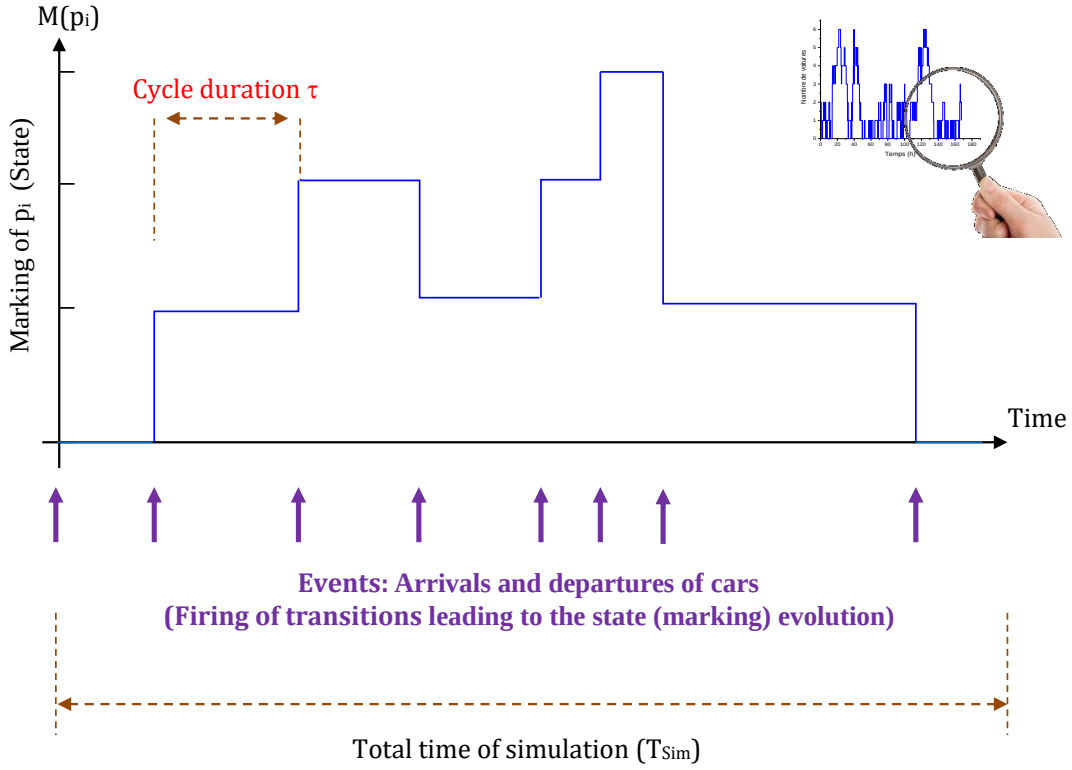


Fig 3.1. Trajectoire « Temps / Evénement (transition) / Etat (marquage) » (comportement dynamique)

Dans ce contexte, les réseaux de Petri se prêtent particulièrement bien à la simulation. De plus, il existe un grand nombre de logiciels permettant de simuler et d'analyser différentes classes de Réseaux de Petri.

En effet, grâce aux bases mathématiques des réseaux de Petri (règles de franchissement des transitions, équation d'état, politiques de gestion du temps, résolution de conflits de franchissement, …), la technique de simulation consiste en

l'exécution du modèle du réseau de Petri faisant évoluer son marquage dans le temps par une succession de franchissements de transitions sélectionnées une à une après validation d'un marquage à un autre.

Cette simulation dynamique constitue une imitation du fonctionnement du système associant Temps / Evénement / Etat. Le processus de simulation permet de générer les trajectoires "Etat/Temps" du système modélisé qui représentent son comportement dynamique (voir Fig. 3.1). Ces trajectoires ou les listings « Temps / Evénement (transition) / Etat (marquage) » constituent la base pour l'estimation moyenne de différents indicateurs de performances du système modélisé.

3.1.2. Comportement dynamique "Etat/Temps"

La Fig. 3.1 illustre l'exécution dynamique d'un réseau de Petri à l'aide de la simulation à événements discrets. Chaque cycle représente l'état d'une place P_i à un instant donné défini entre le franchissement d'une transition T_j (exécution d'un événement) et le franchissement suivant d'une autre transition T_k conduisant au changement de l'état de la place P_i.

A chaque événement, le temps de simulation est incrémenté en fonction du type de transition franchie après son délai d'exécution requis qui dépend de sa nature (immédiate, déterministe, stochastique). A la fin du processus de simulation, après une durée déterminée ($T_{sim} \rightarrow \infty$), les trajectoires « Temps / Evénement (transition) / Etat (marquage) » générées sont utilisées pour estimer différentes mesures de performances du système modélisé.

De nombreuses performances peuvent être définies et formalisées en exploitant et interprétant l'évolution du marquage des places (Eq. (3.1) – par exemple : nombre moyen de voitures disponibles dans chaque station), le temps de séjour moyen des jetons dans les différents places (Eq. (3.2) – par exemple, temps d'immobilisation des voitures dans les stations), et les taux de franchissement des transitions (Eq. (3.5) - par exemple, les taux d'incident et de maintenance des voitures), etc.

3.1.3. Formalisation des indicateurs de performances :

Un indicateur de performance constitue une mesure qui nous permet de comprendre le comportement dynamique du système et de quantifier ses performances. Sur la base d'un réseau de Petri et de son comportement dynamique, plusieurs indicateurs peuvent être formalisés pour l'analyse d'un système d'autopartage utilisant des voitures électriques en libre-service.

Tout en se référant absolument au modèle développé au chapitre précédent, pour l'interprétation et la formalisation d'un ensemble d'indicateurs, considérons la Fig. 3.1 et les notations données dans le Tableau 3.I suivant :

Les principaux indicateurs de performances sont formalisés en deux catégories selon les places ou les transitions d'un réseau de Petri.

Tous les indicateurs développés peuvent être calculés pour différents paramètres et/ou scénarios du système représenté par son modèle réseau de Petri développé au chapitre précédent.

TABLE 3.I

NOTATIONS UTILISEES POUR LA FORMALISATION DES INDICES DE PERFORMANCES

Notations	Interprétations
P_i	Représente une place donnée P_i et son marquage par $M(P_i)$;
T_j	Représente une transition donnée T_j ;
T_{sim}	Représente le temps total de simulation ;
N_{Rep}	Représente le nombre de réplications de la simulation ;
k	Représente l'indice de la $k^{ième}$ réplication d'une simulation ;
τ_k	Représente la durée d'un cycle entre deux franchissements ;
$M(Pi)_k$	Représente le nombre de jetons dans la place P_i au début du cycle ;
$NF(Tj)_k$	Représente le nombre de franchissement d'une transition T_j ;
NT_k	Représente le nombre de jetons traversant la place jusqu'à la fin du cycle en cours ;

1. Indicateurs de performances relatifs aux places :

➢ Marquage moyen d'une place P_i

L'indicateur de performance (Eq. (3.1)) permet le calcul du nombre moyen de voitures électriques disponibles dans une station donnée S_i du réseau, en fonction des marquages des différentes places : PSC_i (voitures en cours de recharge), PSR_i (voitures prêtes pour les usagers), PCU (voitures en cours de service par les usagers), PCM (voitures en cours de maintenance), etc.

$$\overline{M(P_i)} = \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \left(\frac{\sum (M(p_i)_k * \tau_k)}{T_{Sim}} \right) \qquad \textbf{Eq.(3.1)}$$

- **Temps de séjour moyen des jetons dans une place P_i**

L'indicateur de performance (Eq.(3.2)) permet le calcul du temps de séjour moyen des voitures à différents endroits du réseau (gares, ville, centre de maintenance ; …). Cet indicateur de performance est utile pour avoir une vision sur la mobilité, l'utilisation et la rotation des voitures durant le service.

$$\overline{S(P_i)} = \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \left(\frac{\sum (M(p_i)_k * \tau_k)}{NT_k} \right) \qquad \text{Eq.(3.2)}$$

- **Pourcentage d'une station vide ou pleine**

Dans le cas d'un système d'autopartage, il est intéressant d'estimer le pourcentage (%) ou la probabilité de deux situations critiques à savoir les situations de stations de voitures électriques vides ou saturées. Pour une station donnée S_i, ceci se produit lorsque $M(PSR_i) = 0$ ou $M(PSR_i) = C_i$,. Nous nous intéressons à la place PSR_i, si on s'intéresse uniquement aux voitures prêtes pour le service, après leur opération de recharge électrique, comme suit :

$$Emptyl_{Station(i)}\% = 100 * \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \frac{1}{T_{Sim}} \left(\sum_{s|M_s(PSR_i)=0} \tau_s \right) \qquad \text{Eq.(3.3)}$$

$$Full_{Station(i)}\% = 100 * \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \frac{1}{T_{Sim}} \left(\sum_{s|M_s(PSR_i)=Ci} \tau_s \right) \qquad \text{Eq.(3.4)}$$

A noter que les termes « s|Ms(PSRi) = 0 » et « $s|M_s(PSR_i) = C_i$ » signifient que l'on somme toutes les durées « τ_s » où le marquage de la place PSR_i représentant la station est égal à 0 (Station S_i vide dans l'équation 3.3) ou C_i (Station S_i pleine dans l'équation 3.4). En sommant (Eq.(3.3)) et (Eq.(3.4)), il est également intéressant d'estimer le pourcentage d'avoir une des deux situations indésirables (station vide ou pleine).

2. Indicateurs de performances relatifs aux transitions :

- **Fréquence moyenne de franchissement d'une transition T_j**

L'indicateur de performance (Eq.(3.5)) permet le calcul du taux d'occurrence des événements y compris les opérations ; incidents ; et différentes autres activités modélisées par des transitions. A titre d'exemples, les taux d'incident et de maintenance, la satisfaction ou le rejet de la demande correspondent

respectivement aux taux de franchissement des transitions stochastiques correspondantes TMP_R et TCM.

$$\overline{\mathbf{F(t_j)}} = \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \left(\frac{NF(t_j)_k}{T_{Sim}} \right) \qquad \textbf{Eq.(3.5)}$$

Où $NF(t_j)_k$ représente le nombre de franchissement de la transition t_j (occurrence de l'événement/opération correspondant(e)) lors de la $k^{ième}$ simulation du système.

- **Pourcentage du niveau de satisfaction des utilisateurs**

A partir du modèle développé, il est possible d'estimer le niveau de satisfaction des usagers (%), pour chaque station S_i par l'indicateur (Eq.(3.6)), où le nombre de franchissements des transitions TUS_i et TUN_i correspondent respectivement au nombre de demandes satisfaites et demandes perdues pendant le service.

$$\mathbf{USL\%} = 100 * \frac{\sum_{k=1}^{N_{Rep}} (NF(TUS_i)_k)}{\sum_{k=1}^{N_{Rep}} (NF(TUS_i)_k + NF(TUN_i)_k)} \qquad \textbf{Eq.(3.6)}$$

- **Pourcentage du niveau de rejet de la demande**

Le pourcentage de demandes rejetées peut être déduit de :

$$\mathbf{URL\%} = 100 - USL\% \qquad \textbf{Eq.(3.7)}$$

3.1.4. Exploitation du modèle développé

Le modèle développé dans le chapitre précédent est à la fois modulaire et configurable. Grâce à sa modularité, il est facile de reproduire ses différents modules pour un réseau d'autopartage de grande taille avec « NS » stations. Comme représenté sur la Fig. 3.2, outre son pouvoir de modélisation explicite de tels systèmes de mobilité urbaine, en considérant leurs différentes caractéristiques et contraintes, le modèle développé peut être utilisé pour différents types d'études pouvant s'orienter vers la conception et le dimensionnement ou l'analyse et l'optimisation en considérant différents paramètres ou scénarios d'un système réel à considérer. En effet, la configuration de ses transitions (délais de franchissement) et de ses places (marquages initiaux) doit se faire en tenant compte des paramètres du système à considérer notamment son nombre de stations ; nombre de voitures ; capacités des stations, demandes des usagers, taux d'incidents ; etc.

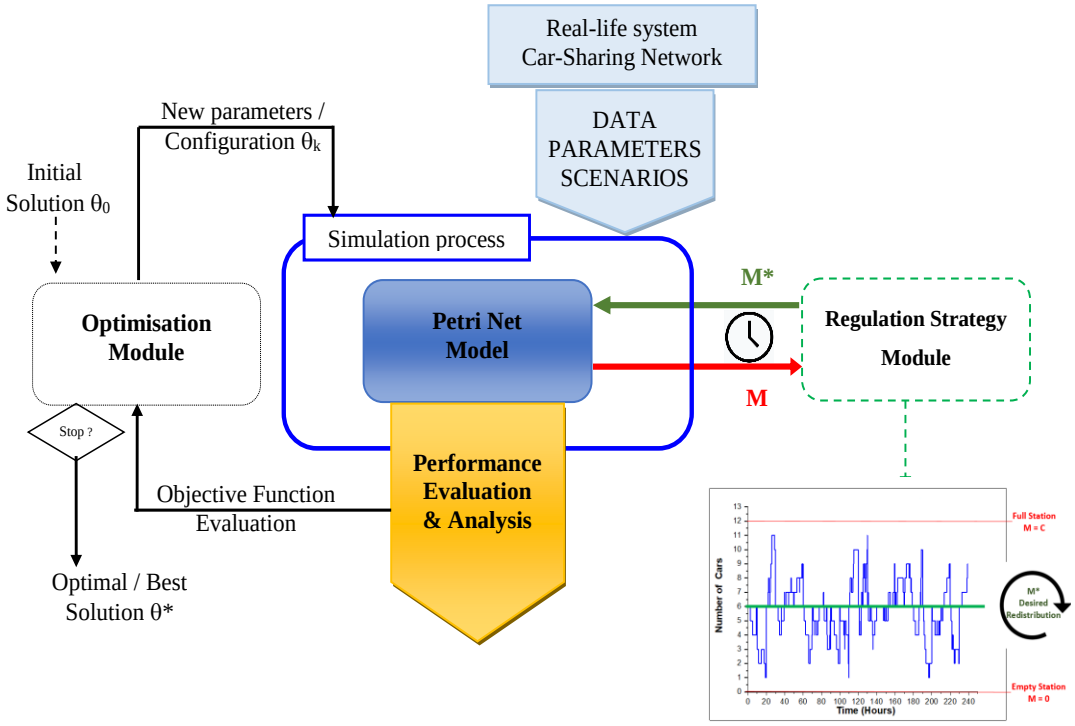


Fig. 3.2. Exploitation générale du modèle développé.

Sur la base des différents indices de performance définis dans la section précédente, l'approche proposée peut contribuer à la conception de tels systèmes en réalisant des analyses paramétriques et éventuellement des études d'optimisation, en couplant le modèle avec une technique d'optimisation avec la simulation, pouvant être des algorithmes génétiques utilisés pour le cas des réseaux de vélos en libre-service [6].

Par ailleurs, contrairement aux travaux dirigés par Labadi sur le cas des systèmes de vélos en libre-service [35] où les opérations de rééquilibrage (régulation) des stations sont explicitement intégrées aux modèles de réseaux de Petri développés, il est possible de les intégrer implicitement – comme un algorithme de relocalisation – directement dans le processus de simulation.

Fondamentalement, comme illustré dans la Fig. 3.2, les opérations de rééquilibrage consistent à modifier la redistribution des voitures électriques entre les différentes stations (marquage actuel M des stations modélisées par places) par la redistribution souhaitée des voitures M* en fin de service durant la nuit (mode statique) ou périodiquement au cours du service durant la journée (mode dynamique).

3.2. Présentation de l'outil de simulation utilisé

3.2.1. Architecture générale de la simulation d'un RdP

Comme indiqué dans la première partie de ce chapitre, dans le cas de systèmes dynamiques de grande taille et/ou complexes dont les processus stochastiques ne sont pas caractérisables ou non solvables, des techniques de simulation deviennent incontournables. Ainsi, notre approche d'évaluation et d'analyse de performances sera associée à la simulation. Ci-dessous, une architecture générale permettant la compréhension d'un processus de simulation d'un modèle RdP.

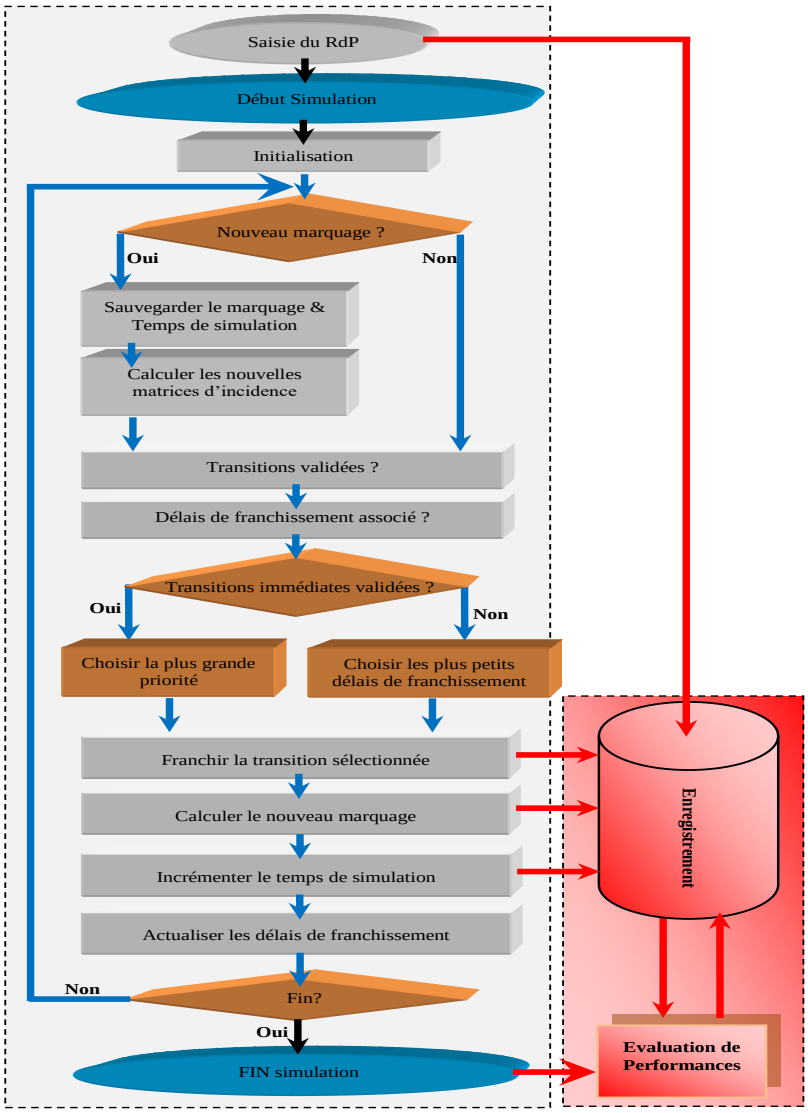


Fig. 3.3. Architecture générale de la simulation d'un Réseau de Petri

3.2.2. Choix d'un outil de simulation

Notre choix porte sur un outil logiciel existant nommé "GRIF" comportant le module "MOCA-RP" spécialement dédié pour la simulation de réseaux de Petri stochastiques. Les lecteurs intéressés par cet outil peuvent consulter :

http://grif-workshop.fr/modules/package-simulation/module-petri/

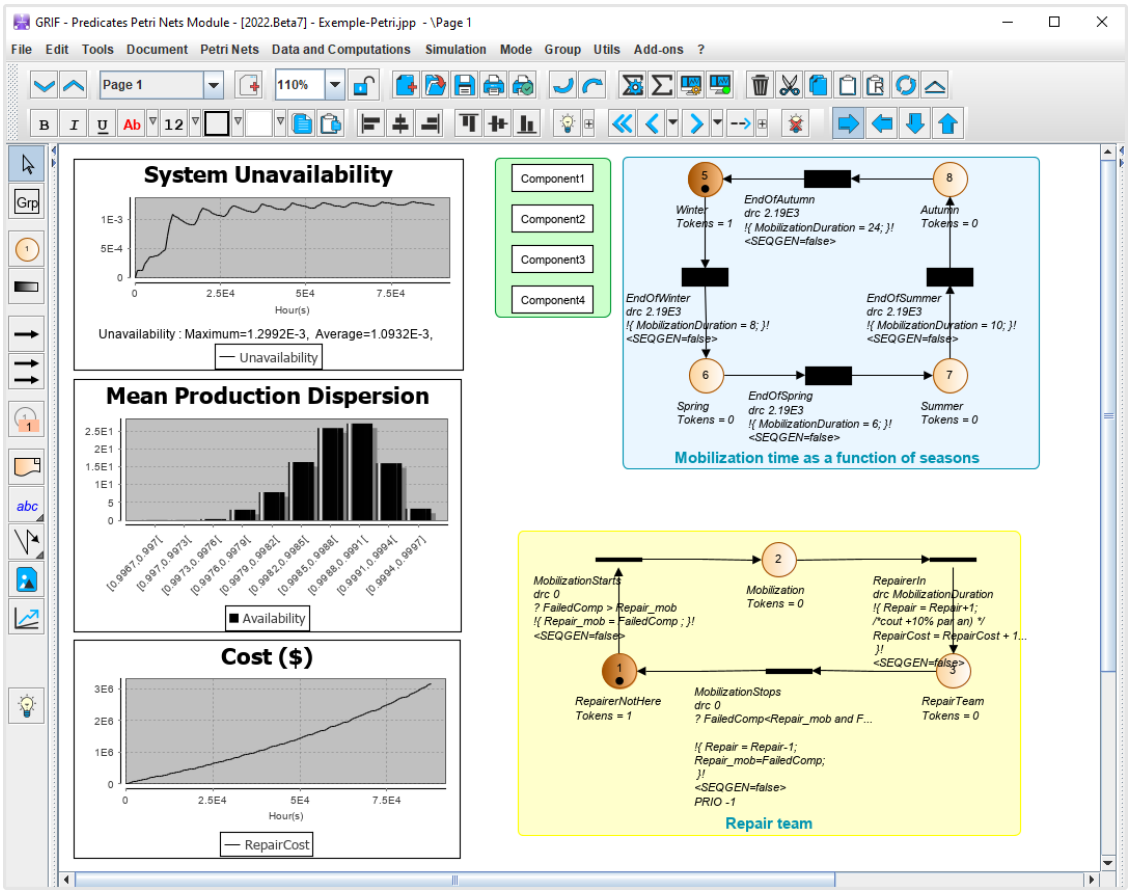


Fig. 3.4. Illustration du logiciel GRIF Petri.
http://grif-workshop.fr/modules/package-simulation/module-petri/

- Utilisé depuis 1984 par le service sûreté de fonctionnement de TOTAL Energies (France), le MOCA-RP du progiciel de simulation GRIF pour la simulation et l'analyse avec des réseaux de Petri stochastiques. L'outil de simulation est principalement utilisé pour traiter des modèles dynamiques complexes et stochastiques et présente l'avantage de fournir des résultats fiables [47].

- Le MOCA-RP présente plusieurs fonctions utiles telles que « Copier/Coller/Renuméroter » pour aider à la saisie des parties répétées des réseaux de Petri. Ainsi, du fait de la modularité du modèle développé, il est aisé de reproduire les différents sous-réseaux du modèle pour les grands réseaux, en fonction de son nombre de stations.

Cet outil permet de supporter facilement notre approche de modélisation et présentent de nombreux avantages par rapport à la complexité des systèmes considérés :

- La saisie des réseaux de Petri (RdP) est très simple et s'appuie sur une interface graphique intuitive. Elle permet la création de places, transitions, arcs, jetons… et de tous types de variables mathématiques et operateurs logiques permettant d'agir sur la validation des transitions.

- Il est possible de créer des composants (modules) qui seront stockés dans une bibliothèque. Ils sont réutilisables soit directement en tant que RdP pour faciliter la création de RdP plus important. Une fonction copier-coller améliore la capacité de modélisation en connectant aux données existantes celles utilisées par la partie sélectionnée (ou en les dupliquant selon le choix de l'utilisateur).

- L'outil est particulièrement adapté pour les systèmes complexes stochastiques et permet l'utilisation d'une variété de lois stochastiques pouvant être associées aux transitions.

