

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie électrique et génie informatique  
&  
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE TROYES

# Modèles et protocoles pour les interactions des véhicules électriques mobiles avec la grille

Thèse en cotutelle

Ph.D en Génie Électrique et Génie Informatique  
&  
Doctorat en Informatique, Réseaux, Connaissances,  
Organisations (RACOR)

Dhaou SAID

Jury:

Soumaya CHERKAOUI (directrice)  
Lyes KHOUKHI (directeur)  
Dominique GAITI (examinatrice)  
Ahmed KHOUMSI (Rapporteur)  
Samuel PIERRE (examineur)  
Ahmed SERHROUCHNI (Rapporteur)

# RÉSUMÉ

Dans de prochaines années, les véhicules électriques (VEs) vont faire leur apparition massive sur les marchés. Cela peut avoir un impact important sur le fonctionnement des réseaux d'électricité actuels qui devront ajuster leur fonctionnement à la nouvelle demande massive d'électricité provenant des VEs. Par contre, les VEs peuvent aussi être vus comme une nouvelle opportunité dans le futur marché d'électricité. En effet, une décharge/recharge intelligente peut permettre aux VEs d'être un support de stockage d'électricité important, valable, et permanent dont la capacité croît en fonction du nombre des VEs.

Ce projet a comme objectifs de : (1) proposer un schéma d'interaction V2G (Vehicle-to-Grid) intégrant des techniques permettant de : (a) adapter le fonctionnement de la grille aux contraintes temporelles et spatiales relatives au processus de recharge des VEs dans un milieu résidentiel. On cherchera à satisfaire de différentes demandes en puissance des VEs branchés au secteur sans trop stresser la grille intelligente, (b) optimiser les opérations de chargement/déchargement entre les VEs et la grille dans les deux sens. (2) Proposer de nouveaux schémas de communication sans fil, entre les VEs et la grille intelligente loin des bornes de recharge, qui soient basés sur les standards de communications véhiculaires (VANETs) ainsi que sur d'autres standards de communication à grande échelle. On introduira des techniques d'accès à la grille intelligente pour négocier le coût de recharge/décharge des batteries, le temps d'attente du service, les emplacements et aussi pour planifier la motivation du consommateur afin de favoriser la stabilité de la grille.

**Mots-clés :** Smart grid, temps de chargement de VE, prix de chargement, gestion de la demande, réponse à la demande VANET, IEEE802.11p.

# REMERCIEMENT

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **Ahmed KHOUMSI**, Professeur titulaire à l'Université de Sherbrooke et **Ahmed SERHROUCHNI**, Professeur à l'École Supérieure des télécommunications de Paris (ENST) pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Je tiens également à remercier Monsieur **Samuel PIERRE**, Professeur titulaire à l'École Polytechnique de Montréal et Madame **Dominique GAITI**, Professeure à l'Université des Technologies de Troyes (UTT) de m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury de thèse.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse qui m'ont proposé le sujet de thèse et qui m'ont encadré tout au long de ces trois années d'étude en doctorat. Je les remercie pour m'avoir permis de relever le défi de la cotutelle de thèse entre l'Université de Sherbrooke, au Canada et l'Université de Technologie de Troyes (UTT), en France.

Plus particulièrement, je remercie Madame **Soumaya CHERKAOUI**, Professeure à l'Université de Sherbrooke, au Canada et directrice du laboratoire INTERLAB, pour les longues discussions menées avec elle pour une compréhension plus approfondie des divers aspects du sujet. Je salue sa patience, sa disponibilité et la confiance qu'elle m'a accordée. Je la remercie également de m'avoir donné l'opportunité d'assister aux conférences internationales.

Je remercie également Monsieur **Lyes KHOUKHI**, mon directeur de recherche à l'UTT, pour l'aide portée à tous mes soucis d'installation à l'UTT et pour m'avoir accueilli pendant mes séjours en France dans l'unité de recherche « Environnement et Réseaux Autonomes (ERA) ». Je salue fortement aussi la souplesse et l'ouverture de son esprit lors de nos discussions qui ont su me laisser une large marge de liberté pour mener à bien ce travail de recherche.

Je souhaite également remercier le personnel de l'Université de Sherbrooke et celui de l'Université de Technologie de Troyes (UTT) pour leurs accueils chaleureux et pour les efforts qu'ils m'ont réalisés afin que j'achève mon travail dans les meilleures conditions possibles.

Enfin, je tiens à remercier individuellement tous les membres de laboratoire INTERLAB et tous les étudiants qui y ont séjourné pour leur sympathie et leur accueil.

Je voudrais ajouter mes remerciements à toute ma famille, mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs, et à mes amis, pour m'avoir toujours encouragée et s'être inquiétés du bon déroulement de mes études.

# DEDICACES



Ce travail est dédié :  
À ma très chère mère  
SASSIA  
et à mon très cher père  
MOHAMED  
qui n'ont cessé de me combler  
par leur amour et leur tendresse et pour leur soutien moral, et pour tous les  
sentiments  
d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts.  
À tous les membres de ma famille :  
mes frères : Faouzi et Karim  
et  
mes sœurs : Raoudha, Laila, Najoua et Thouraya,  
A tous mes amis sans aucune exception.  
Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur



# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENT.....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICACES.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES TABLES .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES ACRONYMES .....</b>	<b>XII</b>
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Problématique .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Objectifs : .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Solutions proposées .....</b>	<b>15</b>
<b>1.4 Contributions .....</b>	<b>17</b>
<b>1.5 Plan de la thèse.....</b>	<b>20</b>
<b>CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 La grille intelligente .....</b>	<b>22</b>
2.2.1 Compteurs intelligents.....	23
2.2.2 Réseaux de communications.....	24
2.2.3 Systèmes de tarification.....	25
2.2.4 Stratégies de gestion de charge .....	25
<b>2.3 Véhicule électrique.....</b>	<b>28</b>
2.3.1 Éléments d'interaction des VEs avec la grille intelligente .....	30
2.3.2 Interaction entre les VEs et la grille intelligente (V2G).....	32
<b>2.4 Fonctions essentielles de la grille intelligente .....</b>	<b>36</b>
2.4.1 Infrastructure de mesurage avancé .....	36
2.4.2 Réponse à la demande .....	38
2.4.3 Services réseaux et technologies complémentaires.....	39
2.4.4 Surveillance du réseau .....	39
2.4.5 Automatisation du réseau.....	40
<b>2.5 Conclusion .....</b>	<b>41</b>

**CHAPITRE 3 INTERACTION DES VES AVEC LA GRILLE DANS UN MILIEU RESIDENTIEL 42**

**3.1 Ordonnement du processus de recharge des VEs dans un milieu résidentiel 42**

- 3.1.1 Résumé .....42
- 3.1.2 Abstract.....42
- 3.1.3 Introduction.....43
- 3.1.4 Related Work .....44
- 3.1.5 Scheduling Process.....45
- 3.1.6 Power Load Scheduling.....48
- 3.1.7 Simulations .....49
- 3.1.8 Conclusions.....54

**3.2 Gestion de la charge .....55**

- 3.2.1 Résumé .....55
- 3.2.2 Abstract.....55
- 3.2.3 Introduction.....56
- 3.2.4 Related work .....57
- 3.2.5 EV charging and discharging formulation.....59
- 3.2.6 Complexity analysis .....64
- 3.2.7 Illustrative results .....65
- 3.2.8 Conclusion .....69

**3.3 Conclusion .....71**

**CHAPITRE 4 INTERACTION DES VES AVEC LA GRILLE DANS UN MILIEU PUBLIC 74**

**4.1 Résumé.....74**

**4.2 Abstract .....74**

**4.3 Introduction.....75**

**4.4 Related work .....77**

**4.5 M/M/s model of one EV public supply station .....78**

**4.6 Queuing networks model for multi-EVs charging stations.....82**

**4.7 Multi-server-priority queues .....83**

- 4.7.1 Priority queuing strategy.....85
- 4.7.2 TOUP price model use.....85
- 4.7.3 Mobility model.....86

**4.8 Cut-off-discipline for M/M/S queue.....87**

**4.9 Fairness and complexity analysis.....95**

**4.10 Performance evaluation .....95**

<b>CHAPITRE 5 .....</b>	<b>106</b>
<b>CHANNEL ACCESS MODEL FOR EV CHARGING SERVICE .....</b>	<b>106</b>
<b>5.1 Résumé.....</b>	<b>106</b>
<b>5.2 Abstract .....</b>	<b>106</b>
<b>5.3 Introduction.....</b>	<b>107</b>
<b>5.4 Overview of VANET and LTE .....</b>	<b>108</b>
<b>5.5 Communication protocol system EV / RSU .....</b>	<b>110</b>
5.5.1 Downlink EV charge scheduling Frame format (from RSU to OBU) .....	112
5.5.2 Uplink EV charge scheduling frame format (from OBU to RSU).....	112
<b>5.6 Channel access model for EV charging service.....</b>	<b>114</b>
<b>5.7 Simulations Results .....</b>	<b>122</b>
<b>5.8 Conclusion .....</b>	<b>126</b>
<b>CHAPITRE 6 .....</b>	<b>128</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>128</b>
<b>6.1 Conclusions.....</b>	<b>128</b>
<b>6.2 Limites .....</b>	<b>129</b>
<b>6.3 Perspectives .....</b>	<b>130</b>
<b>ANNEXE – STANDARDS ET CARACTERISTIQUES LIEES AU VE .....</b>	<b>131</b>
<b>LISTE DES RÉFÉRENCES.....</b>	<b>135</b>
<b>LISTE DES PUBLICATIONS .....</b>	<b>142</b>