- Une fois le système modélisé, le moteur « Moca-RP » permet de calculer un grand nombre d'indicateurs de performances basés sur les marquages moyens, le temps de séjour et les fréquences moyennes de franchissement des transitions. L'interprétation pratique des principaux indicateurs à calculer dépend du système modélisé notamment de ce que représentent les transitions, les places et les jetons par rapport au système réel.

- La possibilité de « Simulation interactive » étape par étape permet la vérification/validation du modèle. Il permet de s'assurer de la précision de la modélisation avant d'effectuer les calculs.

Conclusion

En complément au chapitre précédent portant sur le développement de notre approche de modélisation des réseaux d'autopartage utilisant les voitures électriques en libre-service, ce chapitre a permis d'exposer notre méthodologie pour l'analyse et l'évaluation de performances de ces systèmes.

Basée sur la simulation, nous avons formalisé un ensemble d'indicateurs de performances estimables sur la base du modèle développé. Notre support de simulation qui supporte parfaitement notre approche à différents points de vue a été également exposé.

Après une discussion portant sur l'exploitation plus générale du modèle développé pour des études pouvant porter sur la conception/dimensionnement ou analyse / optimisation de performances, notre choix d'un outil de simulation à associer à notre approche a été présenté et argumenté.

Enfin, le chapitre qui suit portera sur le développement d'une application concrète afin de montrer l'applicabilité et le potentiel de notre approche.

Chapitre 4

Application à un cas réel

Dans ce dernier chapitre, une démonstration de l'applicabilité et du pénitentiel de notre approche de modélisation et d'analyse de performances est conduite en s'appuyant sur une étude de cas. Cette étude s'appuie sur la structure et les données du réseau Yélomobile, un service de voitures électriques en libre-service lancé depuis 1999 par la Rochelle (France). Dans un premier temps, nous présentons ce système de mobilité disposant une flotte de voitures électriques en libre-service. Plusieurs expérimentations ont été conduites en exploitant différents scénarios et données.

4.1. Présentation du Cas d'Etude

Dans le cadre de cette application conduite à titre démonstratif, nous nous appuyons sur le réseau « Yélomobile » mis en place à la Rochelle (France) depuis 1999. Notre application repose sur les données du réseau à l'époque où le service comptait 13 stations équipées de bornes de recharge électrique en exploitant 28 véhicules électriques en libre-service. Le service est accessible aux usagers 24h sur 24h, et sept jours sur sept.

Pour plus de détails sur le service Yélomobile, le site web suivant https://yelo.agglo-larochelle.fr/services/autopartage-yelomobile/ permet aux usagers d'avoir les informations et les renseignements nécessaires pour une bonne exploitation du service (plan et caractéristiques des stations, tarifs appliqués, utilisation du service, disponibilité des véhicules dans les différentes stations en temps réel, etc.).

Le plan via Google Map du réseau considéré est représenté par la Fig. 4.1 qui montre la localisation des différentes stations.

Fig. 4.1. Plan Google Map – du réseau Yelomobile (https://www.google.fr/maps/place/La+Rochelle/)

La Fig. 4.2 illustre une des stations du réseau et de son suivi en temps réel par rapport à la disponibilité des voitures via l'application web.

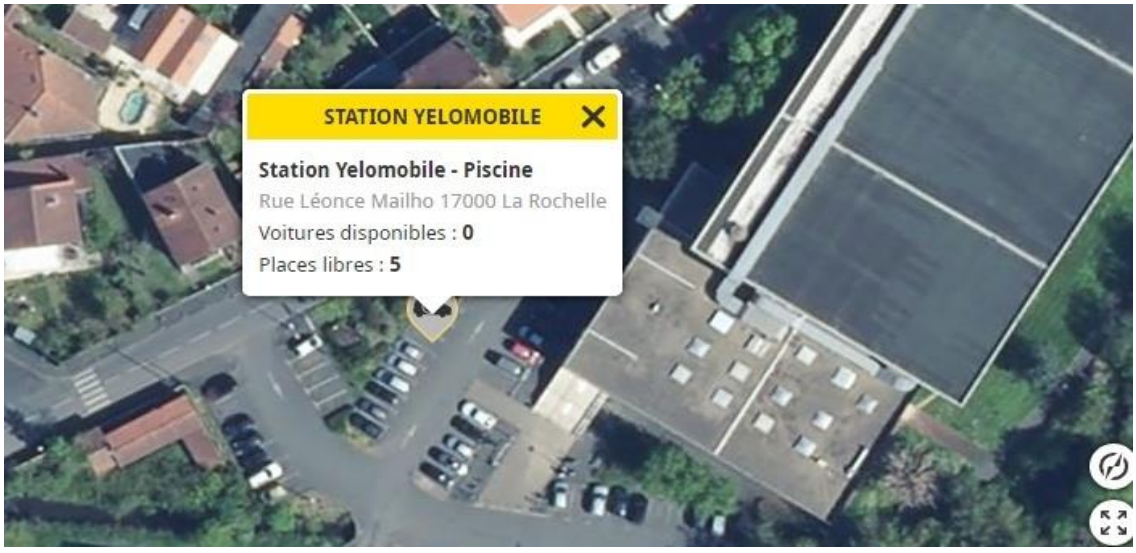


Fig. 4.2. Exemple de station et du Suivi en temps réel de la disponibilité des voitures (https://yelo.agglo-larochelle.fr/services/autopartage-yelomobile/)

4.1.1. Données, paramètres et hypothèses

Pour configurer le modèle RdP développé au Chapitre 2, différentes données (par exemple, capacités des stations, nombre de voitures, …) ont été collectées et/ou observées à partir de :

https://yelo.agglo-larochelle.fr/services/autopartage-yelomobile/.

De plus, nous avons conduit une série d'échanges et de discussions avec des opérateurs et étudiants stagiaires travaillant au sein de l'opérateur exploitant le réseau considéré. L'objectif a été de collecter les informations et données nécessaires pour développer une démonstration réaliste de la pertinence et du potentiel de notre approche méthodologique. Le Tableau 4.I spécifie l'ensemble des stations et leurs capacités.

TABLE 4.I
DESIGNATION ET CAPACITES DES STATIONS

Stations (Places PS_i)	**Désignation**	**Capacité**
S1	Médiathèque	6
S2	Minimes	6
S3	Piscine	5
S4	Préfecture	6
S5	gare	9
S6	Forum Pôle Techno	6
S7	Place Saint-Maurice	6
S8	Marché de Portneuf	6
S9	Arsenal	12
S10	Verdun	9
S11	Aytré	6
S12	Villeneuve-les-Salines	6
S13	EIGSI	6

Source : https://yelo.agglo-larochelle.fr/services/autopartage-yelomobile/

En se référant au Chapitre 2, nous rappelons que :

- Le modèle RdP développé est configurable et permet l'étude du système considéré sous différents scénarios et paramètres pouvant être en fonction de la variabilité des données selon des périodes spécifiques et des jours typiques de service (saisons, vacances, week-ends, etc.) et – éventuellement – selon différentes structures et paramètres du réseau (nombre de stations ; capacités ; nombre de voitures ; …) pour des fin d'analyse et/ou de conception d'un réseau.

- Plus généralement, les données issues des exploitants (dans notre cas des opérateurs ou du site web) sont souvent « brutes ». Elles nécessitent une analyse pour extraire et/ou adapter des paramètres explicites et nécessaires pour le paramétrage et/ou la configuration du modèle développé. Il s'agit notamment de l'estimation des différentes fréquentations des stations ; les temps moyens associés aux départs et arrivées des voitures ; les durées de recharge électrique et les taux d'incidents des voitures électriques ; etc. Ainsi, des analyses statistiques et d'estimation doivent être conduites sur un historique de données disponibles.

4.1.2. Configuration du modèle RdP stochastique

Plusieurs expérimentations ont été conduites en exploitant différents scénarios et données. Notre démonstration synthétisée dans ce chapitre fait partie de ces différentes configurations étudiées. Elle a été effectuée en utilisant les spécifications et les paramètres donnés dans la suite de cette section. Ils sont utilisés pour configurer les transitions et les places du modèle développé au Chapitre 2.

Premièrement, considérons l'ensemble des éléments suivants comme un ensemble d'hypothèses pour la configuration et le paramétrage du modèle :

- Le système d'autopartage considéré utilise 28 voitures électriques de type Smart avec une autonomie allant de 100 à 120 km. Ces 28 voitures, entièrement chargées pendant la nuit, sont initialement réparties dans les différentes stations, en mettant "$C_i/2$" voitures dans chaque station S_i permettant d'équilibrer la station à 50% de places de parking occupés et 50% de place vides. Ce marquage initial correspond à l'état issue de la régulation de « fin de journée » appliquée durant la nuit pour le service du lendemain.

- Une charge complète (0% à 100%) d'une voiture électrique nécessite environ 3 heures selon la puissance et le type des bornes de recharge utilisées dans les stations. La politique de tarification envisagée permet aux usagers de débloquer et d'utiliser les voitures électriques à partir d'un seuil de recharge que nous fixons à 70 % (EL*%). Ce seuil minimal de recharge correspond à des trajets allant de 70 à 80 km, très largement suffisants pour des déplacements urbains délimités par une station de départ et une station de destination selon le « One-Way Electric Car Sharing » mode.

Nous considérons que la vitesse de recharge est constante (indépendante du niveau de la batterie), les durées de recharge estimées à partir de différents niveaux de batterie au début d'un processus de recharge sont illustrées et

indiquées par la représentation de la Fig. 4.3. En se référant au réseau de Petri stochastique développé au Chapitre 2, ces éléments permettent de configurer les transitions TR_{i1}, TR_{i2} et TR_{i3} représentant les durées de recharge des voitures en fonction de leurs niveaux de batterie au moment du retour dans une station.

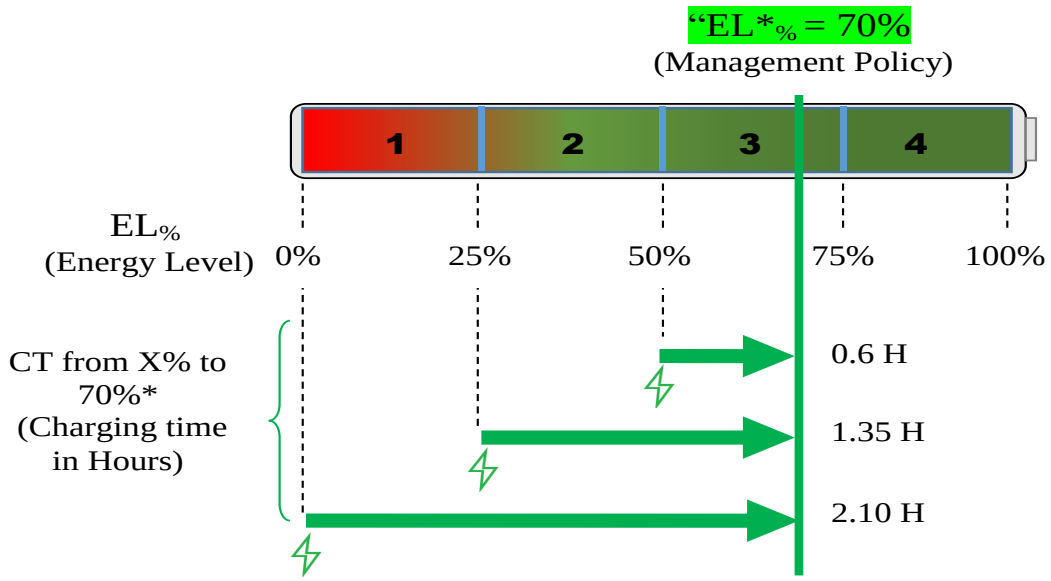


Fig. 4.3. Temps de recharge d'un niveau X% à EL*% = 70% (seuil de disponibilité)

Les paramètres utilisés pour l'ensemble des transitions du modèle sont donnés dans les tableaux suivants : Tableau 4.II (module de la recharge électrique), Tableau 4.III (modules des stations et demandes des usagers) et Tableau 4.IV (module de maintenance). Notons que les paramètres du processus de la recharge électrique (Tableau 4.II) sont considérés identiques pour toutes les stations S_i.

TABLE 4.II
PARAMETRES DU MODULE DE LA RECHARGE ELECTRIQUE

Transitions stochastiques (Uniforme)	$TR_{i,1}$	$TR_{i,2}$	$TR_{i,3}$	-
	[1.35, 2.10] [h]	[0,6, 1,35] [h]	[0, 0,6] [h]	
Transitions immédiates (Avec une gestion probabiliste des priorités)	$TV_{i,1}$	$TV_{i,2}$	$TV_{i,3}$	$TV_{i,4}$
	Prob1 0,05	Prob2 0,35	Prob3 0,55	Prob4 0,05

TABLE 4.III
PARAMETRES DES MODULES « STATIONS » ET « DEMANDES »

STATIONS	Transitions distribuées de manière exponentielle (délai de franchissement moyen 1/λ[h])					
	TCC_i		TUD_i		TUN_i	
	λ_{TCC}	$1/\lambda_{TCC}$	λ_{TUD}	$1/\lambda_{TUD}$	λ_{TUN}	$1/\lambda_{TUN}$
S1	0,4347	2h30	0,5000	2h00	4	0.250 h
S2	0,4651	2h15	0,4761	2h10	4	0.250 h
S3	0,4255	2h35	0,4545	2h20	4	0.250 h
S4	0,4716	2h12	0,4000	2h50	4	0.250 h
S5	0,4545	2h20	0,4347	2h30	4	0.250 h
S6	0,4608	2h17	0,4651	2h15	4	0.250 h
S7	0,4545	2h20	0,4255	2h35	4	0.250 h
S8	0,4629	2h16	0,4166	2h40	4	0.205 h
S9	0,4166	2h40	0,4081	2h45	4	0.250 h
S10	0,4329	2h31	0,4000	2h50	4	0.250 h
S11	0,4444	2h25	0,4132	2h42	4	0.250 h
S12	0,4608	2h17	0,4201	2h38	4	0.250 h
S13	0,4761	2h10	0,4405	2h27	4	0.250 h

TABLE 4.IV
PARAMETRES DU MODULE DE MAINTENANCE

MTC		TMP_R	
λ_{MTC}	$1/\lambda_{MTC}$	λ_{TMPR}	$1/\lambda_{TMPR}$
1/ 168 h	168 h	1/ 24 h	24

4.1.3. Outil et paramètres de simulation

Basé sur le modèle du réseau de Petri stochastique temporisé développé au chapitre 2 et du paramétrage de ses transitions et places selon les éléments et tableaux présentés précédemment, le système étudié est modélisé et simulé en utilisant le "MOCA-RP" de l'outil de simulation "GRIF" (voir Fig. 4.4). Les lecteurs intéressés peuvent consulter :

http://grif-workshop.fr/modules/package-simulation/module-petri/

A titre de rappel, cet outil est utilisé depuis 1984 par le service de sûreté de fonctionnement de TOTAL Energies (France). Ce logiciel dispose d'un module

"MOCA-RP" spécialement dédié pour la simulation et l'analyse de performances de systèmes complexes modélisables par les réseaux de Petri stochastiques. Le « MOCA-RP » présente plusieurs fonctions pratiques telle que « Copier/ Coller/ Renuméroter » utile pour la saisie et la représentation de modèles complexes et modulaires. Ceci est parfaitement en adéquation avec notre modèle développé.

Par ailleurs, à titre informatif, toutes les simulations présentées dans le reste de cette application sont effectuées en utilisant PC personnel Pentium (R) Dual-Core avec un processeur de 3,20 GHz et 4 Go de RAM. Pour cette application, le temps CPU moyen pour une exécuter une de simulation est d'environ 200 secondes. Ceci est relativement rapide en tenant compte de la taille du modèle.

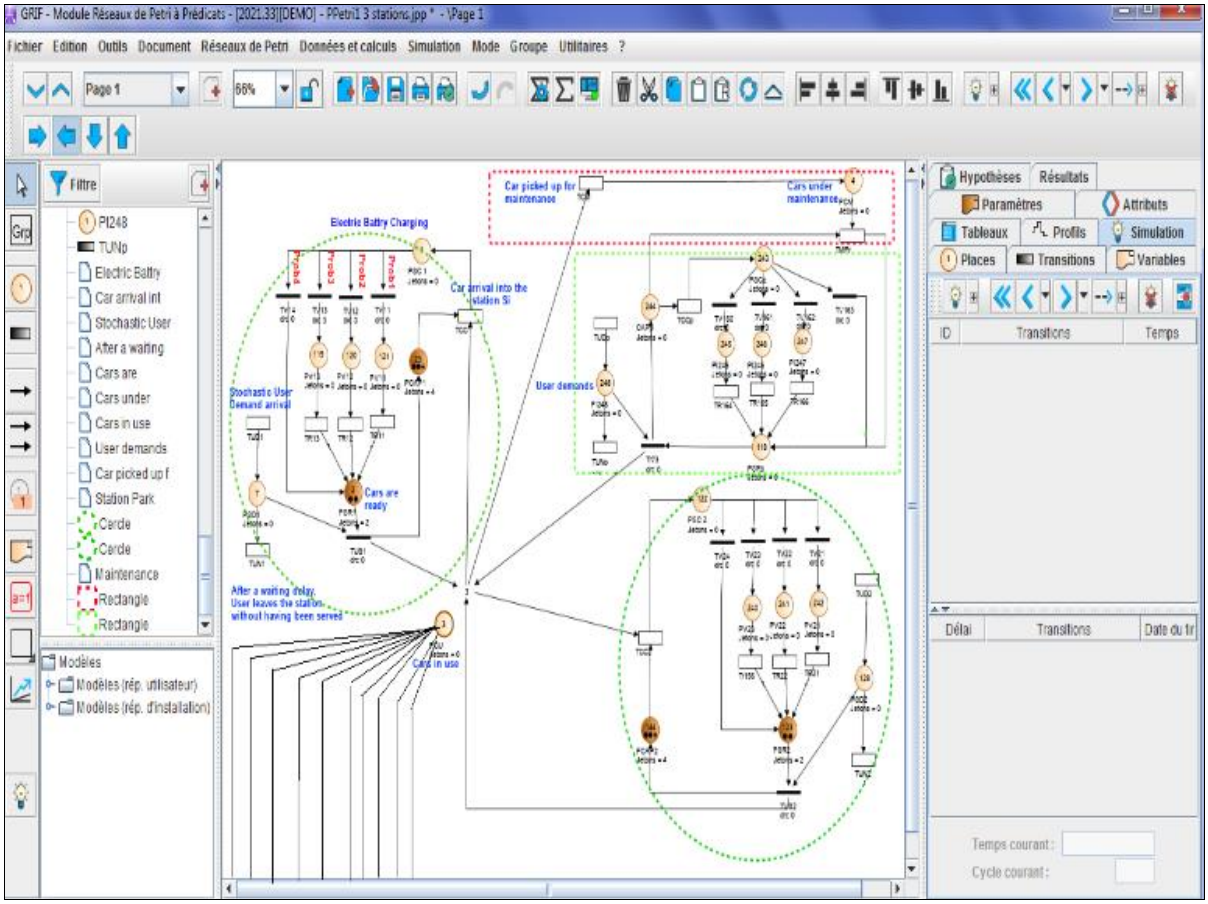


Fig. 4.4. Simulation du modèle RdP du réseau considéré à l'aide du logiciel GRIF.

4.2. Simulation et analyse de performances

Grâce au réseau de Petri et de sa simulation, le comportement dynamique du système considéré peut être observé et analysé graphiquement à différents niveaux notamment concernant l'évolution de l'état des stations en termes du

nombre voitures électriques entrantes ou sortantes durant le service. Comme étudié au chapitre 3, notre méthodologie permet une étude quantitative du système modélisé en calculant un ensemble d'indicateurs de performances formalisés.

4.2.1. Résultats graphiques de la simulation

Les Figures 4.5, 4.6 et 4.7 ci-dessous permettent d'observer graphiquement la dynamique simulée du système au niveau des différentes stations et de l'ensemble des voitures électriques en cours de service en ville (PCU).

Ainsi, sur la base de ces résultats de simulations obtenus pour les paramètres et données considérés ; plusieurs indicateurs de performances seront calculés et analysés dans les sections qui vont suivre.

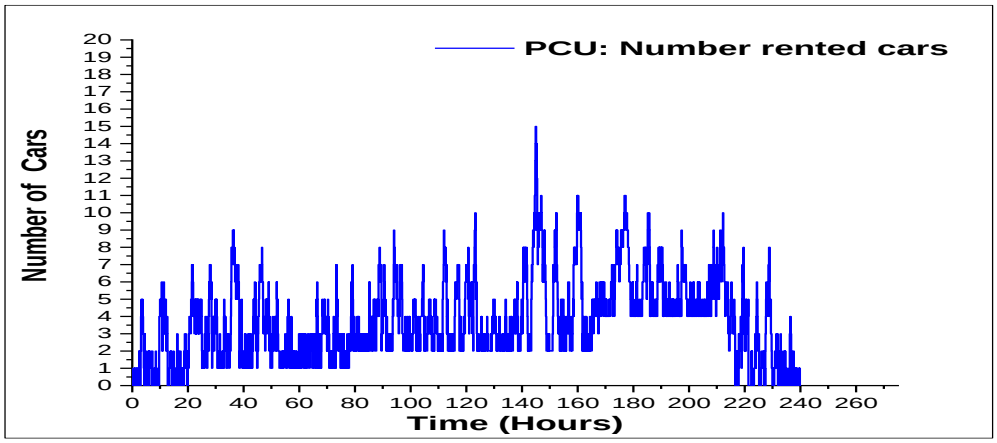


Fig. 4.5. Comportement dynamique stochastique des voitures de location (Évolution du marquage de la place PCU représentant les voitures en cours de service)

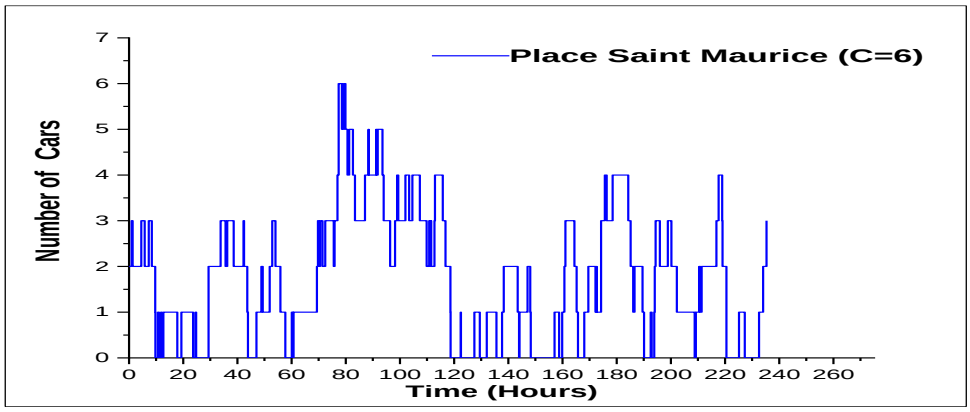


Fig. 4.6. Comportement dynamique stochastique au sein de la Gare St Maurice (Départ et Arrivée des voitures)

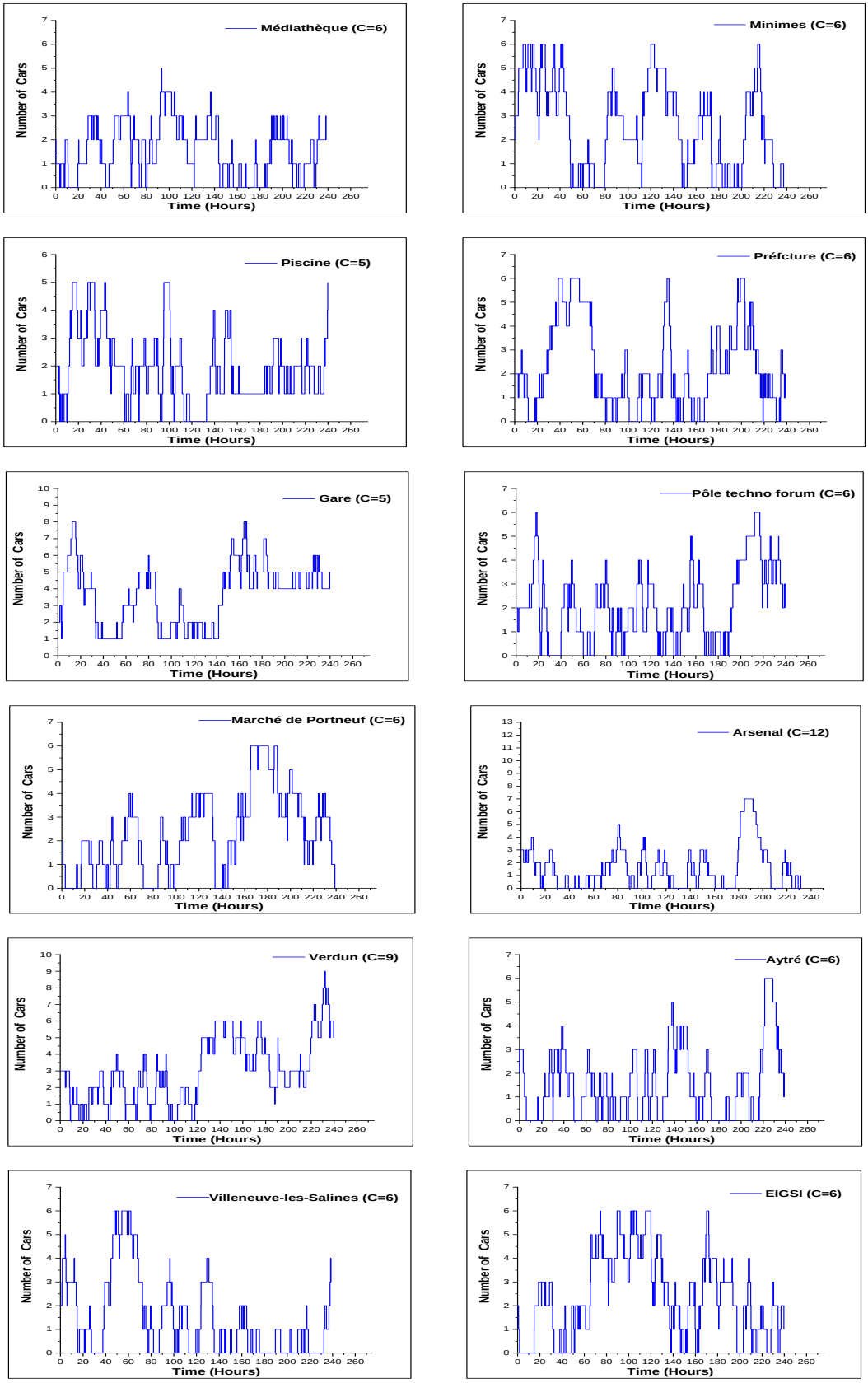


Fig. 4.7 Dynamique des différentes stations S1-S13(départ et arrivée des voitures)

4.2.2. Evaluation analyse de performances

Afin d'assurer une estimation stochastique fiable des résultats de simulation pour une journée de service, tous les indicateurs de performances moyens ont été estimés en utilisant une longue période de simulation (T_{sim} = 1 année) et avec 50 réplications indépendantes. En exploitant les indicateurs de performances formalisés au chapitre 3, les résultats obtenus pour les paramètres et les données choisis dans le cadre de cette application incluent les mesures suivantes :

- Le niveau de satisfaction de la demande des usagers (%) est donné dans le Tableau 4.V ;
- Le nombre moyen de voitures dans les stations et leur temps de séjour moyen (voir le Tableau 4.VI) ;
- Les pourcentages de situations critiques (stations vides ou pleines) sont donnés dans le Tableau 4.VII ;
- Les taux moyens de franchissement des transitions du module représentant les demandes des usagers (voir Tableau 4.VIII).