# LISTE DES FIGURES

Figure 2. 1- Modèle des interactions dans la grille intelligente .....	23
Figure 2. 2- Réduction de pic, décalage de crête, et remplissage de la vallée .....	26
Figure 3. 1- Schematic view of information flow patterns between the Smart Grid and EVs when considering our charging algorithm.....	50
Figure 3. 2- Random distribution of connected EVs in the night period (First scenario)....	51
Figure 3. 3- Random distribution of connected EVs in the night period (Second scenario) .....	51
Figure 3. 4- Average power consumption comparison between our algorithm and the unscheduled case (simulation for 50 EV).....	52
Figure 3. 5- Average power consumption comparison between our algorithm and the unscheduled case (simulation for 100EV).....	53
Figure 3. 6- Peak average power consumption comparison between our algorithm and unscheduled algorithm (simulation for 50 EV) .....	54
Figure 3. 7- Peak average power consumption comparison between our algorithm and unscheduled algorithm (simulation for 100 EV) .....	54
Figure 3. 8- EV charging and discharging model.....	60
Figure 3. 9 - High priority EV states at each time step.....	64
Figure 3. 10- Low priority EV states at each time step .....	64
Figure 3. 11- Schematic view of information flow patterns between the smart grid and EVs by considering our LM technique for EV loads Algorithm II .....	65
Figure 3. 12- The optimal schedules for EVs charging and discharging process .....	68
Figure 3. 13- Random distribution of EVs in charging and discharging process.....	70
Figure 3. 14- Home EVs Consumption patterns (100 EVs).....	71
Figure 3. 15- Peak average home EVs Consumption patterns (100 EVs) .....	72
Figure 3. 16- Random distribution of EVs in charging process .....	73
Figure 3. 17- Home EVs Consumption patterns (1000 EVs).....	73
Figure 3. 18- Peak average home EVs Consumption patterns (1000 EVs) .....	73
Figure 4. 1- Schematic view of our EV charging model for one EVPSS .....	78
Figure 4. 2- The state transition diagram .....	79
Figure 4. 3- The multi M/M/S queue model .....	84
Figure 4. 4- Schematic view of information exchange between the smart grid and EVs when considering the B-A EVPSS algorithm.....	85
Figure 4. 5- Markov chain illustration of the case of two priority classes (H,L) in multi servers for one EVPSS .....	86
Figure 4. 6- Our realistic mobility model.....	88
Figure 4. 7- Schematic view of our cut-off priority EV charging model for one EVPSS ....	88
Figure 4. 8- Cut-off priority threshold for any EVPSS.....	89
Figure 4. 9- The state transition diagram for one EVPSS.....	90
Figure 4. 10- The multi-server cut-off priority queues model .....	96
Figure 4. 11- Schematic view of information flow patterns between the smart grid and EVs and EVPSS by considering the advanced BA-EVPSS algorithm.....	97
Figure 4. 12- Initial EV State of Charge (One simulation for 1000 EVs) .....	98

Figure 4. 13- Average queuing length variation.....	98
Figure 4. 14- Arrivals /departures flow (simulation for 1000 EV).....	99
Figure 4. 15- Waiting time in each EVPSS versus plug-in socket number for one example simulation .....	100
Figure 4. 16- Average Waiting time comparison between BA-EVPSS algorithm and R-EVPSS .....	101
Figure 4. 17- The time to plug-in diagram for any EV .....	102
Figure 4. 18- Selected EVPSS for each arrival EV .....	102
Figure 4. 19- The time to plug-in under SMART and STUPID cases for 100 arrival EVs .....	103
Figure 4. 20- The time to plug-in under SMART and STUPID case for arrival EVs (500EVs).....	104
Figure 5. 1- DSRC Frequency Spectrum and channel allocation.....	109
Figure 5. 2- System overview.....	110
Figure 5. 3- Interaction V2I between EVs and RSU .....	111
Figure 5. 4- Downlink EV charge scheduling service data frame format.....	112
Figure 5. 5- Uplink EV charge scheduling service data frame format .....	113
Figure 5. 6- IEEE802.11a data frame format .....	114
Figure 5. 7- Exchange data diagram between RSU and EV .....	114
Figure 5. 8- Interaction model between RSU and EV .....	115
Figure 5. 9- Back-off counter Markov chain model .....	117
Figure 5. 10- Probability to have successful connection .....	123
Figure 5. 11- Probability of collision.....	124
Figure 5. 12- The probability that exactly one EV accesses the channel, conditioned on the fact that at least one EV had access .....	124
Figure 5. 13- The normalized system throughput.....	125
Figure 5. 14- The normalized system throughput maximum value.....	125
Figure 5. 15- Percentage of successful EV connection for EV charging service in dense scenarios (100 EVs) .....	126
Figure A. 1- Les standards IEC 61851-1 [76].....	131
Figure A. 2- Les concepts de chargement compatible aux standards IEC [76] .....	131

# LISTE DES TABLES

Table 2. 1-Types de réseaux dans la grille intelligente.....	24
Table 2. 2-Les normes standards du système de chargement des VEs.....	32
Table 2. 3-Fonctions essentielles de la grille intelligente .....	41
Table 3. 1- Comparison of peak electricity with unscheduled case .....	53
Table 3. 2- Notation for our EV charging discharging model.....	60
Table 3. 3- Simulation condition .....	67
Table 3. 4- Comparison of home PEV consumption with LM case (100 EVs, TOUP model) .....	70
Table 3. 5-Comparison of home PEV consumption with LM case (1000 EVs, TOUP model).....	71
Table 4. 1- The estimated time periods for all EVs to joint any EVPSS .....	87
Table 4. 2- Notation for our cut-off priority queuing model.....	90
Table 4. 3- Time to plug-in comparison between STUPID and SMART cases .....	103
Table 5. 1- Mobile technologies data rate ranges comparaison .....	109
Table 5. 2- Downlink EV charge scheduling service frame description .....	112
Table 5. 3- Uplink EV Status data frame description .....	113
Table 5. 4- Notation for our model.....	116
Table 5. 5- Simulation parameters.....	122
Table 5. 6- Percentage of success EV connection for EV charging service comparison between Standard IEEE802.11p and Adaptive CW.....	125
Table A. 1-Liste de normes utilisées pour le mesurage de l'électricité en Amérique du Nord [77].....	132