Ces mesures font partie d'une multitude d'indicateurs pouvant être obtenue pour différents paramètres et/ou configurations. Elles permettent l'évaluation de performances, l'analyse paramétrique et/ou l'optimisation de tels systèmes de mobilité.

TABLE 4.V

% NIVEAU DE SATISFACTION DE LA DEMANDE DES USAGERS

Satisfaction	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Niveau de satisfaction de la demande (%)	70,65%	78,34%	74,16%	87,49%	84,44 %	78,95 %	82,88%	84,88%	83,78%	86,11%	83,40%	84,38%	83,81%
Demande perdue Niveau (%)	29,35 %	21,66%	25,84 %	12,51 %	15,56 %	21,05 %	17,12 %	15,12 %	16,22 %	13,89 %	16,60 %	15,62 %	16,19%

TABLE 4.VI

MARQUAGES MOYENS DES STATIONS ET TEMPS DE SEJOUR MOYENS DES VOITURES

Stations	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	UCP	MCP
Note moyenne (Nombre de voitures)	1.4594	1,7537	1.5003	2.3321	2,2652	1,7876	1.9967	2.1300	2.2047	2.4319	2,0153	2.0851	2,0529	1.8804	0,1064
Temps de séjour moyen (heures)	0,8028	0,8841	0,8231	0,9960	0,9506	0,8909	0,9315	0,9586	0,9195	0,9644	0,9309	0,9497	0,9498	0,6854	0,0978

TABLE 4.VII

% DE TEMPS DE STATIONS VIDES ET PLEINES (SITUATIONS CRITIQUES)

Stations	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Niveau station vide (%)	11,85 %	14,08 %	21,94 %	61,24%	04,89 %	05,38%	70,13%	33,98 %	50,28%	06,19%	37,28%	50,44 %	10,61 %
Niveau station complet (%)	10,88 %	11,03 %	08,12 %	05,12 %	06,72 %	01,95 %	00,54 %	03,16%	00.00%	01,02 %	02,16 %	0,123 %	17,46 %

TABLE 4.VIII

TAUX MOYENS DE FRANCHISSEMENTS DES TRANSITIONS (MODULES USAGERS)

Station S_i	Taux de franchissement moyen des transitions [unités/heure]		
	TCC_i	**TUD_i**	**TUN_i**
S1	0,2932	0,5076	0,2144
S2	0,3094	0,4831	0,1736
S3	0,2796	0,4613	0,1816
S4	0,3034	0,4053	0,1019
S5	0,3093	0,4407	0,1313
S6	0,3064	0,4720	0,1696
S7	0,2984	0,4314	0,1329
S8	0,3018	0,4224	0,1205
S9	0,2809	0,4142	0,1285
S10	0,2940	0,4054	0,1113
S11	0,2922	0,4192	0,1269
S12	0,3012	0,4261	0,1249
S13	0,3126	0,4468	0,1342

A ce stade de cette application démonstrative, l'analyse de performances sur la base des indicateurs estimés, nous retenons les éléments suivants :

Tout d'abord, malgré une flotte ne dépassant pas 28 voitures électriques, le niveau général de satisfaction des usagers varie autour de 70% à 87% (81,79% en moyenne). Ce qui peut être considéré comme un niveau de service acceptable (voir le Tableau 4.V). D'autre part, la perte d'un certain nombre de demandes potentielles des usagers, estimée entre 12% à 29% selon les stations (17,05% en moyenne), est clairement due à la taille de la flotte de voitures électriques

déployées pour ce réseau. Elle est relativement sous-dimensionnée pour satisfaire encore mieux la demande.

D'un autre point de vue, il est également intéressant d'analyser le % d'occurrence de situations indésirables (critiques) pour les usagers à savoir les situations de stations vides et celles de stations pleines. D'une manière générale, une station pleine peut être considérée comme un indicateur de congestion et une station vide peut être considérée comme un indicateur de déficit.

Comme le montre le tableau 4.VII, le % général de stations vides est relativement important (29,09 % en moyenne). Ceci constitue un autre indicateur sur l'origine de la perte d'un certain nombre de demandes potentielles évoquée précédemment. De telles situations critiques sont également observables sur les trajectoires stochastiques montrant l'évolution dynamique du nombre de voitures dans les différentes stations représentées sur la Fig. 4.6 et la Fig. 4.7. Contrairement au cas de stations vides, le niveau de saturation (stations pleines) est relativement faible (5,25 % en moyenne) ; une bonne situation pour les usagers leur facilitant le retour des voitures louées. Par ailleurs, l'observation du nombre moyen de voitures disponibles dans les différentes stations (2,14 voitures en moyenne – Tableau 4.VI), confirme d'une autre manière que le principal levier d'amélioration concerne la taille totale de la flotte de voitures électriques à déployer.

En pratique, la règle de base appliquée par les exploitants est de pouvoir maintenir chaque station à 50% / 50% entre emplacements vides et emplacements occupés pour permettre le retour ou la location de voitures. Mais, scientifiquement parlant, le rééquilibrage et la gestion des stations constituent un problème d'optimisation réel et complexe.

4.2.3. Analyse paramétrique

Après notre première analyse de performances, nous présentons dans cette section une analyse paramétrique du système, permettant l'évaluation des performances et l'analyse du système en fonction du nombre de voitures électriques déployées. Les autres données et paramètres du système et du modèle RdP associé restent inchangés.

Les principaux résultats sont représentés graphiquement par les figures Fig. 4.8, Fig. 4.9 et Fig. 4.10. Premièrement, le graphique de la Fig. 4.8 montre l'amélioration du niveau de satisfaction en augmentant le nombre de voitures déployées dans le réseau. En termes du réseau de Petri, comme le montre la Fig. 4.9, le taux de franchissement des transitions TUS_i qui modélisent la satisfaction des usagers converge vers le taux de franchissement des transitions TUD_i qui modélisent la génération de la demande des usagers. Au même temps, nous

pouvons observer la chute de la cadence de franchissement des transitions TUN_i qui modélisent la perte des demandes des usagers.

Néanmoins, malgré une amélioration de la satisfaction des usagers (demandes de location représentées par les transitions TSU_i), un nombre surdimensionné de voitures déployées dans le réseau, peut nuire au bon fonctionnement du système. En effet, contrairement à l'utilisation d'un nombre de voitures sous-dimensionné, qui peut conduire à des stations vides plus fréquentes ; trop de voitures déployées peuvent provoquer des saturations fréquentes des stations, empêchant les usagers de garer les voitures louées après leurs services. De plus, comme le montre la Fig. 4.10, c'est la raison pour laquelle le temps moyen de location peut être impacté (augmenté), puisque la saturation des stations peut empêcher certains usagers de garer les voitures à leur guise après le service.

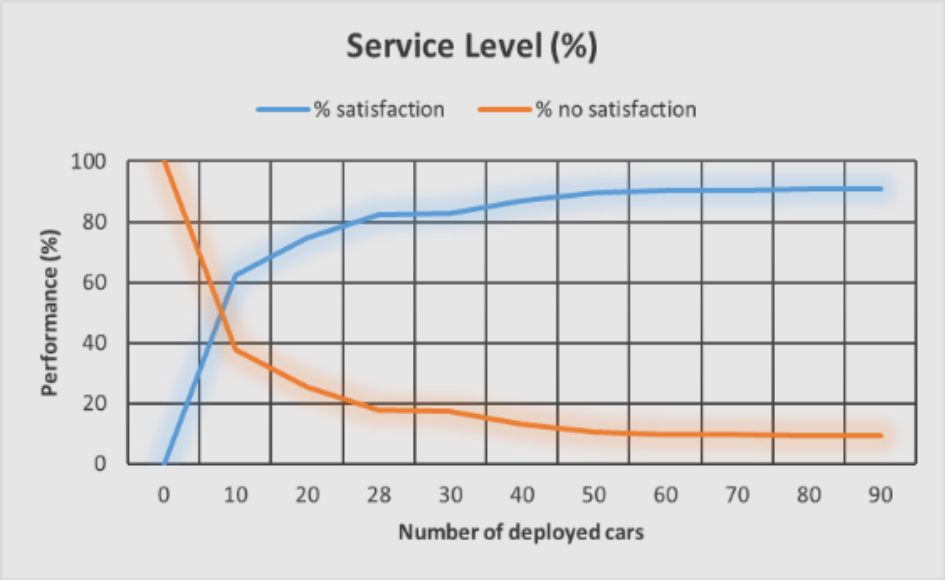


Fig. 4.8. Évolution de la satisfaction des usagers (%) en fonction du nombre de voitures déployées.

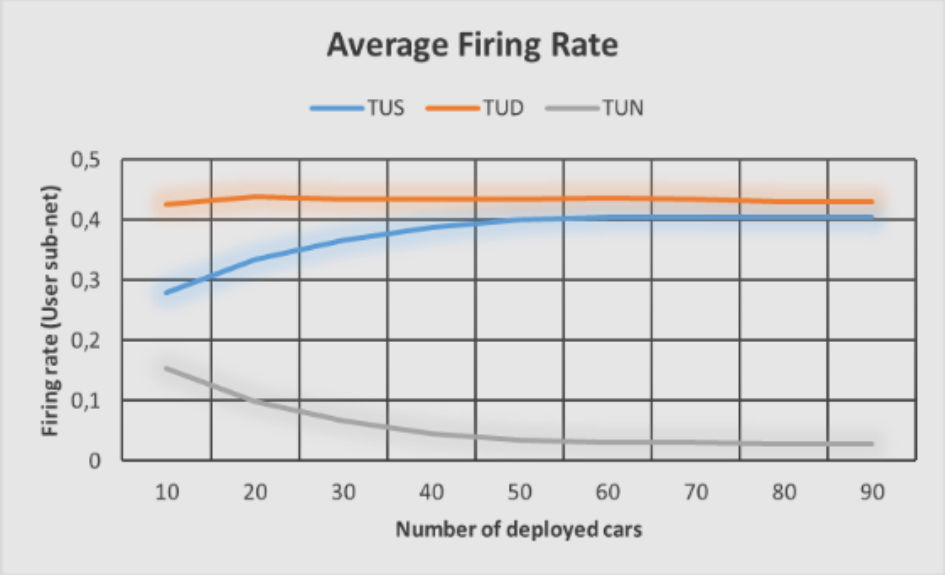


Fig. 4.9. Évolution de la fréquence moyenne de franchissement des transitions (TUS_i, TUD_i, TUD_i) en fonction du nombre de voitures déployées.

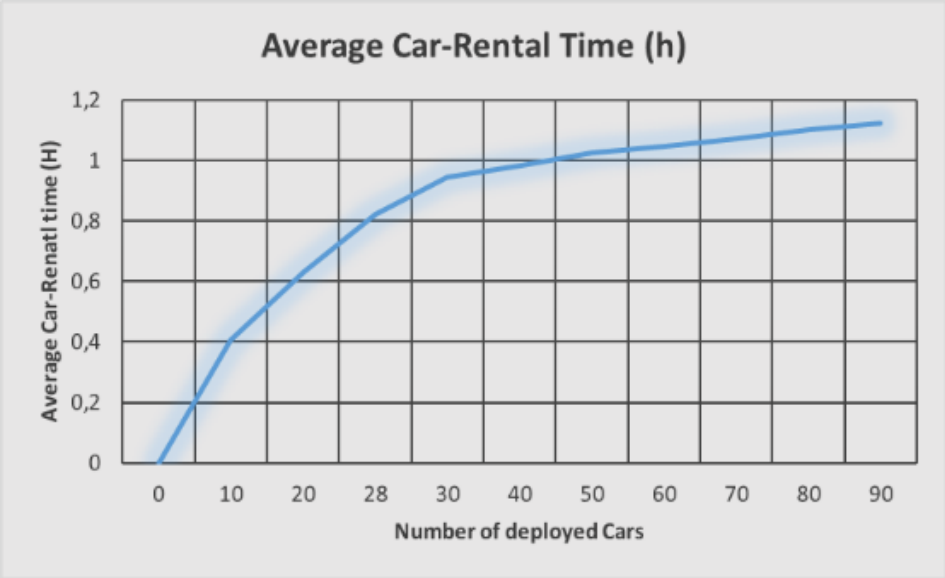


Fig. 4.10. Évolution du temps moyen de location de voiture (temps moyen de séjour de la place PCU) en fonction du nombre de voitures déployées.

4.2.4. Régulation statique (pendant la nuit)

Jusqu'à présent, les simulations et les analyses présentées ont été réalisées sans aucune régulation du système. Autrement dit, sans l'intervention des opérateurs spécialisés pour redistribuer les voitures entre les stations qui se vident et celles qui se remplissent. Maintenant, nous démontrons la possibilité d'étudier le système en intégrant une stratégie de rééquilibrage des voitures permettant la minimisation du temps des situations critiques (stations vides et

pleines) et par conséquent l'amélioration du niveau de satisfaction des usagers. Après plusieurs simulations réalisées avec différents scénarios en termes de nombre de voitures à déployer et de stratégie de redistribution à appliquer, nous présentons une des meilleures configurations améliorant remarquablement les performances globales du système.

La configuration présentée ci-dessous correspond au déploiement de 44 voitures en appliquant un rééquilibrage statique de la répartition des voitures entre les stations. En se référant au Chapitre 3 où la problématique de la régulation des stations a été discutée, en termes du modèle RdP associé au système considéré, le marquage des places représentant les stations, est modifié en « M* » comme une meilleure redistribution des voitures pour démarrer le jour suivant de service. Dans le processus de simulation (voir Fig. 4.11), l'action de rééquilibrage statique s'effectue pendant la nuit, lorsque le service devient pratiquement négligeable dû à une faible demande des usagers.

Dans ce contexte, la Fig. 4.11 et la Fig. 4.12 montrent le comportement dynamique du système où toutes les 10 heures, le marquage actuel « M » du modèle RdP est réinitialisé à « M* » afin de rééquilibrer les stations autour de 50 % entre places de stationnement disponibles et places de stationnement occupées :

$$M(S_i) \rightarrow M^*(S_i) = \left\lfloor \frac{C_i}{2} \right\rfloor.$$

Par rapport au cas sans opérations de rééquilibrage, comme sur la Fig. 4.6 et la Fig. 4.7, les temps de situations critiques (stations vides ou pleines) sont très négligeables comme le montrent la Fig. 4.11 et la Fig. 4.12 représentant la configuration avec un rééquilibrage statique (pendant la nuit) désigné par Static_R(1-50%).

On peut observer que le nombre de voitures dans toutes les stations S_i "oscille" autour de $[C_i / 2]$ (où Ci représente la capacité de chaque station S_i). De toute évidence, le comportement dynamique de cette partie du système est similaire à celui des systèmes de gestion de stocks. Quantitativement parlant, en appliquant la régulation statique, le taux de service moyen est estimé à plus de 98%, avec moins de 1,5% de temps de situations critiques.

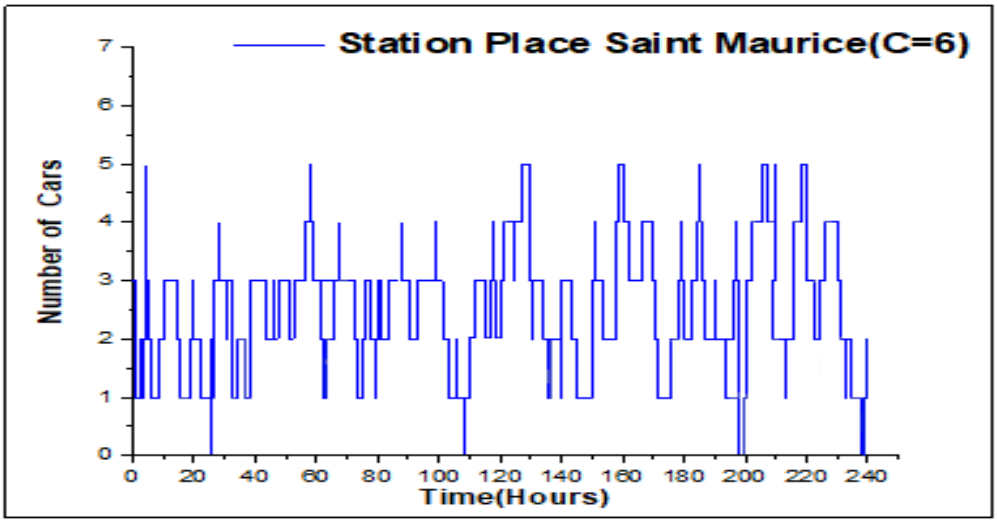
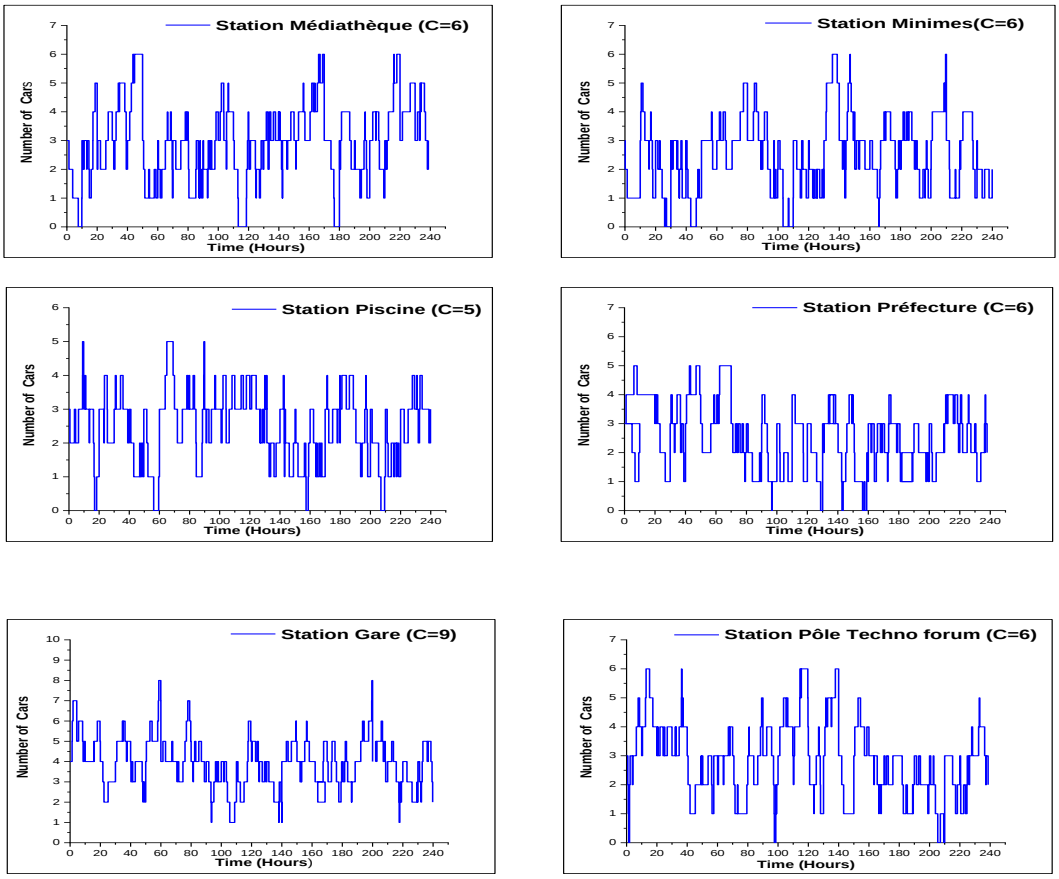


Fig. 4.11. Comportement dynamique stochastique de la Gare St Maurice (Départ et Arrivée des voitures) – Avec Régulation Statique Static_R(1-50%)



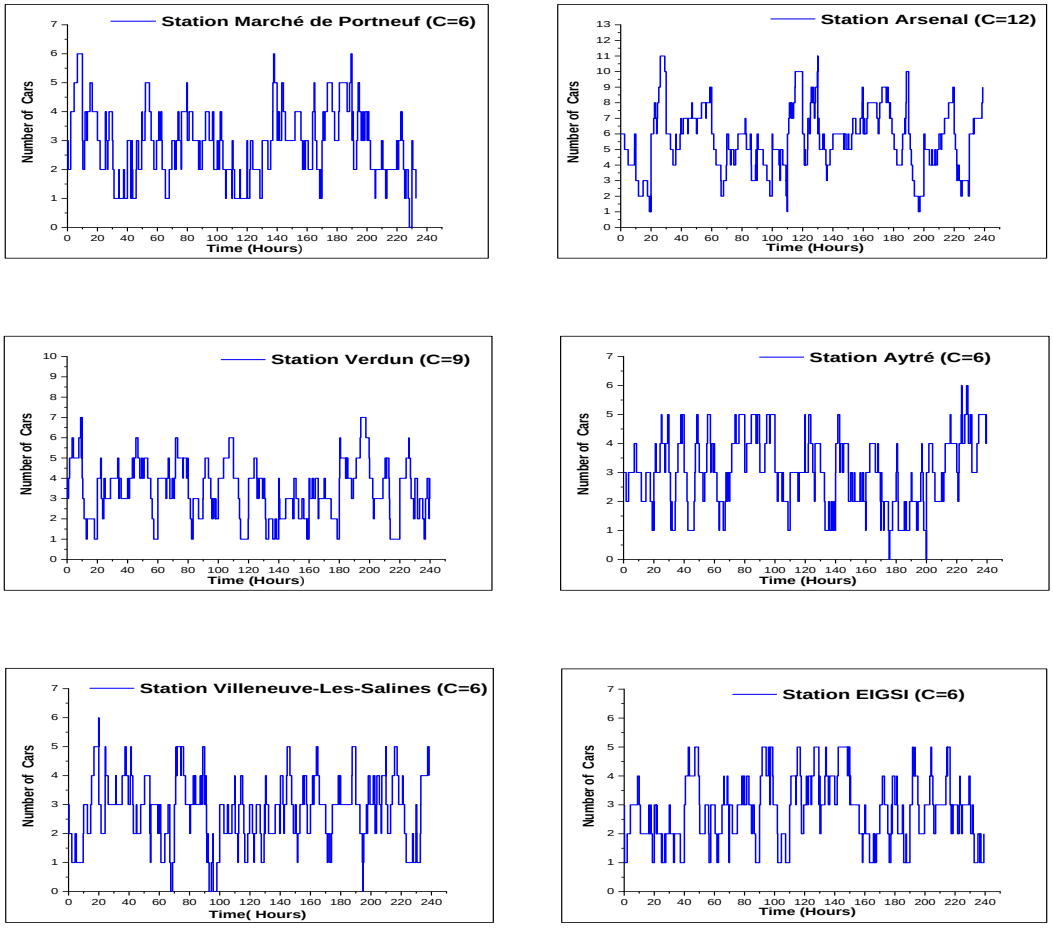


Fig. 4.12. Comportement dynamique stochastique de toutes les stations S1-S13 (départ et arrivée des voitures) – Avec régulation statique Static_R(1-50%).