## LISTE DES ACRONYMES

<b>Acronyme</b>	<b>Définition</b>
AMI	Advanced Metering Infrastructure
BEV	Battery Electrical Vehicle
CCH	Control Channel
CPP	Critical Peak Pricing
CI	Compteur Intelligent
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoid
CW	Contention Window
DLC	Direct Load Control
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DSB	Demand Side Bidding
DSM	Demand Side Management
EVAMI	Electric Vehicle Advanced Metering Infrastructure
EVPSS	Electric Vehicle Public Supply Station
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
GI	Grille Intelligente
HAN	Home Area Network
HLC	High Level Communication
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INST	Institut National des Standards et de la Technologie
ISO	International Organization for Standardization
LC	Load Control
LM	Load Management
LLC	Low Level Communication
LTE	Long Term Evolution
MDE	Maitrise de la Demande d'Énergie
OBU	On Board Unit
PEV	Plug-in Electrical Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electrical Vehicle
PLC	Power Line Communications
RTP	Real Time Pricing
RSU	Road Side Unit
SAE	Society of Automotive Engineers
SCH	Service Channel
TOUP	Time-Of-Use Pricing
VE	Véhicule Electrique
VH	Véhicule hybride
VHR	Véhicule hybride rechargeable
V2G	Vehicle-to-Grid
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
VANET	Vehicular Ad Hoc Network
WiFi	Wireless Fidelity

---

# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Depuis des années, le pétrole est en train de se raréfier alors que sa demande croît. La lutte contre les changements climatiques accélérés (tels que le réchauffement et la pollution atmosphérique) est devenue, au fil des ans, une des grandes priorités des gouvernements des pays développés comme les Etats-Unis, Canada, UE, Japon etc..., tant du point de vue environnemental qu'économique. Plusieurs enjeux sont à traiter dans cette lutte ; nous pouvons citer par exemple la mobilité, l'aménagement et l'intégration urbaine, l'innovation technologique, ainsi que des enjeux de gouvernance et de développement économique.

Une des solutions candidates pour ces problèmes, est de réduire la dépendance aux hydrocarbures et de valoriser l'hydroélectricité, une source propre et renouvelable. Au cours de ces dernières années, un des projets pilotes qui a vu le jour dans le monde et surtout en Amérique de nord est l'électrification des transports publics et individuels, exprimée par les VEs et leurs interfaçages avec la grille des sources d'électricité. Ce qui réduit la dépendance en pétrole et diminue la pollution.

En parallèle de cela, le domaine des communications véhiculaires a eu depuis quelques années, une évolution technologique importante pour répondre aux exigences de confort et de sécurité. Ce domaine est devenu de plus en plus important par l'ensemble des services qu'il permet. L'apparition massive des véhicules électriques nécessitera l'installation de services de recharge électrique. En effet, les VEs auront besoin de nouvelles infrastructures adaptées à leurs autonomies limitées pour leurs déploiements selon les situations de stationnement, d'utilisation et leurs chargements en puissance. Ils auront de fort impact sur les réseaux d'électricité en générale par l'énorme puissance qu'ils demandent pour se recharger. Il est donc important de concevoir de nouveaux protocoles et modèles pour l'interaction entre les véhicules électriques et le smart grid.

Dans ce contexte on parle de la grille intelligente ou « smart grid » dont le rôle est d'assurer une gestion efficace de la puissance électrique. L'Institut National des Standards et de la Technologie (INST) a fixé plusieurs fonctionnalités prioritaires liées à la grille comme le compteur d'électricité intelligent (CI), la réponse à la demande, les VEs et la gestion des ressources énergétiques distribuées. Un autre objectif à souligner est celui qui focalise la modernisation des infrastructures du réseau électrique et des technologies connexes pour fournir également une grande efficacité dans l'utilisation de l'électricité bidirectionnelle, fiable de bout en bout et des communications avec un court temps de latence. Afin de fournir une

gestion optimale du processus de recharge des VEs, il est important de maintenir une utilisation équilibrée de l'infrastructure de recharge tout en réduisant le temps de latence avec la grille. Dans ce contexte, il se situe mon projet de recherche en doctorat, qui s'intitule « modèles et protocoles pour les interactions des véhicules électriques mobiles avec la grille ».

## 1.1 Problématique

La problématique principale de cette thèse se focalise sur la pénétration massive des VEs sur le marché ainsi que leurs interactions avec la grille intelligente. En effet, les VEs peuvent avoir de fort impact sur la grille intelligente par la puissance demandée pour leur rechargement sous des contraintes d'espace et de temps liées aux infrastructures actuelles des réseaux électriques. Par contre, ces VEs peuvent aussi être considérés comme étant un support de stockage permanent dont la capacité est croissante en fonction du nombre des VEs. L'interaction actuelle entre les VEs et la grille ne débute qu'après la phase de branchement au secteur d'électricité, d'où le manque d'une infrastructure d'interaction permanente loin des bornes de recharge entre les VEs et la grille. L'idée de départ était basée sur la recherche et la conception de nouveaux modèles d'interaction permanente entre les VEs et la grille pour profiter le maximum possible de cette pénétration massive des VEs. D'une part, ces modèles doivent permettre d'équilibrer la demande de charge qui peut varier en pic durant le jour et la nuit suivant les saisons ; et d'autre part, ces modèles doivent répondre aux différentes demandes possible de recharge des VEs avec une satisfaction acceptable et voir même plus fine de point de vue temps et prix de recharge. Ce type d'interaction est tout nouveau et il n'y a pas jusqu'au présent, dans la littérature actuelle, de proposition semblable. En plus, vue le développement actuel de l'industrie des automobiles de point de vue confort et sécurité (routière), les véhicules intelligents qui sont équipés de technologies de communication telle que les VANETs, peuvent être en harmonie avec les modèles d'interaction permanente et désirés entre VE et grille, d'où l'idée toute nouvelle de concevoir et proposer un nouveau service de recharge des VEs qui peut être diffusé périodiquement et d'une façon permanente vers les VEs sans contrainte d'espace (à la résidence, dans les autoroutes, dans les villes) et de temps ( le jour, la nuit) .

De ce fait, notre vision pour gérer cette pénétration des VEs est toute nouvelle. En effet, de nouvelles infrastructures matérielles telles que des bornes de recharge résidentielles ou des stations de recharge publiques et immatérielles telles que des algorithmes et des protocoles adaptés aux fonctionnalités de la grille seront nécessaires.

Le but principal recherché dans cette thèse est d'assurer la satisfaction de différentes demandes en puissance des VEs branchés au secteur sans trop stresser la grille intelligente.

## 1.2 Objectifs :

Ce projet de recherche a comme objectifs de : (1) proposer un schéma d'interaction V2G intégrant des techniques permettant de : (a) adapter le fonctionnement de la grille aux contraintes temporelles et spatiales relatives au processus de recharge des VEs dans un milieu résidentiel. On cherchera à satisfaire différentes demandes en puissance des VEs branchés au secteur sans trop stresser la grille intelligente, (b) optimiser les opérations de chargement/déchargement entre les VEs et la grille dans les deux sens. (2) Proposer de nouveaux schémas de communication sans fil, entre les VEs et la grille intelligente loin des bornes de recharge, qui soient basés sur les standards de communications véhiculaires (VANETs) ainsi que sur d'autres standards de communication à grande échelle.

## 1.3 Solutions proposées

Le premier palier de ce projet de recherche se propose d'étudier le processus de chargement des véhicules électriques suivant les standards existants de la grille intelligente. Les caractéristiques intrinsèques des équipements matériels (compteurs intelligents, bornes de recharge, technologies de batteries récentes) ou immatériels (protocoles et standards de communication) qui forment la grille intelligente, constituent la base de cette étude. nous avons introduit de nouveaux schémas d'interactions VEs/grille intelligentes suivant des protocoles et des algorithmes d'ordonnancement. Ces schémas modélisent l'ordonnancement de chargement et le transfert des données numériques entre la grille et les VEs lorsque ces derniers sont branchés aux réseaux électriques via des bornes de recharge/décharge aux lieux résidentiels.

Le second palier de ce projet de recherche est une extension du premier palier. On s'est intéressé à la proposition et l'implémentation de techniques d'interaction des VEs avec la grille, basées sur des standards de communications sans fils avant leur branchement au secteur électrique. En effet, on a essayé de concevoir des protocoles d'ordonnancement et de communication pour optimiser le processus de chargement des VEs dans des lieux publics tout en améliorant le niveau de stabilité de la grille.

Ce projet de recherche propose des architectures de communication améliorées prenant en compte les contraintes temporelles et de fiabilité exprimées sous forme de niveau de satisfaction des clients sans stresser la grille.

Dans ce projet, on suppose les hypothèses suivantes :

1. Pour résoudre le problème des interactions entre VE/grille intelligente et l'optimisation du processus de recharge électrique :
  - L'intervalle de planification de recharge est limité (par exemple, 12 heures de durée, pendant la nuit).
  - Un prix maximal est fixé et accepté par chaque véhicule au cours de la période de recharge. Chaque véhicule peut accepter un prix maximum différent.
  - Une tarification varie au cours du temps pendant l'intervalle de planification de recharge.
  - La charge initiale avant le branchement pour la recharge de chaque VE, notée état de la charge (SoC), est aléatoire et peut varier entre 0% et 99%.
  - Le temps d'arrivée de chacun des N véhicules au niveau de leurs bornes de recharge est également aléatoire.
  - Chaque véhicule nécessite une valeur de charge minimale à la fin du processus de recharge. Cette valeur minimale peut être différente d'un VE à un autre.
  - Lieu de recharge est à la maison.

Sur la base de ces hypothèses et contraintes, on se propose de développer :

- (1) Un protocole d'ordonnancement avancé de recharge des véhicules électriques avec un prix variable (TOUP) dans une résidence pendant la nuit.
  - (2) Un protocole de d'ordonnancement avancé de recharge des VEs dans une résidence avec une stratégie de gestion de la charge pendant la nuit.
2. Pour la communication sans fil entre les VEs et la grille intelligente loin des bornes de recharge on suppose:
    - Un nombre fini de stations de recharge publiques dans la ville,
    - Chaque VE est équipé d'une interface de communication DSRC (Dedicated Short Range Communication),
    - Des infrastructures RSU (Road-Side unit), situées aux entrées principales de la ville ou aux sorties des autoroutes, sont équipées de deux interface de communication : une IEEE802.11p et une autre au moyen de communication de grande échelle (LTE (Long Term Evolution)),
    - Une architecture réseaux de communication pour la grille intelligente est composée de 3 niveaux : centre de gestion et contrôle, centre inter-régional et centre régional.