Conclusion

Malgré toutes les difficultés rencontrées initialement pour se procurer des scénarios de données pour le paramétrage de notre modèle, nous avons absolument tenu à finaliser ce travail par le développement d'une application réelle avec des données et scénarios réalistes. L'objectif a été atteint et a permis de montrer la pertinence et le potentiel de notre approche de modélisation utilisant les réseaux de Petri stochastiques et de notre méthodologie d'évaluation et d'analyse de performances via la simulation.

Cette démonstration montre l'applicabilité et la richesse de notre approche de modélisation et d'analyse de performances d'une classe particulière de systèmes dynamiques complexes que sont les réseaux d'autopartage utilisant les voitures électriques en mode « unidirectionnel ». Appelés « One-Way Electric Car-Sharing Networks », ce mode de mobilité urbaine ne cessent de fleurir dans le monde entier comme une alternative apportant des solutions aux enjeux du développement durable et aux défis de la transition énergétique.

Ce travail est d'une aide précieuse pour accompagner cette mutation dans le paysage du transport urbain. Notre approche peut être exploitée pour des études pouvant porter sur la conception/dimensionnement ou analyse / optimisation de performances de tels systèmes dynamiques.

Conclusions et perspectives générales

Rappel du contexte :

Dans le contexte actuel lié à l'avènement des villes durables, de nombreuses initiatives et alternatives innovantes se multiplient dans de nombreux domaines tels que l'habitat, l'énergie, l'industrie et autres. Plus particulièrement, le transport et la mobilité constituent un enjeu majeur pour les services publics et restent un perpétuel défi pour les ingénieurs et chercheurs. En effet, le développement des villes, les préoccupations environnementales, le réchauffement climatique et la hausse des prix de carburants ont fait du transport et de sa gestion un enjeu crucial pour la ville de demain en incitant les acteurs du transport à l'innovation et au développement du transport intelligent et durable.

Portés conjointement par des révolutions technologiques, environnementales et sociétales, les projets innovants se multiplient et de nouvelles solutions de mobilité émergent dans les quatre coins du monde. Hormis les nombreux projets révolutionnaires, voire futuristes, (Hyperloop, Clip-Air, SkyTran, AeroMobil, Solar Impulse, Immortus, …), la voiture électrique et le transport en libre-service font partie des récentes préoccupations en termes de projets de recherche et de développement de ces nouveaux modes de mobilité. Malgré les grands progrès réalisés dans ces domaines, de nombreux défis restent encore préoccupants à différents niveaux pouvant être technologiques, organisationnels et scientifiques.

Au cours de ces dernières années, le transport en libre-service constitue une nouvelle forme de mobilité urbaine. Efficace, écologique et économique, ce nouveau concept permet de faire des déplacements de proximité en milieu urbain. Ce mode de transport connait une expansion des plus remarquables. Après le succès fulgurant des réseaux de vélos en libre-service, avec notamment leur dernière génération utilisant les vélos à assistance électrique, ce nouveau concept s'étend à l'usage des voitures électriques. Par ailleurs, derrière ce grand phénomène du transport en libre-service se cache une réalité bien compliquée pour les exploitants de tels services. Afin d'assurer un déploiement efficace de ces systèmes et de garantir un service de qualité, de nombreuses questions telles que

la taille des stations (parkings), le dimensionnement de la flotte de vélos (véhicules), l'emplacement des stations (et des bornes de recharge) et plus particulièrement le contrôle et la régulation des réseaux de stations. Elles sont déterminantes pour le succès et la viabilité de ces réseaux de transport en mode libre-service.

Du point de vue scientifique, toutes ces questions soulèvent de nombreuses problématiques complexes dont les verrous vont s'articuler autour de la modélisation, de la simulation et de l'optimisation en vue d'un déploiement, d'un contrôle, d'une régulation et d'un management efficaces d'un tel mode de transport. Il s'agit de systèmes dynamiques, stochastiques et complexes qui nécessite des méthodes de modélisation et d'analyse performantes pouvant prendre en compte toutes leurs caractéristiques à la fois structurelles, organisationnelles et comportementales (réseaux denses, dynamique stochastique, autonomie restreinte, disponibilité de véhicules aléatoire, demandes des usagers non déterministes, …).

Dans cette thèse, nous avons proposé une méthodologie utilisant les réseaux de Petri temporisés stochastiques d'une manière modulaire et paramétrable permettant la modélisation, la simulation et l'analyse de tels systèmes dynamiques complexes tout en prenant en compte l'ensemble de leurs activités et caractéristiques. Nous estimons au travers de nos résultats et publications que cette approche dynamique à événements discrets est d'une aide précieuse pour les acteurs de ces services et qu'elle peut influencer l'économie et l'efficacité opérationnelle de ces systèmes de transport urbain émergents.

Synthèse des contributions :

Nos différentes contributions sont synthétisées ci-dessous et rappellent la structuration de cette thèse :

1. Le premier chapitre constitue une contribution bibliographique consacrée à l'étude des systèmes de voitures électriques en libre-service. Nous espérons que cette synthèse de la littérature sur un tel sujet émergent pourrait servir à stimuler la recherche dans ce domaine pour aider les concepteurs, les exploitants et les gestionnaires à assurer un niveau de service de qualité acceptable et un design de réseaux économiquement viables et opérationnellement efficaces.

2. Notre deuxième contribution a été consacrée au développement de notre méthodologie en vue de la modélisation, simulation et analyse de performances des réseaux de voitures électriques en libre-service. Partant d'une réelle structure d'un réseau de voitures électriques en libre-service et en prenant les multiples caractéristiques de ce type de systèmes, un modèle de type réseau de Petri temporisé stochastique a été développé d'une manière modulaire et paramétrable.

3. Notre troisième contribution a porté sur l'exploitation du modèle développé en développant des une méthodologie d'évaluation et d'analyse de performances via la simulation. Un ensemble d'indicateurs de performances sont formalisés et permettent l'analyse de la performance opérationnelle de ces systèmes notamment en termes de niveau de service ou de la disponibilité des voitures aux usagers en évitant les situations critiques relatives aux stations vides ou pleines.

4. Enfin, notre quatrième contribution a été dédiée à une étude de cas. Il s'agit d'une application conduite afin de montrer l'applicabilité de notre approche de modélisation et notre méthodologie d'évaluation et d'analyse de performance via la simulation. Les résultats obtenus montrent la richesse et le grand potentiel de notre approche pour ce type de systèmes complexes.

En résumé, la principale contribution de ce travail porte sur le développement d'une méthodologie de modélisation basée sur une approche dynamique stochastique à événements discrets permettant l'évaluation et l'analyse de performances via la simulation des systèmes d'autopartage en libre-service. Basé sur la puissance de modélisation et d'analyse des réseaux de Petri temporisés stochastiques, le modèle développé est capable d'imiter par simulation le comportement dynamique de tels systèmes, en tenant compte de leurs paramètres et caractéristiques structurels et opérationnels. Outre son utilité pour l'évaluation et l'analyse de performances au niveau opérationnel, l'approche développée peut être exploitée durant la phase de conception permettant un meilleur design stratégique de ces systèmes. De plus, la nature configurable et paramétrable du modèle développé permet de conduire des études paramétriques ou d'optimisation visant de meilleures configurations, un dimensionnement optimisé, ou des politiques de gestion performantes de ce mode de mobilité.

Synthèse des perspectives :

A court terme, une première perspective porte sur le développement d'une approche d'optimisation via la simulation. Ainsi, en plus de l'évaluation de performances, le couplage du réseau de Petri temporisé stochastique avec une technique d'optimisation va permettre un dimensionnement optimisé de ces systèmes. Les variables de décision pourraient être la taille de la flotte, les capacités des stations ou encore le seuil de la recharge électrique à fixer pour rendre les voitures disponibles aux usagers. En termes de critères d'optimisation, la maximisation du niveau de service ou la minimisation de l'occurrence des situations critiques relatives aux stations vides et/ou pleines font partie des critères pertinents à envisager.

A moyen terme, s'intéresser à l'avènement des voitures autonomes pouvant faire leur apparition dans les réseaux de transport urbain en libre-service est un sujet pertinent à anticiper. Aujourd'hui, la voiture autonome est sur toutes les lèvres du grand public… Dans le cadre de l'auto-partage, UBER a commencé à expérimenter un service de location de voitures autonomes à Pittsburgh, depuis 2016. Dans un avenir proche, les voitures autonomes peuvent être une alternative intéressante dans le paysage de la mobilité urbaine. Dans ce cas, le rééquilibrage des zones de stationnement et la gestion de la recharge des batteries peuvent se faire d'une manière autonome et intelligente. Néanmoins, des algorithmes d'optimisation et des stratégies de contrôle et de management sont à développer afin d'être implémentés dans des calculateurs embarqués dans ce type de voitures pour un usage en libre-service. Ceci peut également s'étendre aux taxi-drones, en termes de perspectives pour l'avenir.

Bibliographie

[1] A. Carlier, A. Munier-Kordon et W. Klaudel "Modèle mathématique pour l'étude des stratégies de relocalisation dans les systèmes d'autopartage à sens unique", Transportation Research Procedia, 10: 374–383, 2015.

[2] A. El Fassi, A. Awasthi, et M., Viviani « Évaluation des stratégies de croissance des réseaux d'autopartage par la simulation d'événements discrets », Systèmes Experts avec Applications, Vol. 39, numéro 8, pages 6692-6705, 2012.

[3] A. Waserhole « Optimisation de la tarification des systèmes de partage de véhicules », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2013.

[4] AA Kadri « Modèles de simulation et d'optimisation pour l'ordonnancement et l'équilibrage des systèmes publics de vélos en libre-service », Thèse de doctorat, dirigée par K. Labadi et I. Kacem, 2015, Université de Lorraine, France.

[5] AA Kadri, I. Kacem et K. Labadi "Un algorithme mémétique pour résoudre le problème d'acheminement de plusieurs véhicules dans les systèmes de partage de vélos", 12e conférence internationale FLINS. 24-26 août 2016, Roubaix (France). ISBN 978-981-3146-96-9. https://doi.org/10.1142/9789813146976_0119.

[6] AA Kadri, K. Labadi et I. Kacem, "Une approche intégrée basée sur un réseau de Petri et un algorithme génétique pour l'optimisation des performances des systèmes de partage de vélos. Journal européen de génie industriel (EJIE), Vol. 9, n° 5, pages 638-663, 2015.

[7] AD Febbraro, N. Sacco et M. Saeednia, « One-Way Carsharing: Solving the Relocation Problem », Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2012.

[8] AA Kadri, I Kacem, K Labadi »Limites inférieure et supérieure pour la planification de plusieurs véhicules d'équilibrage dans les systèmes de partage de vélos», Soft Computing 23 (14), 5945-5966.

[9] AA. Kadri, I Kacem, K Labadi »Un algorithme branch-and-bound pour résoudre le problème de rééquilibrage statique dans les systèmes de partage de vélos", Informatique & Génie industriel 95, 41-52

[10] B. Boyacı, KG Zografos, N. Geroliminis, "Un cadre d'optimisation pour le développement de systèmes d'autopartage à sens unique efficaces", European Journal of Operational Research, Volume 240, Numéro 3, pp. 718-733, 2015.

[11] CAS Machado, NPM de Salles Hue, FT Berssaneti et JA Quintanilha, « Un aperçu de la mobilité partagée », Durabilité, 10(12), 4342, 2018.

Bibliographie

[12] D. Jorge et GH Correia, « Estimation de la demande des systèmes d'autopartage et opérations définies : une revue de la littérature », Eur. J. Transp. Infrastructure Rés. 13 (3), 201–220, 2013.

[13] D. Zhao, X. Li et J. Cui. "Un modèle d'optimisation basé sur la simulation pour la planification des infrastructures pour le partage de véhicules électriques autonomes." Génie civil et infrastructure assisté par ordinateur 36.7 (2021): 858-876.

[14] DK George et CH Xia "Dimensionnement de la flotte et disponibilité des services pour un système de location de véhicules via des réseaux de files d'attente fermées". Revue européenne de recherche opérationnelle, 211(1):198 – 207, 2011.

[15] Di Febbraro, A., Giglio, D., Sacco, N. "Structure de contrôle du trafic urbain basée sur des réseaux de Petri hybrides" (2004) IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 5 (4), pp. 224-237.

[16] EM Cepolina et A. Farina, « Urban car sharing : an overview of relocation strategies », WIT Transactions on The Built Environment, Vol 128, 2012 WIT Press.

[17] F. Basile, P. Chiacchio, D. Teta "Un modèle hybride pour la simulation en temps réel du trafic urbain" Control Engineering Practice, 20 (2), pp. 123-137, 2012.

[18] F. Basile, P. Chiacchio, E. Di Marino "Une approche basée sur les enchères pour contrôler les entrepôts automatisés à l'aide de véhicules intelligents" Control Engineering Practice, 90, pp. 285-300, 2019.

[19] F. Basile, P. Chiacchio, J. Coppola, "Un modèle hybride de systèmes d'entrepôt automatisés complexes - Partie I : Modélisation et simulation", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 9 (4), pp. 640-653, 2012 .

[20] F. Ferrero, G. Perboli, M. Rosano et A. Vesco, "Services d'autopartage : une revue annotée", Villes et société durables, vol. 37, 2018, p. 501-518, 2018.

[21] F. Ferrero, G., Perboli, A. Vesco, S. Musso et A. Pacifici, « Services d'autopartage » – Partie B Modèles commerciaux et de services.https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2015-48.pdf, 2015.

[22] G. Ciardo, R. German et C. Lindemann, "Une caractérisation du processus stochastique sous-jacent à un réseau de Petri stochastique", IEEE Trans. Logiciel Eng., vol. 20, non. 7, pages 506 à 515, juillet 1994.

[23] G. Laporte, F. Meunier et R. Wolfler Calvo « Shared Mobility Systems » 4OR-QJ Oper Res (2015) 13 : 341.https://doi.org/10.1007/s10288-015-0301-z

[24] G. Laporte, F. Meunier, R. Calvo, « Les systèmes de mobilité partagée : une enquête actualisée », Ann. Oper. Rés., 271 (2018),10.1007/s10479-018-3076-8.

[25] GHA Correia et AP Antunes, "Approche d'optimisation de l'emplacement des dépôts et de la sélection des trajets dans les systèmes d'autopartage à sens unique", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 48, Issue 1, pp. 233-247, 2012.

[26] H. Chen, L. Amodeo, F. Chu et K. Labadi "Modélisation et évaluation des performances des chaînes d'approvisionnement à l'aide de réseaux de Petri déterministes et stochastiques par lots", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2(2), 132-144, 2005.

[27] H. Ohta, S. Fujii, Y. Nishimura et M. abdKozuka "Analysis of the Acceptance of Carsharing and Eco-Cars in Japan", International Journal of Sustainable Transportation Volume 7, 2013 -Numéro 6.

[28] H. Si, JG Shi, G. Wu, J. Chen et X. Zhao, « Cartographie de la recherche sur le partage de vélos publiée de 2010 à 2018 : une revue scientométrique », Journal of cleaner production, 213, 415-427, 2019.

[29] http://innovativemobility.org/?project=innovative-mobility-carsharing-outlook-spring-2018

[30] I. Antunes, LK Carvalho et JC Basilio, "A stochastic Petri net model for simulation-based performance analysis of public bicycle sharing systems", IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE, pp. 433-439, 2016.

[31] J. Lee et GL. Prévision de la demande du parc pour les systèmes de partage de véhicules électriques à l'aide des archives de l'historique des mouvements. Dans : Kim T., Ramos C., Abawajy J., Kang BH., Ślęzak D., Adeli H. (eds) Applications informatiques pour la modélisation, la simulation et l'automobile. Communications en informatique et sciences de l'information, Vol 341. 2012, Springer, Berlin, Heidelberg.

[32] J. Lee et GL. Park "Conception d'un programme de relocalisation en équipe dans les systèmes de partage de véhicules électriques". Dans : Murgante B. et al. (eds) Computational Science and Its Applications – ICCSA 2013. ICCSA 2013. Lecture Notes in Computer Science, Vol 7973, 2013 Springer, Berlin, Heidelberg.

[33] J. Lee, H. Kim, G. Park "Relocation Action Planning in Electric Vehicle Sharing Systems", In: Sombattheera, C., Loi, NK, Wankar, R., Quan, T. (eds.) MIWAI 2012. LNCS , vol. 7694, p. 47–56. Springer, Heidelberg 2012.

[34] K. Labadi, H. Chen et L. Amodeo "Modélisation et évaluation des performances des systèmes d'inventaire utilisant des réseaux de Petri

déterministes et stochastiques par lots", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 37(6), 1287-1302, 2007.

[35] K. Labadi, T. Benarbia, JP Barbot, S. Hamaci et A. Omari, « Stochastic Petri Net Modeling, Simulation and Analysis of Public Bicycle Sharing Systems », IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Volume : 12, Numéro : 4 , p. 1380 – 1395, 2015

[36] KM NG, REAZ, MBI et MAM Ali « Un examen des applications des réseaux de Petri dans la modélisation, l'analyse et le contrôle du trafic urbain », IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, vol. 14, n° 2, p. 858-870, 2013.

[37] L. Li et MEH Petering. "Analyse de simulation d'événements discrets d'un système d'autopartage unidirectionnel basé sur la réservation." Journal de simulation 12.1 (2018) : 1-22.

[38] M. Barth et M. Todd "Analyse des performances du modèle de simulation d'un système de véhicules partagés multiples", Transportation Research Part C, 7(4), 237-259, 1999.

[39] M. Clemente, MP Fanti, AM et W. Mangini Ukovich "Le problème de la relocalisation des véhicules dans les systèmes d'autopartage : modélisation et simulation dans un cadre de réseau de Petri". Dans : Colom JM., Desel J. (eds) Application et théorie des réseaux de Petri et concurrence. PETRI NETS 2013. Lecture Notes in Computer Science, Vol 7927. Springer, Berlin, Heidelberg.

[40] M. Dotoli et MP Fanti, "An urban traffic network model via coloured timed Petri nets" Control Engineering Practice, 14 (10), pp. 1213-1229, 2006.

[41] M. Nourinejad et M. Roorda « Un système dynamique d'aide à la décision pour le partage de voitures », Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 66. 36–50. 10.1016/j.tre.2014.03.003, 2014.

[42] M. Nourinejad, S. Zhu, S. Bahrami et MJ Roorda « Déplacement de véhicules et rééquilibrage du personnel dans les systèmes d'autopartage à sens unique », Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 81:98–113, 2015.

[43] MA Marsan et G. Chiola, "Sur les réseaux de Petri avec des temps de tir déterministes et exponentiellement distribués", dans Lecture Notes in Computer Science. vol. 266, New York : Springer-Verlag, 1987, p. 132-145.

[44] MA Marsan, G. Balbo, A. Bobbio, G. Chiola, G. Conte et A. Cumani, "L'effet des politiques d'exécution sur la sémantique et l'analyse des

réseaux de Petri stochastiques", IEEE Transactions on Software Engineering, 15(7), 832-846, 1989.

[45] MA Marsan, G. Balbo et G. Conte, "Une classe de réseaux de Petri stochastiques généralisés pour l'analyse des performances des systèmes multiprocesseurs", ACM Trans. Calcul. Syst., vol. 2, non. 2, p. 93–122, 1984.

[46] MP Fanti, AM Mangini, G. Pedroncelli et W. Ukovich "A Petri net model for Fleet sizing of electric car sharing systems" En 2016, 13e atelier international sur les systèmes d'événements discrets (WODES) IEEE, pp. 51-56, 2013.

[47] Maïder Estecahandy« Méthodes accélérées de Monte-Carlo pour la simulation d'événements rares. Applications aux Réseaux de Petri », Thèse de doctorat (rédigée en anglais), 18 avril 2016, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

[48] P. Briest, et C. Raupach « Le problème de l'autopartage », ActesSPAA '11Actes du vingt-troisième symposium annuel de l'ACM sur le parallélisme dans les algorithmes et les architectures, pp. 167-176, 2011.

[49] R. Bouyekhf, A. Abbas-Turki, O. Grunder &A. El Moudni (2003), « Modélisation, évaluation des performances et planification des systèmes de transport public à l'aide de réseaux de Petri stochastiques généralisés », Volume 23, Numéro 1, pp. 51-69, 2003.

[50] R. Mounce et JD Nelson, "Sur le potentiel de l'autopartage de véhicules électriques à sens unique dans les futurs systèmes de mobilité", Transportation Research Part A: Policy and Practice", Vol. 120, p. 17-30, 2019

[51] R. Nair et E. Miller Hooks., "Gestion de flotte pour les opérations de partage de véhicules". Science des transports 45(4) : 524–540, 2011.

[52] R. Zurawski et Zhou Mengchu « Réseaux de Petri et applications industrielles : un tutoriel », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, n° 6, pages 567 à 583, 1994.

[53] S. Illgen et M. Höck. "Établir des services d'autopartage dans les zones rurales : une analyse des opérations de flotte basée sur la simulation." Transport 47.2 (2020) : 811-826.

[54] SL Smith, M. Pavone, M. Schwager, E. Frazzoli et D. Rus, « Rebalancing the Rebalancers : Optimally Routing Vehicles and Drivers in Mobility-On-Demand Systems », dans American Control Conference, Washington, DC, juin. 2013, p. 2362–2367, 2013.

[55] SSchmolleret K.Bogenberger« Analyse des facteurs externes sur la demande spatiale et temporelle des systèmes d'autopartage »,Procedia -

Sciences sociales et comportementales,Tome 111, 5 février 2014, p. 8-17.

[56] S. Shaheen et A. Cohen, « Mobilité innovante : perspectives de l'autopartage, aperçu du marché de l'autopartage, analyse et tendances », printemps 2018,

[57] S. Illgen, M. Höck "Véhicules électriques dans les réseaux d'autopartage - défis et analyse des modèles de simulation", Transport. Rés. Transport Environ., Vol. 63, pages 377-387, 2018.

[58] SA Shaheen et AP Cohen "Autopartage et services de véhicules personnels : développements du marché mondial et tendances émergentes". Int. J. Trans durable. 7 (1), p. 5–34. 2013.

[59] T. Benarbia, "Contribution à la modélisation et à l'analyse de performances des systèmes de vélos en libre-service en vue de leur régulation : Une Approche basée sur les réseaux de Pétri", Thèse de doctorat, dirigée par K. Labadi et al ., 2013, Université de Cergy-Pontoise, France.

[60] T. Benarbia, K. Labadi, M. Darcherif et M. Chayet (2012) « Modeling and Control of Self-Service Public Bicycle Systems by Using Petri Nets », International Journal of Modeling, Identification and Control, Vol.17, No .3, pages 173 à 194, 2012.

[61] T. Murata « Réseaux de Petri : propriétés, analyse et applications », dans Proc. de l'IEEE, Vol. 77, n° 4, pages 541 à 580, 1989.

[62] VP Kumar, et M. Bierlaire « Optimizing locations for a vehicle sharing system », article présenté à la Swiss Transport Research Conference., Ascona, avril 2012.

[63] Zhou MengChu et DiCesare Frank "Synthèse du réseau de Petri pour le contrôle discret des systèmes de fabrication", Kluwer Academic Publishers, 1993.

Annexe

A Petri Nets-Based Simulation Methodology for Modular Modeling and Performance Evaluation of Car-Sharing Networks

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

A Petri Nets-Based Simulation Methodology for Modular Modeling and Performance Evaluation of Car-Sharing Networks

Ali Hamroun, Karim Labadi, Mourad Lazri, and Jean-Pierre Barbot, *Senior Member, IEEE*

***Abstract*— In the field of urban and green mobility, electric car-sharing networks have recently emerged as one of the promising alternatives, dealing with both environmental and transportation issues. Despite the increasing success of the shared mobility concept over the world, the design and management of such urban mobility systems implies strategic, tactical and operational challenges. To support designers and operators, all these issues constitute an emerging and challenging research topic, aiming to develop techniques and tools for modeling, analysis and optimization of such complex systems. In this contribution, based on the modeling and analysis power of stochastic timed Petri nets, a discrete event simulation approach is developed, taking into account their dynamic behavior complexities due to their self-service mode and characteristics including capacities of the stations, energy availability, rebalancing and maintenance activities. A real-life application is presented, to demonstrate the applicability and the potential of the proposed modeling and simulation analysis approach.**

***Note to Practitioners*—To support designers, providers and managers of shared mobility programs, performance and optimization models and decision-making tools are needed. In this contribution, we deals with a powerful and modular stochastic timed Petri net methodology suitable for performance modeling and simulation analysis of such complex dynamical systems. The authors believe that this discrete event dynamic approach has significant promise for the future and to influence economic viability and operational efficiency of such emerging urban transportation systems.**

***Index Terms*— Urban mobility, car-sharing networks, Petri nets, modeling, simulation, performance analysis.**

I. Work Context And Motivations

THIS paper dealing with "A Petri Nets-Based Simulation Methodology for Modular Modeling and Performance Evaluation of Car-Sharing Networks" constitutes a part of a multi-year research project on shared mobility systems, in collaboration with several research laboratories on modeling, simulation and optimization of complex dynamical systems and urban transport companies. The global project "Shared & Smart Mobility Lab" Project has been launched since 2010 by Labadi* *et al.* [5], [6], [8], [9], [34], [59]. The first publications, related to two accomplished Ph.D thesis [4], [58], concern the case of self-service public bicycle systems, a phenomenon in urban mobility within the last decade. This new contribution deals with the case of electric car sharing systems, which are gaining more considerable attention with multiple programs around the world due to their benefits to improve mobility and sustainability [57].

The scientific literature in shared mobility field is dominated by the development of operational research (OR) models to optimize some of their specific design and management issues. Despite the utility of such mathematical models, often solved by heuristic approaches, they are not suitable for capturing the dynamic behavior of such dynamical systems. In fact, adding the "time" and "stochastic" variables in such models makes them more complex and computationally intractable [12], [20], [24], [25].

Modeling and simulation of the dynamic behavior of shared mobility systems [2], [37], [40], is crucial for their performance improvement and optimization of their different strategic, tactical and operational issues (see Table III). Among the formalisms widely used to model various dynamical systems, Petri nets [60] have many benefits due to their solid graphical and mathematical foundation that enable both formal and simulation analysis of complex systems. They were used not only to address modeling and performance analysis issues, but also to study specific topics such as control, supervision, fault detection, balancing, scheduling, planning and design of many real-life systems including production and manufacturing systems [51], [62], logistic and inventory systems [26], [33], automated warehouse systems [18], [19], urban traffic systems [15], [35], [39], and more recently shared mobility systems [6], [34], [38], [47]. As a powerful modeling tool, various extensions to Petri net models have been proposed to meet the modeling and analysis needs of diverse systems, among them are timed Petri nets, stochastic Petri nets, colored Petri nets, hybrid Petri nets and other high-level Petri nets. As we demonstrated in our previous works [6], [34], shared mobility systems can well be viewed as stochastic discrete event systems [2], [29], [37], [40] and modeled by using

Manuscript received 21 April 2022; accepted 28 June 2022. This article was recommended for publication by Associate Editor K.-H. Chang and Editor J. Li upon evaluation of the reviewers' comments. *(Corresponding author: Karim Labadi.)*

Ali Hamroun and Mourad Lazri are with the LAMPA, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Tizi Ouzou 15000, Algeria.

Karim Labadi is with the ECAM-EPMI Graduate School of Electrical Engineering, 95092 Cergy-Pontoise, France (e-mail: k.labadi@ecam-epmi.com).

Jean-Pierre Babrbot is with the École nationale supérieure de l'Electronique et de ses Applications (ENSEA), 95000 Cergy-Pontoise, France (e-mail: barbot@ensea.fr).

Color versions of one or more figures in this article are available at https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3189405.

Digital Object Identifier 10.1109/TASE.2022.3189405

1545-5955 © 2022 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.
See https://www.ieee.org/publications/rights/index.html for more information.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

stochastic timed Petri net models for dynamic modeling and simulation analysis purposes.

The rest of this paper is structured in the following two main parts:

- ➢ The first part is dedicated to provide description and bibliographical review of car-sharing systems. It aims to describe the main scientific challenges of such complex systems and also to classify some main existing works in this emerging field. In addition, this part will allow us to specify and discuss the originality of our methodological contribution by using stochastic timed Petri nets, as a suitable tool for their modeling and simulation analysis.
- ➢ The second part represents our technical contribution for modeling and performance analysis purposes of "one-way" electric car sharing systems, taking into account their specific dynamic behavior, and several parameters including capacities of the stations, energy constraints, and their car maintenance activities, not negligible compared to bike sharing systems.

At the end of this paper, a real-life application is developed, to demonstrate the applicability and the potential of the proposed stochastic timed Petri net approach for modeling and discrete event simulation analysis of such mobility systems.

II. Introduction to Cars-Sharing Networks

In the field of urban and green mobility, car-sharing systems have emerged as one of the promising alternatives, dealing with both environmental and transportation issues affecting nowadays several dense urban areas [20], [24], [57]. Otherwise, due to the context of smart sustainable cities and environmental and energy transition, many cities around the world are encouraging their populations to use car-sharing services instead of private vehicles. The main concept of car-sharing systems is to share a fleet of cars between users (customers). Mainly located in dense urban areas, they are oriented to short-term rentals and contribute to fill the gap between existing modes of transportation. The organization renting the cars may be a commercial business, public agency, cooperative, company of users, or ad hoc grouping. Costs related to insurance, maintenance, fuel or electricity, taxes, and depreciation are supported by the service providers.

Historically speaking, car sharing began in 1948 with a cooperative in Zurich, Switzerland known as "Sefage". An original carpooling organization popped up from a Zurich based housing cooperative. It was the first experiment, and did not last long. After many years later, for several identified reasons, including technological limitations, service quality deterioration, financial costs, low demand, almost all effort at organizing car-sharing networks resulted in failure until the early 1990's. Nowadays, the concept is developed and more attractive by using internet, mobile, and new information and control technologies. According to TSRC's report "Innovative Mobility: Car-sharing Outlook", the number of car-sharing countries increased from 35 in 2014 to 46 as of October 2016. They were operating in six continents with over 2,000 cities, approximately 157,000 cars [55]. Since 2015, the concept has even been adopted in Africa, especially in Morocco and South

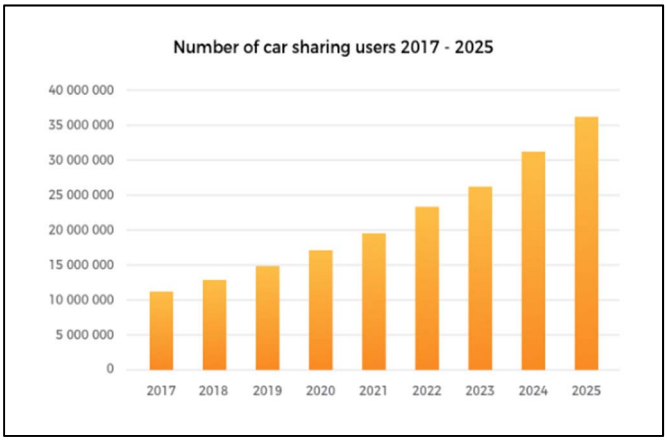


Fig. 1. (Source: Frost & Sullivan, Future of Car Sharing Market to 2025).

Africa, as the first two pilots in this continent. In 2017, there were already around 10 million people using this type of service, and, according to a study by Frost & Sullivan, by 2025 their numbers will reach 36 million, maintaining the annual growth rate of 16.4% (See Fig.1).

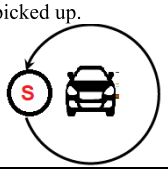
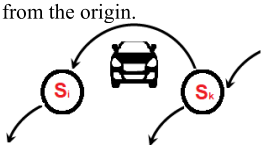
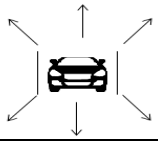
After unfortunate experiences and thanks to recent technological advances integrated into the basic concept, the last decade has recorded the strongest growth in the car-sharing market. Similarly to public bicycle sharing systems, car sharing is a model of short-term car rental, particularly attractive to customers who make only occasional use of a vehicle, enabling the benefits of private cars without the costs and responsibilities of ownership. The essence of a car-sharing system is very simple, allowing the users (i.e., customers) to pick up a car at some point and return it at another or the same point (station or parking space) where they picked it up. The concept has evolved during three main generations classified and described in Table I. It contains the "one-way", "two-way" and "free-floating" systems, according to whether the users should return the rented car at a different or at the location, they picked it up [21]. Moreover, in addition to the different generations presented in Table I, the type of cars (combustion, electric or hybrid cars) affects also the system's use.

Despite their apparent success over the world, the management of car-sharing systems is very complex. Their complexities are due to several factors including stochasticity of the demand, non-deterministic trips, and occurrence of incidents requiring maintenance. In more recent years, governments across the world are putting incentives in place to increase electric cars usage overall to reduce the environmental footprint of urban mobility [49]. In this context, a recent development of car-sharing systems has been the use of electric cars and suitable infrastructures equipped with charging points. Despite a positive impact on the environment, such models make their design and management even more complicated, due to the energy availability problem. Therefore, Electric car-sharing systems constitute an emerging and challenging topic, addressing all the tactical and strategical challenges structured in Table III, but including energy constraints to be explicitly considered in their dedicated methods and tools.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

TABLE I
CAR-SHARING GENERATIONS

Mode	Operating Mode	Advantages/ Disadvantages
Two-way mode (station based)	— Basically, the two-way mode, also called "the Round-Trip system" requires users to return cars to the station they were picked up. 	— The path of each user is restricted by considering that the departure station will be the return one. For operators, such systems are easy to manage since the incoming demand in each station is sufficient to control the distribution of the cars.
One-way mode (station based)	— The one-way mode allows users to pick up a car from a station and return it in a different one, possibly distinct from the origin. 	— The One-Way car sharing system is more flexible and more attractive for users. From an operational point of view, operators may encounter relocation problems in maintaining enough numbers of cars in stations to satisfy user demands.
Free-floating mode (without stations)	— In the "Free-floating" mode, the cars are freely parked in public spaces. The users can picked up on-street parked cars on any parking space within a defined area. 	— The Free-floating car sharing system offers greater flexibility than station-based car sharing modes, but free-floating cars are hard to manage and can cause the same issue of disorderly parking as private cars do.

As indicated in Table I, despite the increase of level of service for the users, one-way and free-floating modes raises a crucial problem for the spatial distribution of the cars, due to a possible imbalance between the users-demand and the availability of cars. In such cases, the service provider has to develop some operational strategies to efficiently redistribute the cars among the stations, in order to avoid empty or full stations, which are undesirable situations for users. Such a redistribution could respond to the short-term needs at a particular station or be based on an historical prediction (i.e. estimating future demand to proactively schedule relocations).

The relocation problem [1], [41] concerns in particular large car-sharing networks having many parking areas relatively far from each other with unbalanced frequentations; and was responsible for the failure of Honda's Diracc system in Singapore and partly Paris's Auto-lib discontinued in 2008 and 2018 respectively. As described in Table II, in the practice, operator or user based strategies can be used or combined to mitigate this operational and management problem.

III. CHALLENGES AND ISSUES REVIEW

In spite of their great success in the world (see Fig. 1), car-sharing systems raise several and decisive strategic, tactical and operational issues, as summarized in Table III. All of these issues represent significant challenges for the scientific community. Modeling approaches, performance evaluation techniques, optimization models and decision-making tools constitute some unavoidable topics in this emerging research area, aiming to help designers and operators for better design and management of such dynamical systems.

TABLE II
OPERATOR / USER BASED STRATEGIES

Strategies	Description of the Strategies
Operator-based strategy	By using operator-based strategies, all operational activities including car maintenance and relocation operations are performed by specialized operators. The rebalancing operations can be performed in two different ways: – Static rebalancing mode: the cars redistribution can be performed overnight when the service rate is negligible. This mode allows a best distribution of cars for the next day's service. – Dynamic rebalancing mode: The cars redistribution can be carried out periodically during the day (service). This mode is particularly useful in the case of large networks with persistent imbalance.
User-based strategy	The rebalancing problem is operationally more difficult than in the case of bike sharing systems. In the latter, we can use a truck to move several bicycles at the same time, while we cannot do this in self-service cars due to the size of the cars and the difficulty of loading and unloading the cars. As the relocation problem is a real headache for operators, the great majority of shared cars networks involve user-based strategies, also called incentive strategies. Some users may be available in performing some required relocations, if motivated by a reduction in the transport price.

Over recent years, academic literature is very plentiful in this area [11], particularly in the case of bicycle sharing systems [6], [28], [34], [59]. Many active researchers from different communities, such as those of operational research, discrete event systems, and computer simulation, aim to help service providers to obtain efficient design and viable economic and operational management of such urban mobility systems. For a structured review of the recent literature in this emerging field, the reader can refer to [10], [12], [21], [23], [24], [57].

As general trends, the scientific research in this field can take various orientations related to many raised issues including modeling, analysis and optimization of strategic, tactical and operational decision problems, as specified in Table III. Strategic decisions seek to determine the number, size and allocation of stations, and the number of the cars to be deployed [10], [25], [61]. In other hand, operational decisions are particularly related to the rebalancing activities to make the system even more efficient and more profitable during the service [7], [30], [53].

Different approaches and methodologies have been proposed, including mixed integer programming approaches [25], [50], [53], heuristic and meta-heuristic optimization approaches [31], [32] data mining and statistical prediction models [27], [54], Petri nets and queuing network modeling approaches [3], [14], [29], [38], [45], [47] and analysis/ optimization based simulation methodologies [2], [13], [36], [37], [40], [52], [56].

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

TABLE III
MAIN ISSUES RELATED TO THE DESIGN AND MANAGEMENT OF CAR-SHARING SYSTEMS

Management Levels	Main Issues
Strategic Level **(Long-term)**	✓ Localization, number and capacities of the stations ✓ Types and number of cars (Hybrid, Electric, …) ✓ Availability of parking, electric charging and maintenance facilities
Tactical Level **(Medium-term)**	✓ Specification of routes, information to users and incentive strategies ✓ Reservation time, pricing of services, subscription types ✓ Balancing policies (frequencies, resources, static or dynamic mode, …)
Operational level **(Short-term)**	✓ Car redistribution between stations (Rebalancing activities) ✓ Car maintenance and management of technical incidents ✓ Electric charging of cars and management of battery autonomy.

However, similarly to the case of bike sharing systems [5], [6], [8], [9], the operational research community is very active in this emerging field, which provides various mathematical models to solve some specific optimization issues such as station location, station sizing, and rebalancing routes [24]. Indeed, more often than not, the RO models are expressed by exploiting some similarities with classical optimization problems such as vehicle routing and hub location inventory problems, which have been widely studied in the literature. Despite the utility of such mathematical models, they are not suitable for capturing their dynamic behavior. In fact, adding the "time" and "stochastic" variables can make such models computationally intractable. Apart from operational research approaches, car-sharing systems may well be described through discrete event dynamic models and techniques for formal and/or simulation analysis and optimization purposes [2], [13], [29], [36], [37], [40], [52], [56].

Our "Shared Mobility Lab" project launched since 2010 is based on two axes. Both operational research [5], [6], [8], [9], [34], and discrete event approaches are developed and/or combined in the case of bike-sharing systems. Particularly, we demonstrated [6], [34] that shared mobility systems can well be viewed as stochastic discrete event systems [2], [29], [37], [40] and modeled by using stochastic timed Petri net models for dynamic modeling and simulation analysis studies.

As stated earlier, this new contribution deals with the case of electric car sharing systems, which are gaining more considerable attention with multiple programs around the world due to their benefits to improve mobility and sustainability [57].

We consider the case of the "One-Way Electric Car-Sharing" system [49], more flexible and attractive for users than the two-way mode, previously described in Table I. As the latest generation mode in urban mobility, they raise many scientific challenges including modeling, simulation, analysis and optimization topics (see Tables I-II).

The general representation of the network considered for development of our modeling and analysis approach is represented in Fig. 2. It illustrates a realistic structure of a one-way Electric Car-Sharing deployed in a city and around its industrial and commercial zone. Equipped with a management and maintenance center, the network has "NS" parks (stations), designated by $S = \{S_1, S_2 \ldots S_n\}$, placed in strategic areas around the city (hospital, bus station, school, …). Every station (S_i) constitutes a delimited parking space with limited car places (C_i) which are equipped with electric charging points. According to the one-way mode, each car -when available and ready (sufficiently charged)- can be removed from the station by a user. After the service, the car can be returned at any other station (possibly the initial station), provided there is at least one available place to pack it. After parking the car, it becomes again available for other users after a charging duration – if necessary – allowing a next short-term car rental. Unlike bike sharing systems, car incidents and accidents are not negligible. They need to a relatively long time for towing and maintenance operations. In this situation, specialized operators move the cars individually to the maintenance center. We consider that at the end of each maintenance, the repaired car is systematically reintroduced into the network via the nearest station, designed as "the station park".

Unlike in free-floating mode, cars cannot be dropped off anywhere and station capacities must be respected. To help and/or influence users during their pick-up and drop-off operations, such mobility systems provides technological supports including web applications allowing users to know the availability of places/cars at the stations in real time.

As discussed earlier (see Table II), operational management of such systems is more difficult than in the case of bike sharing systems. In the latter, trucks can be used to move several bikes at the same time between the stations. It is difficult do this for cars due to their size and the difficulty of loading and unloading the cars. This is why user-based policies are often applied.

More specific parameters and technical details about the considered real-life system will be given in Section VI.

IV. A MODULAR STOCHASTIC TIMED PETRI NET MODEL

This section develops the Petri nets modeling technique used to represent a one-way electric car-sharing system, according to the realistic structure shown in Fig. 2 and the real-life application developed in section VI. The model takes into account the dynamic behavior of the system with respect of its specific constraints (e.g., station capacities, battery recharging, car maintenance, …).

A. Basics of Stochastic Timed Petri Nets

Firstly, for readers not familiar with the Petri net formalism, this sub-section recalls some essential definitions and rules [60]. Basically, a Petri net is defined as: PN = (P, T, Pre, Post, M_0), where: $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$ is a finite and non-empty set of places; $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_m\}$ is a finite and non-empty set of transitions; Pre: $|P| \times |T| \rightarrow N$ (resp. Post) is an input (resp. output) matrix that corresponds to the weights

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

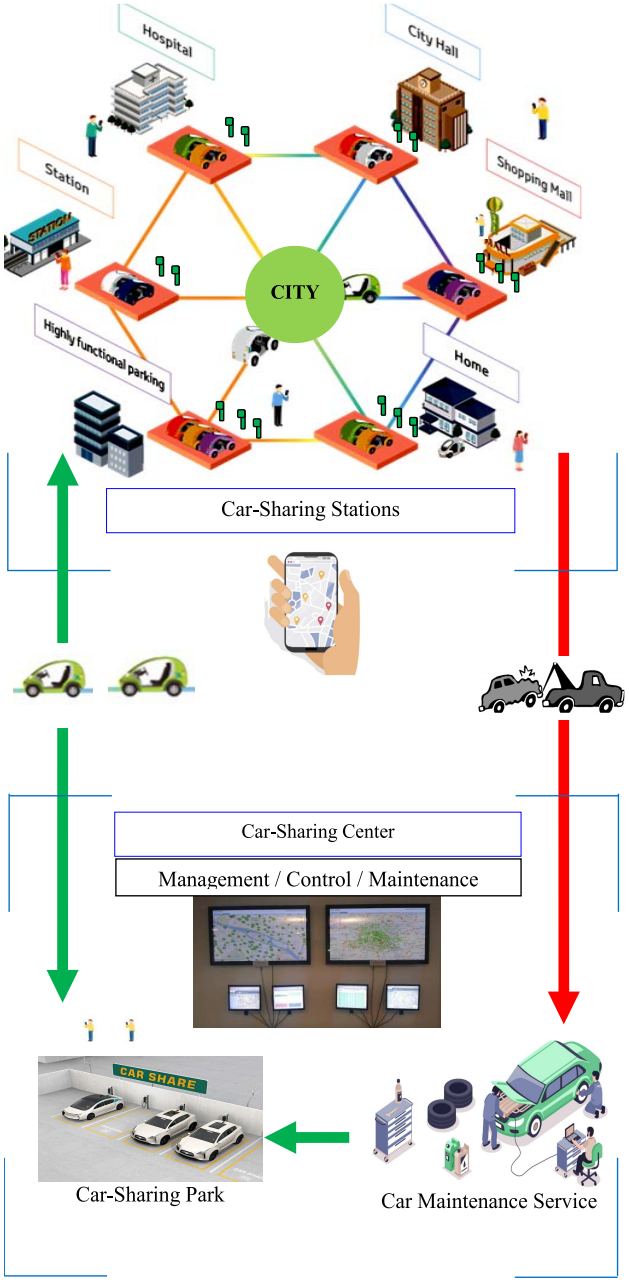


Fig. 2. General Car-Sharing design network.

of the directed arcs from places to transitions (resp. from transitions to places), where N is a set of nonnegative integers; and $M_0 = \{M_0(p1), M_0(p2), \ldots\}$ represents the initial marking (state) of the Petri net, that is the number of tokens initially assigned to each place of the net. The set of input (resp. output) places of a transition t_j is denoted by ${}^\bullet t_j$ (resp. $t_j^\bullet$). The weights of an input arc and of an output arc are respectively denoted by $\mathrm{Pre}(p_i, t_j)$ and $\mathrm{Post}(p_i, t_j)$.

From a graphic point of view, a place, denoted as circle, may contain tokens, denoted by dots, and the current state (the marking) of the modelled system is specified by the number of tokens in each place. Each transition, denoted as bars or rectangles, usually models an activity whose occurrence is represented by its firing (activity execution). The interpretation of the places, transitions and arcs in a Petri net depends on the system modelled. Generally, the places may represent material or information resource status; the transitions may represent the starting or end of events, operations, processes, and activities; and the arcs may represent material, resource, information, and/or control flow directions.