## 1.4 Contributions

Dans cette thèse de doctorat, les contributions sont regroupées en deux grandes parties. La première partie se focalise sur : 1) les interactions entre les VEs et la grille intelligente, et 2) l'optimisation du processus de recharge électrique des VEs dans une résidence. Cette partie est subdivisée en deux (2) sous parties, d'abord on essaye de chercher des approches pour gérer le processus de recharge des VEs durant la nuit, ensuite on cherche à maintenir la stabilité de grille électrique avec des techniques d'optimisation du processus de recharge. On considère l'ordonnancement dynamique de recharge pour les véhicules électriques comme un processus de communication réseau. La communication par courants porteurs en ligne (en anglais est dite 'Power line Communication PLC') est le support de transmission utilisé pour communiquer les fonctionnalités désirées. On propose un schéma d'ordonnancement optimal pour la recharge des VEs à la maison avec des prix variables, pendant la période de la nuit, lorsque le nombre des VEs branchés au secteur électrique est susceptible d'être élevé. On considère un problème d'ordonnancement et de planification de la recharge des VEs en puissance électrique en minimisant la consommation totale d'énergie. Ce processus de planification de recharge des VEs doit fonctionner sous un ensemble de contraintes qui correspondent à des situations réelles de chargement des VEs (débit de chargement, capacité maximale des batteries, temps de chargement, bornes de recharge de type 1 etc.).

La deuxième sous partie est une extension de la première sous partie. Elle traite les interactions entre les VEs et la grille intelligente avec satisfaction des contraintes liées aux VEs et à la stabilité de la grille. En effet, on propose une technique de gestion de la charge pour permettre le contrôle des coûts de l'énergie au fil du temps et d'ajuster la charge des VEs à domicile. On s'intéresse à la grande variation de la consommation d'énergie qui a un impact majeur sur le profil de la charge à domicile des VEs en même temps que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Pour résoudre ce problème, une technique de gestion de la charge devra être adoptée pour profiter de la variation des coûts d'énergie et d'améliorer la stabilisation du réseau. Pour notre étude, l'ajustement du profile de la charge à domicile des VEs peut être fait suivant plusieurs stratégies, par exemple avec la réduction de pics de charge. L'objectif est d'aplatir la courbe de consommation autant que possible pour ne pas effectuer l'optimisation des coûts de recharge des VEs seulement mais aussi pour améliorer la stabilité du réseau.

L'idée principale est basée sur l'exploitation de l'information décrivant le niveau de priorité de recharge, pour chaque VE, qui est communiqué à la grille intelligente au début de

branchement de VE au secteur électrique. En effet, si un VE a une priorité faible, alors la grille peut le solliciter à vendre sa charge stockée.

Pour se faire, et en plus des hypothèses déjà décrites dans la première partie, on émet :

- Le modèle de tarification adopté est la tarification fixe (TOUP). Ceci est parce qu'il est le plus utilisé actuellement par les sociétés de distribution d'électricité.
- Chaque VE envoie son niveau de priorité à la grille intelligente au début de son branchement.
- La technique de réduction de pics de charge est prise en compte.
- L'application de la technique de gestion ne doit pas influencer l'état final de chargement de chaque VE.

La deuxième partie traite des communications sans fils entre les VEs et la grille intelligente loin des bornes de recharge. En effet, on s'intéresse au cas où les VEs sont mobiles sur la route et voudraient se brancher à des bornes de recharges. Ce cas de figure met en place la possibilité pour la grille d'interagir avec les VEs de manière à mieux planifier leur déploiement à travers les bornes de recharge et aussi à mieux satisfaire leurs demandes en charge tout en gérant sa stabilité. Ce cas de figure est différent de celui où les VEs sont déjà branchés et la grille doit réagir à leurs demandes de chargement. Dans cette partie, on s'intéresse à proposer d'une part de nouveaux schémas de communication sans fil entre les VEs et la grille loin des bornes de recharge et d'autre part on propose des techniques d'ordonnancement de recharge des VEs dans des stations de recharge publiques. Cette partie est subdivisée en deux sous parties. La première sous partie se focalise sur l'ordonnancement du processus de recharge des VEs dans des stations de recharge publiques. Dans cette sous partie, on propose une approche qui permet d'équilibrer la charge entre les bornes de recharge dans une station publique de recharge des VEs tout en minimisant le temps de charge pour chaque VE.

On propose un modèle où les VEs, depuis qu'ils sont encore en route, communiquent au préalable leurs profils de charge initiales à la grille intelligente. Ce modèle qui permet de traiter des demandes de recharge des VEs dans une station de charge publique, est basé sur la théorie des chaînes de Markov et les files d'attente. Un algorithme est conçu pour diriger les VEs aux stations de recharge de manière à minimiser le temps d'attente pour achever le chargement.

Dans cette partie, on émet les hypothèses suivantes :

- Les VE, depuis qu'ils sont encore en route, communiquent leurs profils de charges initiales à la grille intelligente pour connaître la station de recharge publique adéquate.
- Toutes les stations de recharge publiques sont équipées par des bornes de recharge identiques de type 3.
- On considère l'équité pour le chargement des VE à base de la politique du premier arrivé, premier servi.
- Le temps qu'un VE a besoin pour se déplacer physiquement vers une station de recharge publique n'est pas considéré dans ce travail.

La deuxième sous partie se focalise sur l'échange d'information en temps réel entre la grille intelligente et les VE. De nouveaux schémas de communication sans fil entre les VE et la grille intelligente loin des bornes de recharge sont proposés. En effet, les communications VANETs présentent un énorme potentiel qui permet diverses applications associées à la sécurité routière, à l'efficacité du trafic et à d'autres applications de confort et de services. La communication entre les VE et la grille peut être vue comme étant un nouveau service important qui peut être intégré aux systèmes de transport intelligent. On peut profiter de la technologie DSRC implémentée dans le domaine des communications véhiculaires. Un nouveau modèle d'accès au canal pour négocier un service de recharge des VE à travers les réseaux de communications véhiculaires (VANETs) est proposé. On présente un protocole d'interaction entre la grille intelligente et des VE avec sa voie montante et celle descendante ainsi que les formats de trames correspondantes. Un modèle d'accès probabiliste au canal, pour des VE en besoin de recharge, qui est basé sur les chaînes de Markov, est conçu pour analyser la diffusion multi-hop de demande de service de recharge par les VE via le réseau VANET. Un algorithme est conçu pour sélectionner la fenêtre de contention (FC) afin de promouvoir la connexion rapide pour les VE ayant une haute priorité au service de recharge. Pour se faire, et en plus des hypothèses déjà décrites, on émet :

- Toutes les unités RSU sont équipées de deux interfaces de communication VANET et LTE.
- Ces deux technologies de communication (VANETs et LTE) sont capables d'assurer la connectivité entre véhicules électriques, la grille intelligente et toutes les stations de recharge électriques.
- Tous les véhicules sont supposés être équipés d'un dispositif GPS.
- Les VE se déplacent le long de la route dans un seul sens unidirectionnel.

- Le RSU envoie périodiquement des messages de balise pour annoncer le service de recharge des VEs.

## 1.5 Plan de la thèse

Ce rapport de doctorat est constitué de six chapitres. Le premier chapitre introduit le contexte et les principaux objectifs de ce projet. Le deuxième chapitre est destiné à l'étude bibliographique sur l'échange d'information et de puissance entre la grille intelligente et les véhicules électriques ainsi que sur les standards en termes d'infrastructures matérielles et immatérielles de recharge des VEs. L'ensemble des contributions réalisées tout au long du projet de recherche en doctorat sont regroupées dans les chapitres 3, 4 et 5. En effet, le troisième chapitre introduit de nouveaux schémas d'interaction des véhicules électriques avec la grille dans les maisons dans le but d'optimiser le processus de recharge et de décharge des VEs dans des conditions de stabilité de la grille. Ces schémas intègrent des techniques permettant d'adapter le fonctionnement de la grille aux contraintes temporelles et spatiales relatives au processus de recharge des VEs dans un milieu résidentiel.

Le quatrième chapitre présente de nouveaux modèles d'interactions des VEs avec la grille dans des milieux publics. Le but principal est d'équilibrer la charge entre les bornes de recharge dans une station publique de recharge des VEs tout en minimisant le temps de charge pour chaque VE. Ces modèles qui permettent de traiter des demandes de recharge des VEs dans une station de charge publique, sont basés sur la théorie des chaînes de Markov et les files d'attente.

Le cinquième chapitre présente de nouveaux schémas et modèles de communication sans fil, entre les VEs et la grille intelligente loin des bornes de recharge, qui soient basés sur les standards de communications véhiculaires (VANET) ainsi que sur d'autres standards de communication à grande échelle telle que la technologie cellulaire de quatrième génération de communication (LTE). Des techniques d'accès à la grille intelligente pour négocier le coût de recharge/décharge des batteries, le temps d'attente du service, les emplacements et aussi pour planifier la motivation du consommateur afin de favoriser la stabilité de la grille, sont introduites.

Enfin, le sixième chapitre présente une conclusion générale. D'autres spécificités sont présentées en annexe, suivies des références bibliographiques.

# CHAPITRE 2      ÉTAT DE L'ART

Actuellement, pour faire face aux problèmes d'exigence climatique et aux demandes de consommation d'électricité, on parle de la grille intelligente (en anglais smart grid) qui est un ensemble de réseaux intelligents de distribution d'énergie, flexibles et efficaces. La grille intelligente est devenue, aujourd'hui, une nécessité pour répondre aux demandes croissantes en puissance notamment avec l'arrivée proche des VEs.

La grille intelligente permet aussi d'optimiser la puissance délivrée à chaque utilisateur, d'optimiser le coût de consommation d'électricité et d'assurer son bon fonctionnement ainsi que sa stabilité. Elle permet d'offrir des services client importants comme la tarification et le contrôle de la consommation d'énergie.

## 2.1 Introduction

Le présent chapitre traite l'état de l'art des interactions entre la grille intelligente et les VEs. Il présente une étude sur les techniques de gestion de la puissance dans les réseaux électriques ainsi que les protocoles de transfert d'informations entre la grille et les VEs. Cette étude met l'accent sur l'aspect matériel et immatériel utilisé pour satisfaire les demandes en puissance sans avoir stresser la grille intelligente. Ce chapitre se compose de trois (3) parties principales ; la première partie introduit la grille intelligente de point de vue infrastructure ainsi que les problèmes liés à son bon fonctionnement. La deuxième partie présente les VEs avec leurs infrastructures de recharge ainsi que les problèmes liés à leurs interactions avec la grille intelligente. La troisième partie détaillera les principales fonctionnalités de la grille intelligente tout en mettant l'accent sur les fonctions qui sont prises en compte pour le chargement et le déchargement des VEs.