The dynamic behavior of a system, modelled by using a Petri net, can be described in terms of its changes (state evolution) by firing each enabled transition (event execution) state by state. A transition can be fired only if it is enabled, which means that all preconditions for the corresponding activity are fulfilled (there are enough tokens available in the input places of the transition). When the transition is fired, tokens will be removed from its input places and added to its output places. The number of tokens removed/added is determined by the weight of the arc connecting the transition with the corresponding place. A transition t_j is said to be enabled at a marking M if only if: $\forall p_i \in {}^\bullet t_j, M(p_i) \geq Pre(p_i, t_j)$. After a firing of an enabled transition t_j, the marking M changes to M' as follows: $^\circ \forall p_i \in t_j, M'(p_i) = M(p_i) - \mathrm{Pre}(p_i, t_j) + \mathrm{Post}(p_i, t_j)$.

The original formalism of Petri nets has been extended in the literature in many ways in order to enhance its modeling capability to meet the needs of various complex dynamic systems; among them are timed Petri nets. The timing concept is essential for performance evaluation of many dynamical systems including shared mobility systems considered in this work. Since transitions are often used to model events or activities (e.g. control, order, transportation, etc.), transition enabling duration corresponds to activity execution and transition firing corresponds to activity completion. Two types of transitions can be used for system modeling: (i) Immediate transitions with zero firing delay and (ii) Timed transitions with deterministic or stochastic firing delay.

The SPN, GSPN and DSPN models are widely used in the literature [42], [44], where an exponential distribution (with parameter λ_j) is associated with each stochastic transition t_j, where $1/\lambda_j$ specify its average firing delay (or $\boldsymbol{\lambda_j}$ is the average transition firing rate). If a system is modelled by using such models, its analysis can be performed by using analytical methods based on their underlying stochastic processes, according to their characterization and some assumptions. Particularly, the Markovian theory has been exploited in such models.

In the case of real-life complex systems leading to a combinatorial explosion of the number of states and/or uncharacterized stochastic processes following different distributions (not necessarily exponential ones), simulation or numerical approximation methods are required. Petri nets are also powerful in this area, and integrated in several advanced simulation tools.

Moreover, to finely model the dynamics, the formalism power of the stochastic/ timed Petri nets allows the choice of appropriate policies to manage the "firings" and the "firing times" of the transitions. Briefly, the common rules and policies used in timed/ stochastic Petri nets include the "race policy" to select the enabled transition with the minimum firing delay to fire; the "Memory policy" to manage the timing evolution (clocks) of all enabled transitions that are not fired

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

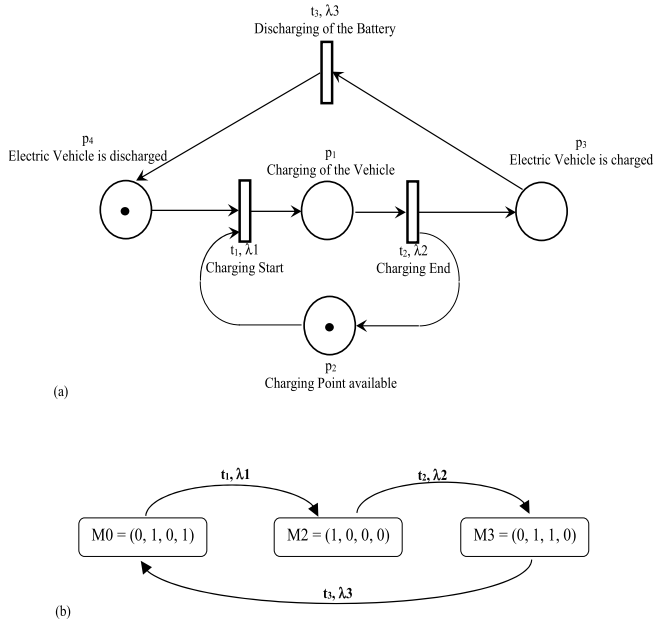


Fig. 3. An illustrative Petri net example (charging and discharging cycle).

TABLE IV
MEANING OF PLACES OF THE MODEL

Places	Meaning
PCU	Modeling of the cars rented by users. The marking of PCU corresponds to the number of rented cars (in service), at a given moment.
PSC_i	Modeling of the incoming cars at the station S_i and subject to the charging process according to their energy levels.
PV_i1, $PVi2$, PV_i3	Incoming cars status according to their energy levels.
PSR_i	Modeling of the cars parked at the station S_i, ready for service and then available for users.
CAP_i	Representation of the number of free places in the station S_i. In other words, it's used to limit the capacity of the station to "C_i".
PSD_i	Modeling of the user demands that await the availability of a car in the station S_i.
PCM	Modeling of the maintenance operation. The marking of PCM represents the cars under maintenance due to accidents/incidents.
PSC_p, PSR_p, CAP_p	Modeling of the station park (similar to other stations, but also used by the maintenance service)

(continue or restart mechanism). There are different ways of keeping track of the past such as resembling, enabling, and age memory policies [43].

As an illustrative example, the Petri net given in Fig. 3 (a) models the charging and discharging cycle of an electric vehicle, as a simple discrete event process. As indicated by the marking of the place p_4 (i.e. $M(p_4) = 1$), the electric vehicle is initially discharged. After some time (mean duration $1/\lambda 1$) according to the stochastic transition t_1 and the availability of the charging point ($M(p_2) = 1$), the charging process

TABLE V
MEANING OF TRANSITIONS OF THE MODEL

Transitions	Meaning
TUD_i	User demand arrival at each station S_i.
TUS_i	User demand is "satisfied" and then "user departure" from station S_i.
TUN_i	User demand "lost" at station S_i. The user leaves the station without having been served after a waiting time.
TCC_i	Car return to station S_i by user. Then, the car will be subject to the charging process.
TV_i1, TV_i2, TV_i3, TV_i4	Energy status classification of the incoming cars according to their energy levels.
TR_i1, TR_i2, TR_i3,	Electric charging of the incoming cars according to their energy levels.
TCM	Car picked up for maintenance (e.g. due to an incident/ accident) by service provider.
TMP_R	After maintenance, car is parked at the station park. It is ready and available for users.
TCC_p	Car return to station park by user. It is subject to the charging operation.
TCR_p	End of the charging operation. Deposit of a car in PSR_i as ready for service by users.
TUD_P, TUN_P, TUS_P	Similar to TUD_i, TUN_i and TUS_i (Used to model the user demand subnet for the Station Park)

starts by firing the transition t_1, leading to a new marking $M(p_1) = 1$, indicating that the vehicle is under charging. After the duration of the charging process fixed to $1/\lambda 2$ on average, the transition t_2 is fired and consequently $M(p_2) = 1$ to indicate that the charging point is now available and at the same time $M(p_3) = 1$ to specify that the electric vehicle is charged. While the car is in use, its battery discharges according to the rate $\lambda 3$ associated to the transition t_3. The process can be associated with a graph of markings, repenting the state/transition evolution of the Petri net (see Fig. 3.(b)).

B. The Developed Petri Net Model

Now, we present the Petri net model developed according to the general system described previously (see Fig. 2). Fig. 4 and Tables (IV) and (V) given bellow allow readers, to quickly gain an understanding of the model. Thanks to the modularity of the model, it can be reproduced for large network with *NS* stations. The Petri net contains (7*NS + 2) places, (11*NS + 2) transitions, and (23*NS + 5) arcs.

A closer look at this model (Fig. 4) shows different subnets (modules) representing modular functions according to the description given in the previous section (IV). All the components of the model are described in Tables IV and V. Next, the model is described in a modular way.

As shown in Fig. 5.(a), each station S_i is modelled by using six places (PSC_i, PV_i1, PV_i2, PV_i3, PSR_i and CAP_i) and all of its associated arcs and transitions. The marking of the place PSC_i represents the incoming cars parked at the station S_i and

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

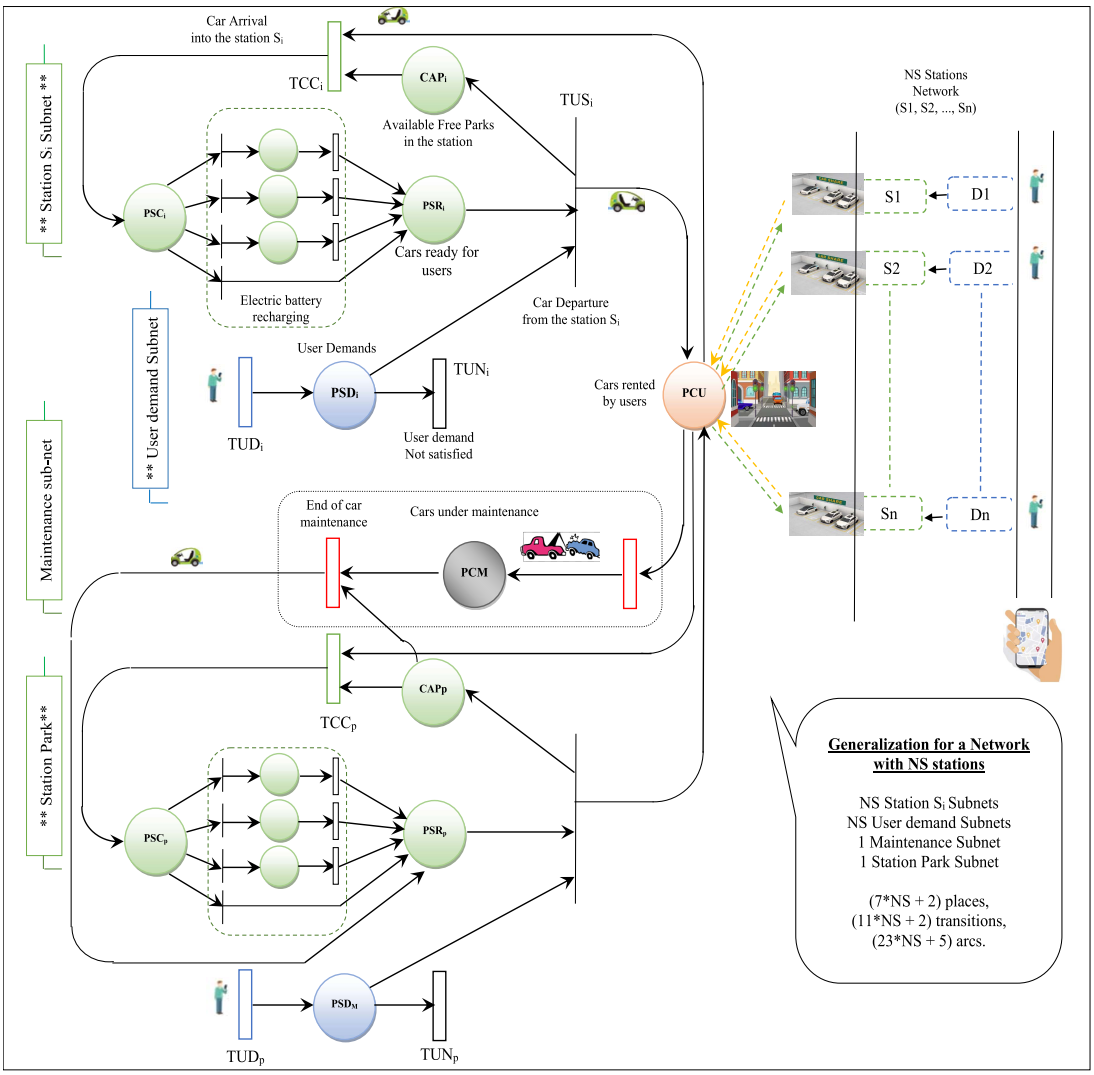


Fig. 4. The Petri net model of the OW-ECSS.

classified in the places PV_i1, PV_i2, PV_i3 according to the status of their energy levels. The marking of the place CAP_i represents the number of free places in the station S_i (used to limit the capacity C_i of a station S_i).

Considering that, the energy consumption depends on the distances driven by cars, as shown in Figure 5(b), we "discretize" the battery status indicator of incoming cars in four levels. Thus, when a car returns to the station, the charging duration will be relative to its current energy level. Thus, in terms of the developed Petri net model, the tokens (cars) entering the place PSC_i, by firings the transition TCC_i, are immediately subject to the charging process according to their energy levels.

The status selection is performed in a "probabilistic" way by firings the immediate transitions TV_i1, TV_i2, TV_i3 and TV_i4 according to their associated "random switches". Then four clusters of incoming cars under charging are represented by the marking of the places PV_i1, PV_i2, and PV_i3. More specifically, the firing of the transition TVi4 corresponds to possible cars that can come back already sufficiently charged (4^{th} cluster) and therefore ready for new users without electric charging. The marking of the place PSR_i represents the cars ready for users after an adequate charging duration assured by the transitions TR_i1, TR_i2, and TR_i3.

The model allows a configuration of the electric charging process depending on data about the user mobility behavior of a real life system. An estimation of the incoming cars according to their Energy Levels ($ELs_{\%}$ with s = 1 to 4) of their batteries corresponding to the four considered situations ($0\% < EL1_{\%} \leq 25\%$, $25\% < EL2_{\%} \leq 50\%$, $50\% < EL3_{\%} \leq 75\%$, $75\% < EL4_{\%} \leq 100\%$) as illustrated in Fig. 5(b). As noted previously, a probabilistic selection of such status is performed by using adequate probabilities ($Prob_s$, with s = 1 to 4) to manage the firings of the immediate transitions TV_i1, TV_i2, TV_i3 and TV_i4.

The cars under charging are represented by markings of the places PV_i1, PV_i2 and PV_i3 and the charging durations from a given energy level "$EL_{\%}$" to a sufficient energy level "$EL^*_{\%}$", to be fixed according to the provider strategy (charging policy), are modelled by the firing delays generated by the transitions TR_i1, TR_i2, and TR_i3. Despite the "discretization" of the battery status indicator according to Fig 5(b), the charging duration remains probabilistic in each interval. For a probabilistic perspectives, it assumed to associate adequate

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

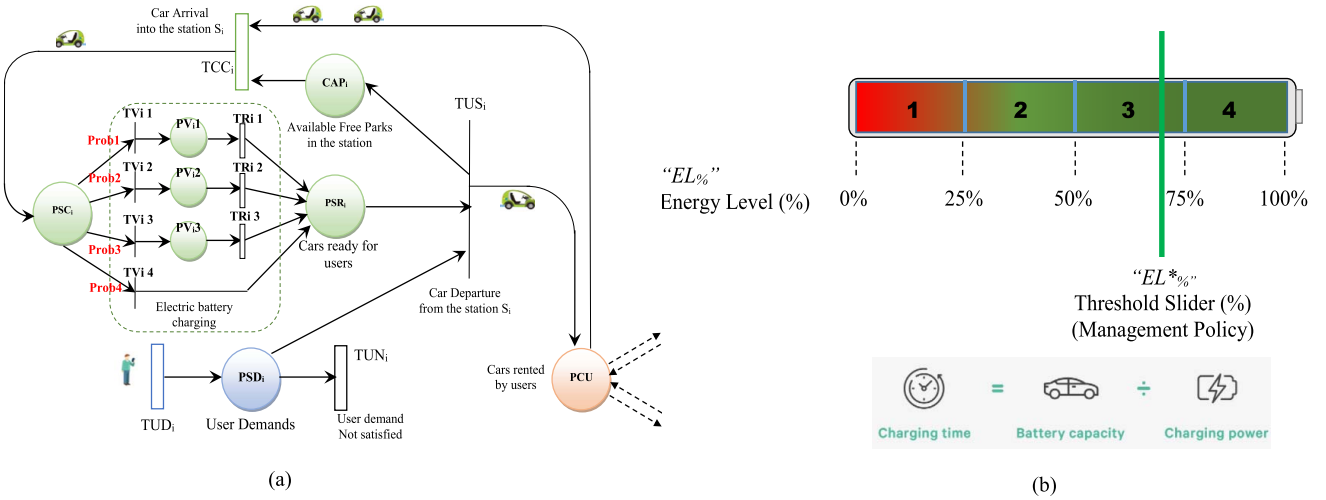


Fig. 5. (a) The "car station" and "user demand" subnets. (b) "Discretization" of the Battery Status.

uniform distributions to the transitions TR_i1, TR_i2, and TR_i3 in order to generate uniformly over an interval $[CT_{min}, CT_{max}]$ charging times needed from a given energy level "$EL_{\%}$" $\in$] x%, y%] to the fixed sufficient energy level "$EL^*_{\%}$". We note that:

- CT_{min} is the charging duration required from X% to $EL^*_{\%}$ charge and CT_{max} from Y% to "$EL^*_{\%}$".
- "$EL^*_{\%}$" represents the sufficient level point of charge (charging policy) making the cars ready for users.
-] X%, Y%] $\in$ {] 0%, 25%],] 25%, 50%],] 50%, 75%],] 75%, 100%].
- As indicated in Fig. 5(b), the calculation of the CT_{min} and CT_{max} for each interval depends on the battery capacity of the deployed cars and the station charging power.

Regarding the user demand process for each station S_i, it is assumed to be Poisson. It is modelled by using an exponential transition TUD_i (with parameter λ_{TUDi}). When there are cars available in the place PSR_i, the acceptance of the user demand is performed by firing the immediate transition TUS_i. As in practice, some user demands can be lost (not satisfied), after a stochastic waiting delay, when there are not available and ready cars at the desired station. Such event is represented by the transition TUN_i. Considering that each customer's waiting time depends on his personal decision and own patience (memoryless phenomenon) by ignoring the past on the use of cars, we assume that the transition TUN_i is exponentially distributed, generating an average waiting time of $1/\lambda_{TUNi}$ units of times.

As shown in Fig. 6, the "car maintenance", due to possible accidents, is represented by the following components:

The transition TCM is used to model the towing of damaged or broken car to the maintenance service represented by the place PCM. The associated firing delay of the transition TCM is related to the average accident/incident rate of a given real system to be considered.

The marking of the place PCM represents the cars under maintenance operations at a given time. Each firing of the stochastic output-transition TMP_R models the end of a maintenance operation of a car. The associated firing delay must

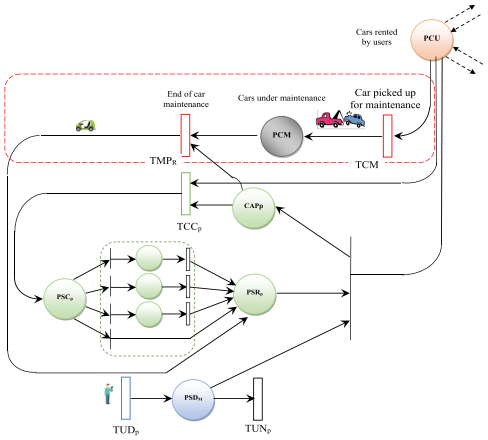


Fig. 6. The "car maintenance" and "station park" subnets.

match with the average rate of repair / maintenance of a car. By firing the transition TMP_R, we consider that at the end of each maintenance, the repaired car is systematically reintroduced into the network via the nearest station, called "the station park".

Finally, note that, accordingly to the behavior of the modelled system, we consider timed transitions using infinite server semantics, with enabling memory policy [43].

V. Performance Evaluation

For performance evaluation and analysis of any system modelled as a stochastic timed Petri net model, analytical approaches or simulation techniques can be considered depending on some conditions. Analytic approaches can be performed particularly when the underlying stochastic process has a finite number of states (markings) and is analytically characterizable and solvable under some specific assumptions [22], [42], [44]. On the other hand, for large (e.g. with infinite number states) and/or complex dynamical systems (e.g. uncharacterized stochastic process) including car-sharing networks considered in this work, simulation techniques may be required.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

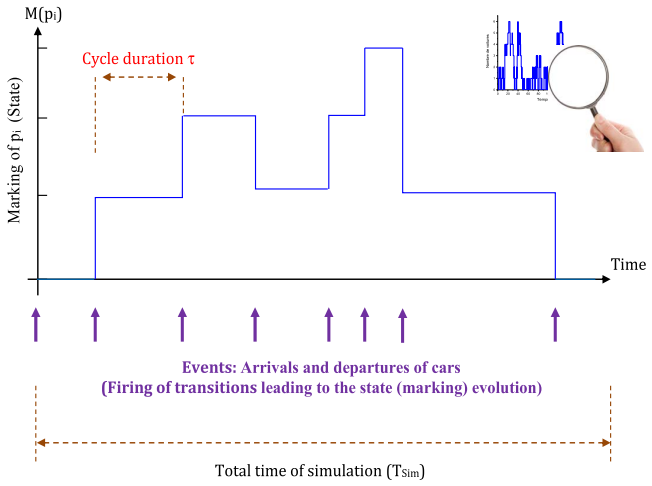


Fig. 7. The State/Time Trajectory (dynamic behavior).

There are many software tools for Petri nets simulation and analysis where the simulation process allows generating the "State/Time" trajectories of the modelled system that represent its dynamic behavior (see Fig. 7). Thanks to the mathematical bases of Petri nets (transition firing rules, state equation, time management policies, firing conflict resolution, . . .), the simulation technique consists in the execution of the Petri net model, dynamically selecting the enabled transitions, calculating the remaining enabling times, firing transition by transition (event execution) which leads to marking evolution.

A. "State/Time" Dynamic Behavior

The Fig. 7 illustrates the execution of a Petri net. Each cycle represents the state of a given place p_i between the firing of one transition (event) and the next one that will change this state. At each event, the simulation time is increased according to the type of transition fired after its required execution delay related to its nature (immediate, deterministic, stochastic). At the end of the simulation process, after a fixed duration ($T_{sim} \rightarrow \infty$), the generated state/ time trajectories are used to estimate different performance measures of the modelled system.

Numerous performances can be defined and formalized by exploiting and interpreting the marking evolution of the places (Eq. (1) - e.g., average number of available cars in each station), the sojourn time of tokens in the different places (Eq. (2) - e.g., turnover / use of cars), and the firing rates of the transitions (Eq. (5) - e.g., incident and maintenance rates), etc.

B. Metrics for Performance Evaluation

A key performance indicator is a type of performance measurement that helps us to understand the dynamic behavior of the system and to quantify its performance. Based on the Petri net model and its dynamic behavior, several indicators can be formalized for car-sharing system analysis. For interpretation and formalization of some important indicators, look at Fig. 7 and consider the following notations (Table VI).

TABLE VI
NOTATIONS USED TO FORMALIZE THE PERFORMANCE INDICES

Notations	Interpretations
p_i	Represents a given place p_i and its marking by $M(p_i)$
t_i	Represents a given transition t_j
T_{sim}	Represents the total simulation time
N_{Rep}	Represents the number of replications
k	Represents the indice of the k^{th} replication of a simulation
τ_k	Represents the duration of the cycle between two firings
$M(p_i)_k$	Represents the number of tokens at the beginning of the cycle
$NF(t_j)_k$	Represents the number of firings of a transition t_j
NT_k	Represents the number of different tokens that have passed through this place until the current cycle

We formalize two main groups of performance indicators such as *place metrics* and *transition metrics*. All the indicators developed in the following can be computed for different parameters and/or scenarios of the system represented by its Petri net model.

Place metrics

- ***Average marking of a place p_i*** – The performance indicator (1) represents the mean number of cars in different locations in the network, according to different marking of the places: PSC_i(cars under charging), PSR_i (cars ready for users), PCU (cars in service by users), PCM (cars under maintenance), and so on.

$$\overline{M(P_i)} = \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \left(\frac{\sum (M(p_i)_k * \tau_k)}{T_{Sim}} \right) \quad (1)$$

- ***Mean sojourn time of tokens in a place p_i*** – The performance indicator (2) represents the mean sojourn time of the cars in different locations in the network (stations, city, and maintenance center; . . .). This performance indicator is useful to have a vision on the mobility, the use and the turnover of cars during the service.

$$\overline{S(P_i)} = \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \left(\frac{\sum (M(p_i)_k * \tau_k)}{NT_k} \right) \quad (2)$$

- ***Percentage of an empty or full station*** – In the case of a car-sharing system, it is interesting to estimate the percent (%) of having an empty or saturated car-station, that occur when $M(PSR_i) = 0$ or $M(PSR_i) = C_i$, in terms of the Petri net model. We use only the place PSR_i, if we consider just the cars ready for users, after their charging

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

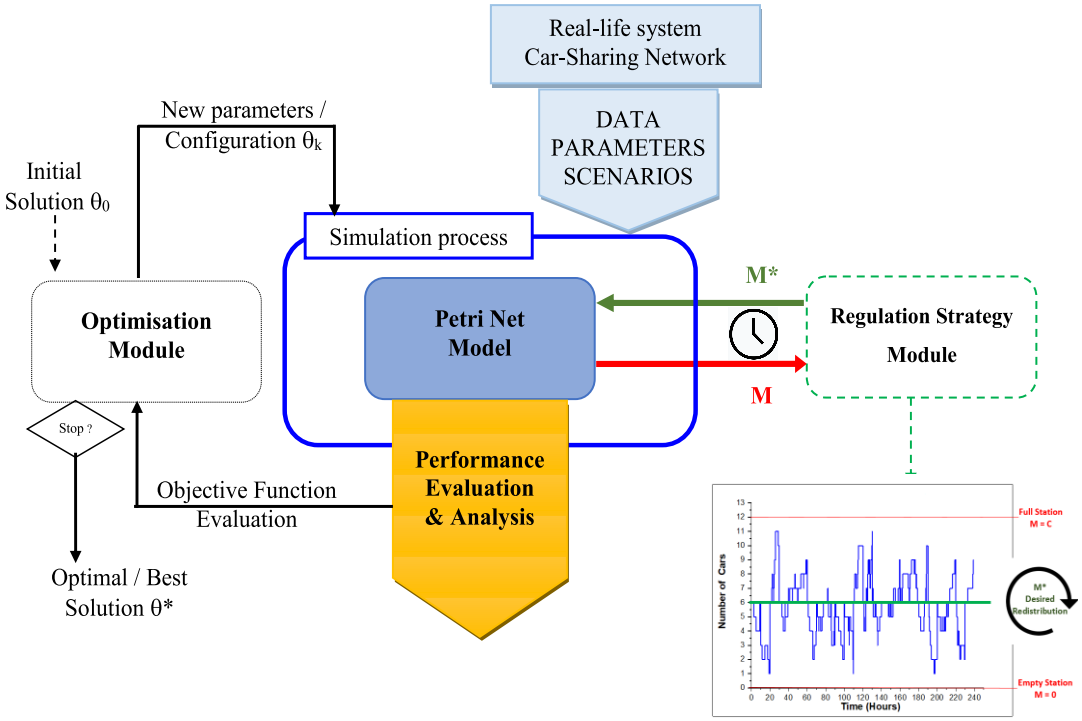


Fig. 8. General exploitation of the Petri net model.

operation, as follows:

$$Emptyl_{Station(i)}\% = 100 * \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \frac{1}{T_{Sim}} \left(\sum_{s|M_s(PSR_i)=0} \tau_s \right) \quad (3)$$

$$Full_{Station(i)}\% = 100 * \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \frac{1}{T_{Sim}} \left(\sum_{s|M_s(PSR_i)=Ci} \tau_s \right) \quad (4)$$

Note that the terms "$s|_{Ms(PSRi)=0}$" and "$s|_{Ms(PSRi)=Ci}$" signify that we sum all durations "τ_s" where the marking of the place PSR_i representing the station is equal to 0 (empty station in Equation 3) or C_i (full station in Equation 4).

Otherwise, by summing (3) and (4), it is also interesting to estimate the percentage of having one of the two undesirable situations (empty or full station).

Transitions metrics

– ***Average firing rate of a transition t_j –*** The performance indicator (5) represents the rate of occurrence of events including operations; incidents; and different other activities modelled by transitions (see Table V). As examples, the rates of the incident and maintenance activities, the demand satisfaction or rejection correspond to the firing rates of the corresponding stochastic transitions TMP_R and TCM, respectively.

$$\overline{F(t_j)} = \frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} \left(\frac{NF(t_j)_k}{T_{Sim}} \right) \quad (5)$$

where $NF(t_j)_k$ represents the number of firings of the transition t_j (occurrence of its corresponding event) during the k^{th} simulation of the system.

– ***Percentage of user satisfaction level –*** According to the Petri net model, it is possible to estimate the user satisfaction level (%), for each station S_i by the indicator (6), where the number of firings of the transitions TUS_i and TUN_i correspond respectively to the number of satisfied and lost user demands during the service.

$$USL\% = 100 * \frac{\sum_{k=1}^{N_{Rep}} (NF(TUS_i)_k)}{\sum_{k=1}^{N_{Rep}} (NF(TUS_i)_k + NF(TUN_i)_k)} \quad (6)$$

– ***Percentage of demand rejection level –*** The percentage of rejected user demands can be deduced from:

$$URL\% = 100 - USL\% \quad (7)$$

C. Exploitation of the Model

The developed Petri net model is modular and configurable. Thanks to its modularity, it is easy to reproduce the different subnets of the model for large networks with "NS" stations. As represented in Fig. 8, besides its explicit modeling power of such urban mobility systems, by considering their different characteristics and constraints, the model can be used for design, analysis and optimization issues for different parameters of a real-life system. Indeed, the configuration of its transitions (firing delay) and places (initial marking) must be done taking into account the parameters of the system including its number of stations; number of cars; capacities of stations, user demands, incident rates; etc.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

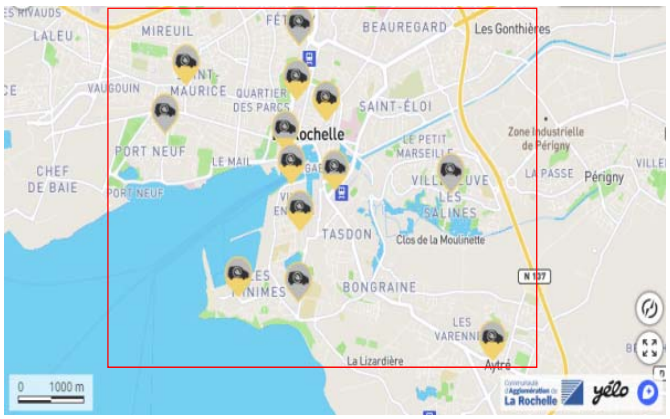


Fig. 9. Yélomobile – La Rochelle (France) by « Google map » https://www.google.fr/maps.

TABLE VII
DESIGNATION AND CAPACITIES OF THE STATIONS

Stations (Places PS_i)	Designation	Capacity
S_1	Médiathèque	6
S_2	Minimes	6
S_3	Piscine	5
S_4	Préfecture	6
S_5	Gare	9
S_6	Pôle Techno forum	6
S_7	Place Saint Maurice	6
S_8	Marché de Portneuf	6
S_9	Arsenal	12
S_{10}	Verdun	9
S_{11}	Aytré	6
S_{12}	Villeneuve-Les-Salines	6
S_{13}	EIGSI	6

Source: https://yelo.agglo-larochelle.fr/services/autopartage-yelomobile/

Based on the various defined performance indices, the proposed approach can contribute to the design of such systems by performing parametric analysis and possibly optimization studies, by coupling the model with an optimization technique with simulation, such as genetic algorithms as in [6]. Moreover, unlike our* work on the case of self-service bicycles systems [34] where the rebalancing operations (regulation) are explicitly integrated with the developed Petri net models, it is possible to integrate them implicitly – as a relocation algorithm – in the simulation process. Basically, the rebalancing operations consist to modify the redistribution of the cars between the stations (current marking M of the stations modeled by places) by the desired redistribution of the cars M* at the end of day's service (static mode) or periodically during the service (dynamic mode).

VI. A REAL-LIFE APPLICATION

To demonstrate the applicability of the proposed approach, several numerical experiments are performed by exploiting some historical data from Yélomobile (France) shown in Fig. 9. The modeling and simulations are made by using the "MOCA-RP" of the "GRIFF simulation tool" as illustrated in Fig. 11. In Table VII, the stations of the network and their capacities are indicated.

A. Data and Parameters

To configure the Petri net model, different data (e.g. station capacities, number of cars, ...) have been observed from:
https://yelo.agglo-larochelle.fr/services/autopartage-yelomobile/ and also through discussions with the provider and operators.

Furthermore, the exploitation of available historical data allowing the configuration of the Petri net model constitutes an important step in such studies.

We note that:

- The Petri Net model is configurable and can be studied under different scenarios and parameters depending on the variability of data according to specific periods and typical days of service (seasons, holidays, weekends, etc.) and –possibly– according to different structures of the network (number of stations; capacities; number of cars; ...) for design analysis purposes.
- More generally, data from managers and operators of such systems are often raw. They require analysis to extract explicit and needed parameters according to the inputs of the developed model; particularly to estimate the different frequentations of the stations; the average times associated with departures and arrivals of cars; the charging durations and the incidents rates of the electric cars; etc.

Our demonstration is performed by using the specifications and the parameters given bellow. They are used to configure the transitions and the places of the Petri net model. Specifically, we consider the following information about the deployed electric cars:

- The considered car-sharing system uses 28 Smart Electric City Cars, with a range of 100 to 120 km (Autonomy). These 28 cars, fully charged overnight, are initially distributed in the different stations, putting "$C_i/2$" cars in each station S_i. This initial marking corresponds to the "end of day" regulation applied during the night for the next day's service.
- A full charge (0% to 100%) of the cars requires about 3 hours depending on the charging power used in the stations. The charging policy considered allows users to unlock and use the cars charged at 70% ($EL^*_{\%}$), corresponding to trips of 70 to 80 km, largely sufficient for urban use.

Considering that the charging speed is constant (independent of the battery level) the charging times per different levels are given in the following representation. It allows the configuration of the transitions TR_i1, TR_i2, and TR_i3 representing the charging durations of the cars depending on the different battery levels situations (See Section IV-B).

The parameters used for the different transitions of the model are given in the following Tables VIII, IX and X.

We note that, the parameters of the charging process (Table VIII) are considered the same for each station S_i.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

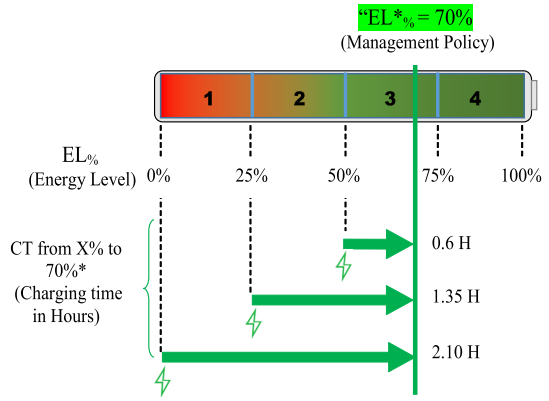


Fig. 10. Charging times from X% Level to EL*% = 70%.

TABLE VIII

PARAMETERS OF THE "CHARGING PROCESS" SUB-NET

Stochastic transitions (Uniform)	TR_i, 1	TR_i, 2	TR_i, 3	-
	[1.35, 2.10] [h]	[0.6, 1.35] [h]	[0, 0.6] [h]	-
Immediate transitions with Random Switch	TV_i, 1	TV_i, 2	TV_i, 3	TV_i, 4
	Prob1 0.05	*Prob2* 0.35	*Prob3* 0.55	*Prob4* 0.05

TABLE IX

PARAMETERS OF THE "CAR STATION" AND "USER" SUB-NETS

STATIONS	Transitions Exponentially Distributed (Average Firing Delay 1/λ [h])					
	TCCi		TUD_i		TUN_i	
	λ_{TCC}	$1/\lambda_{TCC}$	λ_{TUD}	$1/\lambda_{TUD}$	λ_{TUN}	$1/\lambda_{TUN}$
S_1	0.4347	2.30h	0.5000	2.00h	4	0.250h
S_2	0.4651	2.15h	0.4761	2.10h	4	0.250h
S_3	0.4255	2.35h	0.4545	2.20h	4	0.250h
S_4	0.4716	2.12h	0.4000	2.50h	4	0.250h
S_5	0.4545	2.20h	0.4347	2.30h	4	0.250h
S_6	0.4608	2.17h	0.4651	2.15h	4	0.250h
S_7	0.4545	2.20h	0.4255	2.35h	4	0.250h
S_8	0.4629	2.16h	0.4166	2.40h	4	0.205h
S_9	0.4166	2.40h	0.4081	2.45h	4	0.250h
S_{10}	0.4329	2.31h	0.4000	2.50h	4	0.250h
S_{11}	0.4444	2.25h	0.4132	2.42h	4	0.250h
S_{12}	0.4608	2.17h	0.4201	2.38h	4	0.250h
S_{13}	0.4761	2.10h	0.4405	2.27h	4	0.250h

TABLE X

PARAMETERS OF THE "CAR MAINTENANCE/ PARK" SUB-NETS

TCM		TMP_R	
λ_{TCM}	$1/\lambda_{TCM}$	λ_{TMPR}	$1/\lambda_{TMPR}$
1/ 168 h	168 h	1/ 24 h	24 h

B. Simulation of the PN Model

Based on the Timed Stochastic Petri net model developed in Section IV (See Fig. 4), the studied system is modelled and simulated by using the "MOCA-RP" of the "GRIF simulation Tool" (see Fig. 11). The interested readers can refer to:

http://grif-workshop.fr/modules/package-simulation/module-petri/:

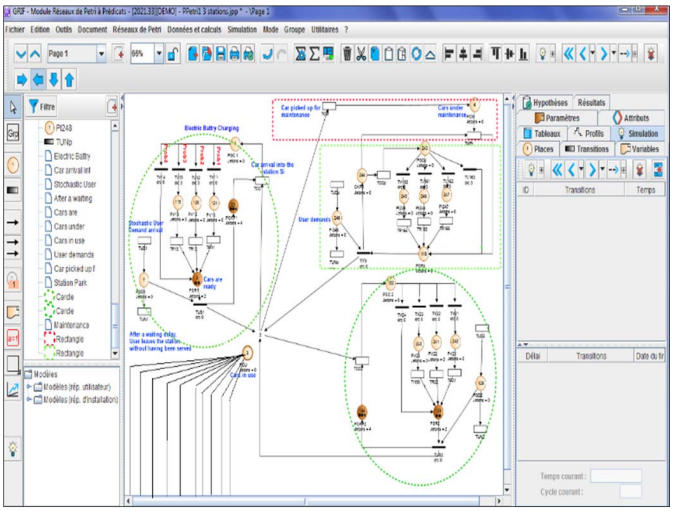


Fig. 11. The PN model of the system with MOCA-RP of the GRIF Tool.

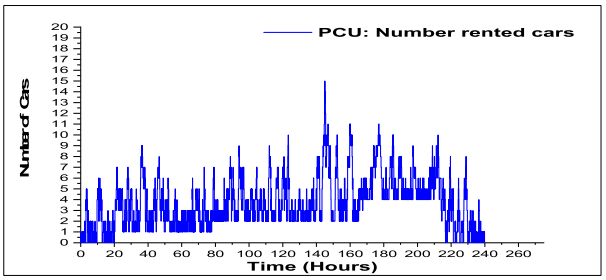


Fig. 12. Stochastic dynamic behavior of rented cars (Marking evolution of the place PCU).

- Used since 1984 by the TOTAL dependability department (France), the MOCA-RP of the GRIF simulation package for simulation and analysis with stochastic Petri nets. The simulation tool is mainly used to deal with complex and stochastic dynamic models and presents the advantage of providing reliable results [46].
- The MOCA-RP presents several useful functions such as "Copy/Paste/Renumber" to assist with the entry the repeated parts of the Petri nets. So, due to the modularity of the developed PN model, it is easy to reproduce the different subnets of the model for large networks, according to its number of stations.

For informational purposes, all the simulations presented in the rest of this application are performed by using a personal PC Pentium (R) Dual-Core CPU with a 3.20 GHz processor and 4 GB RAM. For this application, the average CPU time for a simulation rune is about 200 seconds.

C. Performance Analysis

Thanks to the Petri Net model and its simulation, dynamic behaviors (evolution of the number of cars/ time) of the places including the stations and the city can be observed graphically in Fig. 12, Fig. 13 and Fig. 14. Thus, on the basis of the dynamics of the system simulated for the considered parameters and data; several simulation results are given in the following tables representing the performance evaluation of the system by calculating its different indicators formalized and discussed in section V.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

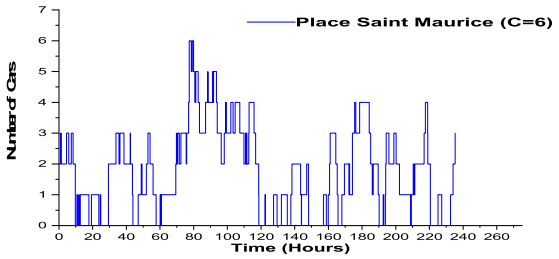


Fig. 13. Stochastic dynamic behavior of the Station St Maurice (Departure and Arrival of cars).

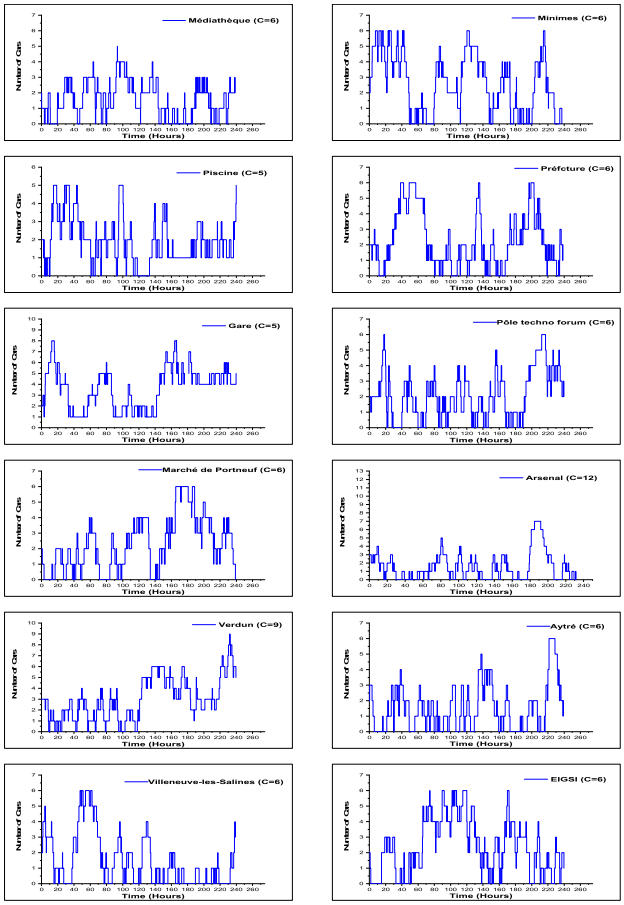


Fig. 14. Stochastic dynamic behavior of all stations S1-S13 (departure and arrival of cars).

TABLE XI

% USER DEMAND SATISFACTION LEVEL

Stations	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}
Demand satisfaction Level (%)	70.65%	78.34%	74.16%	87.49%	84.44%	78.95%	82.88%	84.88%	83.78%	86.11%	83.40%	84.38%	83.81%
Lost Demand Level (%)	29.35%	21.66%	25.84%	12.51%	15.56%	21.05%	17.12%	15.12%	16.22%	13.89%	16.60%	15.62%	16.19%

To ensure a reliable stochastic estimate of the results for a day of service, all the average performance indices have been estimated by using long simulation run (T_{sim} = 1 year) and with 50 independent replications. By using the different equations 1–7, the given results obtained for the chosen parameters and data includes: The user demand satisfaction level (%) is given in Table XI; the average numbers of cars in the stations and their mean sojourn time (see Tables XII); the percentage of empty or full station situations are given in Table XIII; and the average rates of the transitions of the user demand sub-net (see Table XIV). These are among a wealth of indicators that can be obtained for different parameters and/or configurations, for performance evaluation, parametric analysis and/or optimization of such mobility systems.

TABLE XII

AVERAGE MARKING OF STATIONS AND SOJOURN TIME OF CARS

S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	PCU	PCM
Average Marking (Number of cars)	1.4594	1.7537	1.5003	2.3321	2.2652	1.7876	1.9967	2.1300	2.2047	2.4319	2.0153	2.0851	2.0529	1.8804	0.1064
Average Sojourn Time (Hours)	0.8028	0.8841	0.8231	0.9960	0.9506	0.8909	0.9315	0.9586	0.9195	0.9644	0.9309	0.9497	0.9498	0.6854	0.0978

TABLE XIII

% OF TIME OF EMPTY AND FULL STATION

S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_1	S_1	S_1	S_1
Empty station level (%)	11.85%	14.08%	21.94%	61.24%	04.89%	05.38%	70.13%	33.98%	50.28%	06.19%	37.28%	50.44%	10.61%
Full station level (%)	10.88 %	11.03 %	08.12 %	05.12 %	06.72 %	01.95%	00.54%	03.16%	00.00%	01.02%	02.16 %	0.123 %	17.46 %

At this stage, based on the performances obtained according to considered data and parameters in this demonstrative application, we retain the following analysis elements:

First of all, despite a fleet not exceeding 28 electric cars, the general level of user satisfaction related to the different stations varies around 70% to 87% (81.79% on average), which can be considered as an acceptable level (see Table XII). On the other hand, the loss of potential user demands, estimated between 12% to 29% (17.05% on average), is mainly due to the total number of cars available for users, relatively undersized to satisfy even better the user demands.

From another point of view, it is also interesting to analyze the % of times of occurrence of undesirable situations for users which are empty and full station situations. Generally, a full station can be considered as being indicative of congestion and an empty station can be considered as being indicative of starvation.

As shown in Table XIII, the general level of empty stations is relatively significant (29.09% on average). This constitutes another indicator on the origin of the loss of potential demands, mentioned above. Such critical situations are also observable on the stochastic trajectories showing the dynamic evolution of the number of cars in the different stations

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

TABLE XIV
AVERAGE FIRING RATE OF TRANSITIONS (USER SUB-NET)

Station S_i	Average firing rate of transitions [Units/Hour]		
	TCC_i	TUD_i	TUN_i
S_1	0.2932	0.5076	0.2144
S_2	0.3094	0.4831	0.1736
S_3	0.2796	0.4613	0.1816
S_4	0.3034	0.4053	0.1019
S_5	0.3093	0.4407	0.1313
S_6	0.3064	0.4720	0.1696
S_7	0.2984	0.4314	0.1329
S_8	0.3018	0.4224	0.1205
S_9	0.2809	0.4142	0.1285
S_{10}	0.2940	0.4054	0.1113
S_{11}	0.2922	0.4192	0.1269
S12	0.3012	0.4261	0.1249
S_{13}	0.3126	0.4468	0.1342

Fig. 15. Evolution of the user satisfaction (%), depending on the number of deployed cars.

represented in Fig. 13 and Fig. 14. Unlike the case of empty stations, the saturation level (full stations) is low (5.25% on average); a good situation for users when returning their cars. Moreover, by observing the average number of cars available in the stations (2.14 cars on average – see Table XII), this analysis confirms that the main lever for improvement concerns the total size of the fleet.

In practice, generally the basic rule is to have a fleet of 50% of the total capacity of the stations. But, scientifically speaking, the question constitutes a real and complex optimization problem.

D. Parametric Analysis

Now, from the analysis above, we carried out a parametric analysis of the system, allowing the performance evaluation and analysis of the system according to the number of deployed electric cars. The other data and parameters of the system and its associated Petri net model remains unchanged.

The main results represented graphically in Fig. 15, Fig. 16 and Fig. 17. Firstly, the graph in Fig. 15 show the improvement of the satisfaction level by increasing the number of cars deployed in the network. As shown in Fig. 16, in terms of the Petri net model, the firing rate of the transitions TUS_i that model the user satisfaction converges to the firing rate of the transitions TUD_i that model the user demand generation. At the same time, we can observe the fall in the firing rate of the transitions TUN_i that model the loss of the user demands.

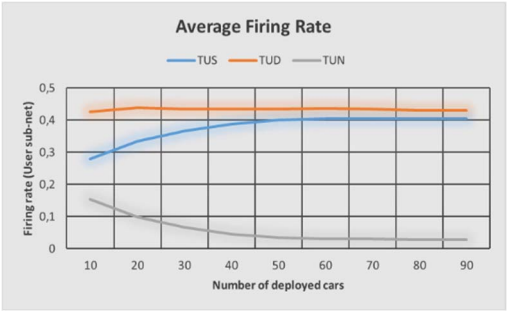


Fig. 16. Evolution of the average firing rate of the transitions (TUS_i, TUD_i, TUD_i), depending on the number of deployed cars.

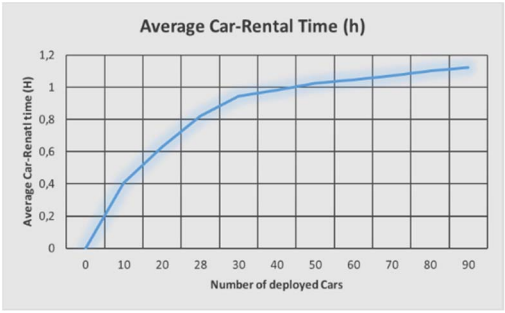


Fig. 17. Evolution of the average car-rental time (mean sojourn time in place PCU), depending on the number of deployed cars.

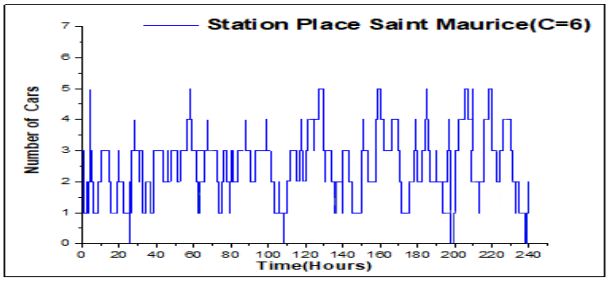


Fig. 18. Stochastic dynamic behavior of the Station St Maurice (Departure and Arrival of cars) – With Static Regulation Static_R(1-50%).

Nevertheless, despite an improvement of the user satisfaction (rental demands represented by the transitions TSU_i), an over-sized number of cars deployed in the network, can adversely affect the proper functioning of the system. Indeed, unlike the use of an under-sized number of cars, which can lead to more frequent empty stations; too many cars deployed can cause frequent saturations of the stations, preventing users from parking their cars after their services. Moreover, as shown in Fig. 17, this is the reason why the average rental time can be impacted (increased), since the saturation of stations can prevent some users from parking cars at their guises after the service.

E. Static Regulation (During Night)

So far, the simulations and analysis presented have been carried out without any regulation of the system. In other words, without the intervention of specialized operators to redistribute the cars between stations that are emptying out and those that are filing up. Now, we demonstrate the possibility to study the system by integrating a car rebalancing strategy allowing the minimization of the time of critical situations (empty and full stations) and consequently the improvement

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

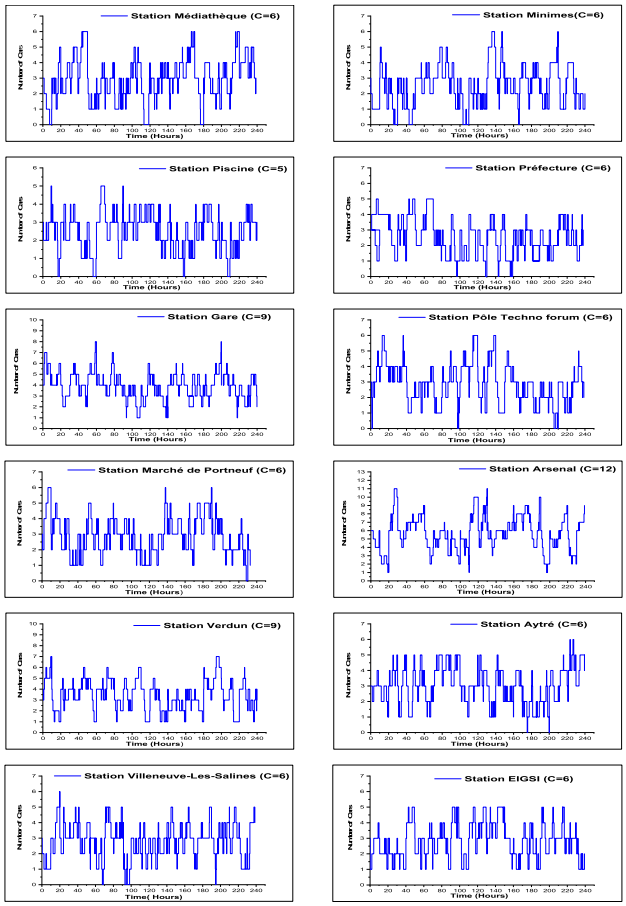


Fig. 19. Stochastic dynamic behavior of all stations S1-S13 (departure and arrival of cars) – With Static Regulation Static_R(1-50%).

of the user satisfaction level. After several simulations carried out with different scenarios in terms of the number of cars to be deployed and the redistribution strategy to be applied, we present one of the best configurations improving remarkably the overall performance of the system.

The configuration presented bellow corresponds to the deployment of 44 cars by applying one static rebalancing of the distribution of the cars between the stations. In terms of the Petri model, the marking of the places representing the stations, is modified to M^* as a better car redistribution to start each next service day. In the simulation process (see Fig. 8), the static rebalancing action is performed during the night, when the service becomes practically negligible.

In this context, Fig. 18 and Fig. 19 show the dynamic behavior of the system where at each 10 hours, the current marking M of the Petri net model is reset to M^* in order to balance the stations around 50% between available and occupied parking places (i.e. $M(S_i) \rightarrow M^*(S_i) = \lfloor \frac{C_i}{2} \rfloor$).

Compared to the case without rebalancing operations, such as in Fig. 13 and Fig. 14, the time of critical situations (empty or full stations) are very negligible as shown in Fig. 18 and Fig. 19 representing the configuration with one static rebalancing operations during night denoted by *Static_R(1-50%)*. It can be observed that the number of cars in all the stations S_i "oscillates" around $\lfloor \frac{C_i}{2} \rfloor$ (where C_i represents the capacity of S_i). Obviously, the dynamic behavior of this part of the system is similar to the one of inventory control systems. Quantitatively speaking, by applying the static regulation, the average service level is estimated to be over 98%, with less than 1.5% of time critical situations.

VII. Conclusion and Discussions

Before our methodological contribution, the first part of this work focused on a bibliographical study of car-sharing systems as one of the solutions that currently spreading in smart and sustainable cities to face many urban mobility challenges. The literature review is carried out covering several aspects including their development, characteristics, generations and more particularly their various structural and operational complexities and associated scientific challenges as emerging research topics. We hope this review can serve to stimulate the research in this area to help designers, planners and managers to ensure acceptable level of quality service and viable economic design. Today, the literature is dominated by operational research models for solving some particular optimization problems as discussed in the first part of the paper. Therefore, researchers using discrete event formalisms (Petri nets; queuing networks; stochastic process theory ...) and optimization with simulation techniques are encouraged to take interest in this emerging topic.

In this context, the main contribution of this paper is about the development of a discrete event dynamic modeling, performance evaluation and simulation methodology of car sharing systems. Based on the modeling and analysis power of Petri nets, the developed model is able to imitate the dynamic behavior of such systems, taking into account their structural and operational parameters and characteristics. As a demonstration of the potential and applicability of the methodology, a real-life application is presented. Besides its capability for performance evaluation and analysis, the developed approach can be exploited in different ways including design and analysis issues for different parameters and/or scenarios in such dynamical systems (i.e. number of stations; number of cars; capacities of stations, user demands, incident rates; etc.). As a first current perspective, optimization via simulation studies, by coupling the Petri net model with optimization techniques with simulation can be developed for best design, configuration and/or operational management, in order to improve the performances of a modelled system.

More generally, this work constitutes a part of a multi-year research project on urban shared mobility networks including bike and car sharing systems. The global project "Shared & Smart Mobility Lab" has been launched since 2010 by Labadi *et al.* [5], [6], [8], [9], [34], in collaboration with many research laboratories on modeling, simulation and optimization of complex dynamical systems. Based on the developed models and methodologies combining discrete event simulation approaches and optimization techniques, the current objective of the research team is to develop a shared mobility software for both researchers, designers and planners working in this field. The tool will be viewed as an "open source" for researchers to be able to implement new algorithms and / or methodologies and as an "executable" software to help designers and planners to design and manage efficiently their networks.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

REFERENCES

[1] A. Carlier, A. Munier-Kordon, and W. Klaudel, "Mathematical model for the study of relocation strategies in one-way carsharing systems," *Transp. Res. Proc.*, vol. 10, pp. 374–383, Jan. 2015.

[2] A. E. Fassi, A. Awasthi, and M. Viviani, "Evaluation of carsharing network's growth strategies through discrete event simulation," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 8, pp. 6692–6705, 2012.

[3] A. Waserhole, "Vehicle sharing systems pricing optimization," Ph.D. thesis, G-SCOP, Univ. Grenoble Alpes, Grenoble, France, 2013.

[4] A. A. Kadri, "Simulation and optimization models for scheduling and balancing the public bicycle-sharing systems," Ph.D. thesis, LCOMS, Univ. Lorraine, Nancy, France, 2015.

[5] A. A. Kadri, I. Kacem, and K. Labadi, "A memetic algorithm for solving the multiple vehicles routing problem in bicycle-sharing systems," in *Proc. 12th FLINS Int. Conf.*, Roubaix, France, Aug. 2016, pp. 764–769, doi: 10.1142/9789813146976_0119.

[6] A. A. Kadri, K. Labadi, and I. Kacem, "An integrated Petri net and genetic algorithm based approach for performance optimization of bicycle sharing systems," *Eur. J. Ind. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 638–663, 2015.

[7] A. Di Febbraro, N. Sacco, and M. Saeednia, "One-way carsharing: Solving the relocation problem," *Transp. Res. Rec., J. Transp. Res. Board*, vol. 2319, no. 1, pp. 113–120, Jan. 2012.

[8] A. A. Kadri, I. Kacem, and K. Labadi, "Lower and upper bounds for scheduling multiple balancing vehicles in bicycle-sharing systems," *Soft Comput.*, vol. 23, no. 14, pp. 5945–5966, Jul. 2019.

[9] A. A. Kadri, I. Kacem, and K. Labadi, "A branch-and-bound algorithm for solving the static rebalancing problem in bicycle-sharing systems," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 95, pp. 41–52, May 2016.

[10] B. Boyaci, K. G. Zografos, and N. Geroliminis, "An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 240, no. 3, pp. 718–733, 2015.

[11] C. Machado, N. de Salles Hue, F. Berssaneti, and J. Quintanilha, "An overview of shared mobility," *Sustainability*, vol. 10, no. 12, p. 4342, Nov. 2018.

[12] D. Jorge and G. H. Correia, "Carsharing systems demand estimation and defined operations: A literature review," *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 201–220, 2013.

[13] D. Zhao, X. Li, and J. Cui, "A simulation-based optimization model for infrastructure planning for electric autonomous vehicle sharing," *Comput.-Aided Civil Infrastruct. Eng.*, vol. 36, no. 7, pp. 858–876, Jul. 2021.

[14] D. K. George and C. H. Xia, "Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 211, no. 1, pp. 198–207, 2011.

[15] A. DiFebbraro, D. Giglio, and N. Sacco, "Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 224–237, Dec. 2004.

[16] E. M. Cepolina and A. Farina, "Urban car sharing: An overview of relocation strategies," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 128, pp. 419–431, May 2012.

[17] F. Basile, P. Chiacchio, and D. Teta, "A hybrid model for real time simulation of urban traffic," *Control Eng. Pract.*, vol. 20, no. 2, pp. 123–137, Feb. 2012.

[18] F. Basile, P. Chiacchio, and E. Di Marino, "An auction-based approach to control automated warehouses using smart vehicles," *Control Eng. Pract.*, vol. 90, pp. 285–300, Sep. 2019.

[19] F. Basile, P. Chiacchio, and J. Coppola, "A hybrid model of complex automated warehouse systems—Part I: Modeling and simulation," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 640–653, Oct. 2012.

[20] F. Ferrero, G. Perboli, M. Rosano, and A. Vesco, "Car-sharing services: An annotated review," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 37, pp. 501–518, Feb. 2018.

[21] F. Ferrero, G. Perboli, A. Vesco, S. Musso, and A. Pacifici. (2015). *'Car-Sharing Services'—Part B Business and Service Models*. [Online]. Available: https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2015-48.pdf

[22] G. Ciardo, R. German, and C. Lindemann, "A characterization of the stochastic process underlying a stochastic Petri net," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 20, no. 7, pp. 506–515, Jul. 1994.

[23] G. Laporte, F. Meunier, and R. W. Calvo, "Shared mobility systems," *4OR-Q J. Oper. Res.*, vol. 13, pp. 341–360, Nov. 2015, doi: 10.1007/S10288-015-0301-Z.

[24] G. Laporte, F. Meunier, and R. Wolfler Calvo, "Shared mobility systems: An updated survey," *Ann. Oper. Res.*, vol. 271, no. 1, pp. 105–126, Dec. 2018, doi: 10.1007/S10479-018-3076-8.

[25] G. H. de Almeida Correia and A. P. Antunes, "Optimization approach to depot location and trip selection in one-way carsharing systems," *Transp. Res. E, Logistics Transp. Rev.*, vol. 48, no. 1, pp. 233–247, 2011.

[26] H. Chen, L. Amodeo, F. Chu, and K. Labadi, "Modeling and performance evaluation of supply chains using batch deterministic and stochastic Petri nets," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 132–144, Apr. 2005.

[27] H. Ohta, S. Fujii, Y. Nishimura, and M. Kozuka, "Analysis of the acceptance of carsharing and eco-cars in Japan," *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 7, no. 6, pp. 449–467, Nov. 2013.

[28] H. Si, J.-G. Shi, G. Wu, J. Chen, and X. Zhao, "Mapping the bike sharing research published from 2010 to 2018: A scientometric review," *J. Cleaner Prod.*, vol. 213, pp. 415–427, Mar. 2019.

[29] I. Antunes, L. K. Carvalho, and J. C. Basilio, "A stochastic Petri net model for simulation-based performance analysis of public bicycle sharing systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng. (CASE)*, Aug. 2016, pp. 433–439.

[30] J. Lee and G. L. Park, "Demand forecast for electric vehicle sharing systems using movement history archive," in *Computer Applications for Modeling, Simulation, and Automobile*, vol. 341, T. Kim, C. Ramos, J. Abawajy, B. H. Kang, D. Ślęzak, and H. Adeli, Eds. Berlin, Germany: Springer, 2012.

[31] J. Lee and G. L. Park, "Design of a team-based relocation scheme in electric vehicle sharing systems," in *Computational Science and Its Applications—ICCSA*, vol. 7973, B. Murgante, Ed. Berlin, Germany: Springer, 2013.

[32] J. Lee, H. Kim, and G. Park, "Relocation action planning in electric vehicle sharing systems," in *Multi-Disciplinary Trends in Artificial Intelligence*, vol. 7694, C. Sombattheera, N. K. Loi, R. Wankar, and T. Quan, Eds. Heidelberg, Germany: Springer, 2012, pp. 47–56.

[33] K. Labadi, H. Chen, and L. Amodeo, "Modeling and performance evaluation of inventory systems using batch deterministic and stochastic Petri nets," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., C, Appl. Rev.*, vol. 37, no. 6, pp. 1287–1302, Nov. 2007.

[34] K. Labadi, T. Benarbia, J.-P. Barbot, S. Hamaci, and A. Omari, "Stochastic Petri net modeling, simulation and analysis of public bicycle sharing systems," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 1380–1395, Oct. 2015.

[35] K. M. Ng, M. B. I. Reaz, and M. A. M. Ali, "A review on the applications of Petri nets in modeling, analysis, and control of urban traffic," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 858–870, Jun. 2013.

[36] L. Li and M. E. H. Petering, "Discrete event simulation analysis of a reservation-based, one-way car-sharing system," *J. Simul.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–22, Jan. 2018.

[37] M. Barth and M. Todd, "Simulation model performance analysis of a multiple station shared vehicle system," *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 237–259, Aug. 1999.

[38] M. Clemente, M. P. Fanti, A. M. Mangini, and W. Ukovich, "The vehicle relocation problem in car sharing systems: Modeling and simulation in a Petri net framework," in *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency* (Lecture Notes in Computer Science), vol. 7927, J. M. Colom and J. Desel, Eds. Berlin, Germany: Springer, 2013.

[39] M. Dotoli and M. P. Fanti, "An urban traffic network model via coloured timed Petri nets," *Control Eng. Pract.*, vol. 14, no. 10, pp. 1213–1229, Oct. 2006.

[40] M. Nourinejad and M. Roorda, "A dynamic carsharing decision support system," *Transp. Res. E, Logistics Transp. Rev.*, vol. 66, pp. 36–50, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.tre.2014.03.003.

[41] M. Nourinejad, S. Zhu, S. Bahrami, and M. J. Roorda, "Vehicle relocation and staff rebalancing in one-way carsharing systems," *Transp. Res. E, Logistics Transp. Rev.*, vol. 81, pp. 98–113, Sep. 2015.

[42] M. A. Marsan and G. Chiola, "On Petri nets with deterministic and exponentially distributed firing times," in *Advances in Petri Nets* (Lecture Notes in Computer Science), vol. 266. New York, NY, USA: Springer, 1987, pp. 132–145.

[43] M. A. Marsan, G. Balbo, A. Bobbio, G. Chiola, G. Conte, and A. Cumani, "The effect of execution policies on the semantics and analysis of stochastic Petri nets," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 15, no. 7, pp. 832–846, Jul. 1989.

[44] M. A. Marsan, G. Conte, and G. Balbo, "A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems," *ACM Trans. Comput. Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 93–122, May 1984.

[45] M. P. Fanti, A. M. Mangini, G. Pedroncelli, and W. Ukovich, "A Petri net model for fleet sizing of electric car sharing systems," in *Proc. 13th Int. Workshop Discrete Event Syst. (WODES)*, May 2016, pp. 51–56.

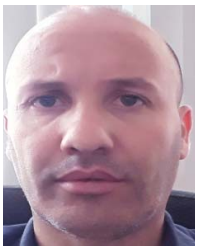
Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

[46] M. Estecahandy, "Méthodes accélérées de Monte-Carlo pour la simulation d'événements rares. Applications aux réseaux de Petri," Ph.D. thesis, Univ. Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France, Apr. 2016.
[47] P. Briest and C. Raupach, "The car sharing problem," in *Proc. 23rd ACM Symp. Parallelism Algorithms Archit. (SPAA)*, 2011, pp. 167–176.
[48] R. Bouyekhf, A. Abbas-Turki, O. Grunder, and A. E. Moudni, "Modelling, performance evaluation and planning of public transport systems using generalized stochastic Petri nets," *Transp. Rev.*, vol. 23, no. 1, pp. 51–69, Jan. 2003.
[49] R. Mounce and J. D. Nelson, "On the potential for one-way electric vehicle car-sharing in future mobility systems," *Transp. Res. A, Policy Pract.*, vol. 120, pp. 17–30, Feb. 2019.
[50] R. Nair and E. Miller-Hooks, "Fleet management for vehicle sharing operations," *Transp. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 524–540, 2011.
[51] R. Zurawski and M. Zhou, "Petri nets and industrial applications: A tutorial," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 41, no. 6, pp. 567–583, Dec. 1994.
[52] S. Illgen and M. Höck, "Establishing car sharing services in rural areas: A simulation-based fleet operations analysis," *Transportation*, vol. 47, no. 2, pp. 811–826, Apr. 2020.
[53] S. L. Smith, M. Pavone, M. Schwager, E. Frazzoli, and D. Rus, "Rebalancing the rebalancers: Optimally routing vehicles and drivers in mobility-on-demand systems," in *Proc. Amer. Control Conf.*, Washington, DC, USA, Jun. 2013, pp. 2362–2367.
[54] S. Schmöller and K. Bogenberger, "Analyzing external factors on the spatial and temporal demand of car sharing systems," *Proc.-Social Behav. Sci.*, vol. 111, no. 5, pp. 8–17, Feb. 2014.
[55] S. Shaheen, A. Cohen, and M. Jaffee, "Innovative mobility: Carsharing outlook," UC Berkeley, Transp. Sustainability Res. Center, 2018. [Online]. Available: https://escholarship.org/uc/item/49j961wb, doi: 10.7922/G2CC0XVW.
[56] S. Illgen and M. Höck, "Electric vehicles in car sharing networks—Challenges and simulation model analysis," *Transp. Res. D, Transp. Environ.*, vol. 63, pp. 377–387, Aug. 2018.
[57] S. A. Shaheen and A. P. Cohen, "Carsharing and personal vehicle services: Worldwide market developments and emerging trends," *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 7, no. 1, pp. 5–34, Jan. 2013.
[58] T. Benarbia, "Contribution à la modélisation et à l'analyse de performances des systèmes de vélos en libre-service en vue de leur régulation: Une approche basée sur les réseaux de Pétri," Ph.D. thesis, Univ. Cergy-Pontoise, Cergy, France, 2013.
[59] T. Benarbia, K. Labadi, M. Darcherif, and M. Chayet, "Modelling and control of self-service public bicycle systems by using Petri nets," *Int. J. Model., Identificat. Control*, vol. 17, no. 3, pp. 173–194, 2012.
[60] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989.
[61] V. P. Kumar and M. Bierlaire, "Optimizing locations for a vehicle sharing system," in *Proc. Swiss Transp. Res. Conf.*, Ascona, Switzerland, Apr. 2012, pp. 1–30.
[62] Z. MengChu and D. Frank, *Petri Net Synthesis for Discrete Control of Manufacturing Systems*. New York, NY, USA: Academic, 1993.

Ali Hamroun received the M.Sc. degree in electronic and photovoltaic materials and devices from the Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou (UMMTO), Algeria, in 2015, where he is currently pursuing the Ph.D. degree in electrical engineering, in collaboration with the ECAM-EPMI, Cergy-Pontoise, France. In addition to his Ph.D. thesis, under the supervision of Prof. Karim Labadi and Mourad Lazri, he also works as an Electronic Laboratory Engineer at the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science. As a member of the LAMPA Laboratory, his main research interests include modeling, optimization, and performance control of stochastic discrete event systems by using Petri nets.

Karim Labadi received the M.Sc. (DEA) degree in applied automation and computer sciences from the Ecole Centrale de Nantes in 2002, the Ph.D. degree in industrial engineering and optimization from the University of Technology of Troyes in 2005, the Habilitation to Supervise Research (HDR) degree from the University of Cergy-Pontoise in 2018, and the Qualification for Full Professor Degree in computer engineering, automation and signal processing, France. He is currently a member of the Quartz Laboratory (EA 7393). At the ECAM-EPMI, he worked as the Head of the Production Laboratory (2013–2016) and the Head of the Research and Development (2010–2021). He works as the Head of Engineering Training, including industry, logistics, and energy specialties. He has published over 100 papers in journals, books, and conferences related to modeling, control, and performance optimization of production, logistic and urban mobility systems. He won two best paper awards at the ECEC 2015 (Lisbon, Portugal) and at the ICISA 2022 (Pune, India).



Mourad Lazri received the Magister and Ph.D. degrees in electronics from the Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou, Algeria, in 2006 and 2013, respectively. He was promoted to a Full Professor since 2020, and he is currently a Teacher-Researcher at the Faculty of Electrical and Computer Engineering, Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou, and a member of the Laboratory of Analysis and Modeling of Random Phenomena (LAMPA). His main research activities focus on artificial intelligence and real-life applications for behavior analysis and/or prediction of complex random phenomena related to several fields, including stochastic systems, image processing, and meteorological phenomena.

Jean-Pierre Barbot (Senior Member, IEEE) graduated from the Ecole Normale Supérieure de Cachan. He received the Ph.D. degree in control system theory from the University of Paris XI, France, in 1989, and the H.D.R. degree (Accreditation to supervise research) in 1997. He is currently a Professor at the École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications (ENSEA) and a member of the Quartz Laboratory EA 7393. He is actually in secondment at the LS2N-UMR 6004-CNRS, Ecole Centrale Nantes. His main application domains are electrical machine, power converter, and mechatronic. He is the author of more than 100 articles, books and book chapters, and 200 conference papers. His main research activities deal with sliding mode control and observation. Recently, he starts research on the utility of compressive sensing in control system theory and vice versa.

Authorized licensed use limited to: Consortium - Algeria (CERIST). Downloaded on July 15,2022 at 20:58:00 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.