## 2.2 La grille intelligente

La production d'électricité est faite à partir de plusieurs sources d'énergie primaires comme le charbon, le gaz ou l'uranium dans de grandes centrales, et l'éolienne, le biogaz, les photovoltaïques dans de petites centrales décentralisées [1,2]. Cette production est devenue l'objet d'un intérêt stratégique important pour plusieurs pays dans le monde au vu de plusieurs enjeux tournant autour de l'émission polluante, de la sécurité et de la croissance de la demande en énergie. Dans ce contexte on parle aujourd'hui de réseaux électriques évolués vers l'automatisation et l'intelligence. Pour aller plus dans cette thématique, il est important de comprendre c'est quoi un réseau électrique intelligent.

Traditionnellement, on distingue deux types de réseaux essentiels pour l'exploitation et la livraison de l'énergie électrique : le réseau de transport et celui de distribution. Pour limiter les pertes électriques par effet Joule dans le réseau de transport, l'électricité est transportée sous haute tension. Le réseau de distribution d'électricité fournis aux clients de l'électricité sous forme de moyenne et basse tension. Ce dernier comprend aussi une partie très importante qui gère la liaison entre les fournisseurs et les consommateurs d'électricité. Cette partie est le réseau des gestionnaires de distribution qui s'occupe des relevés des compteurs dans les habitations et les zones industrielles et qui assure la maintenance, la stabilité et l'évolution technique du réseau.

Dans cette thèse, on considère que les notions de smart grid/réseau intelligent/grille intelligente sont équivalents et concerne le système amont et aval du compteur électrique (CI).

*Définition* : La grille intelligente relie intelligemment plusieurs sources d'énergie électrique (énergie éolien, nucléaire, solaire, hydroélectricité etc...) ensemble avec le consommateur. Les lignes de puissances assurent la transmission d'énergie et la communication (en anglais : Power Line Communication PLC). La figure 2.1 illustre les éléments intervenant dans la grille intelligente.

La grille intelligente regroupe une infrastructure **matérielle**, comme les compteurs intelligents, les dispositifs de réseau, les dispositifs de stockage de l'énergie et les appareils électriques intelligents, ainsi qu'une infrastructure **immatérielle**, comme les normes d'interopérabilité [3], les protocoles de gestion des demandes de charge ainsi que les algorithmes de cyber sécurité et de communication (la PLC, Zig Bee, WiFi, IEEE 802.11h avec un spectre de 1,8 Ghz).

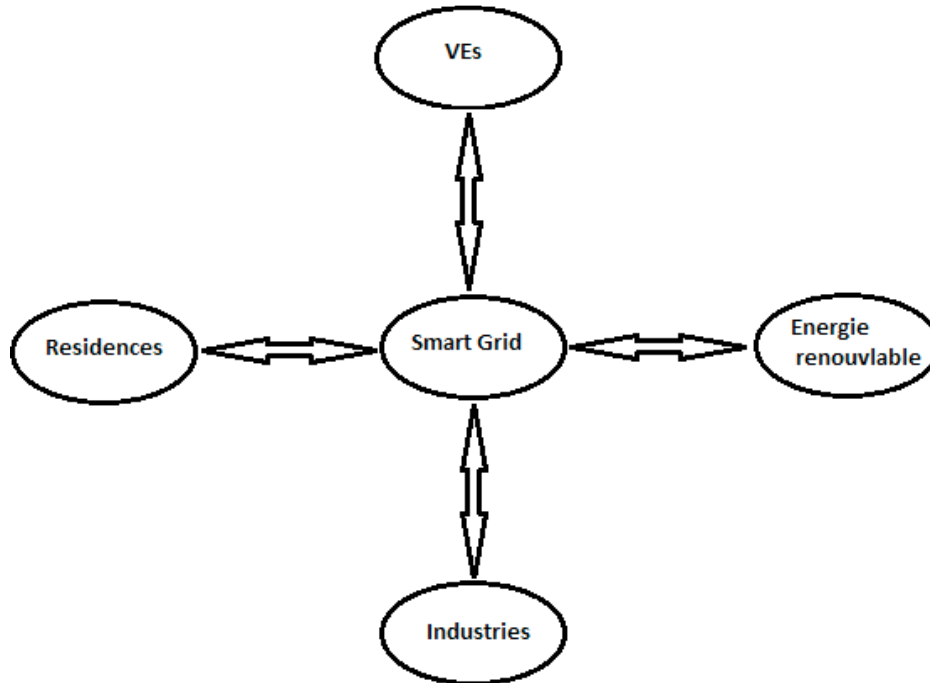


Figure 2. 1- Modèle des interactions dans la grille intelligente

Une description de l'état de l'art des aspects d'infrastructures techniques liées aux compteurs intelligents ainsi qu'aux réseaux de CIs et des aspects stratégiques liés à la gestion d'énergie, sont jugés nécessaire pour comprendre les intérêts de la grille intelligente.

Dans la suite de cette première partie, on s'intéresse principalement au compteur intelligent qui est l'élément clé dans la grille et responsable de la gestion de la consommation d'énergie. On présentera par la suite une autre partie, qui traite le système de tarification, qui est jugée intéressante pour comprendre l'aspect d'optimisation de la consommation et de son coût. On terminera ce chapitre par un état de l'art sur la maîtrise de la demande et les protocoles de gestion d'énergie.

### 2.2.1 Compteurs intelligents

Les compteurs ont été conçus pour mesurer la consommation et établir la tarification correspondante par la suite. Des études détaillées des réseaux électriques ont montré qu'il y avait une diversité pointue de la consommation telle qu'elle est faible pour des périodes et forte pour d'autres. D'où l'idée d'intégrer la gestion de la consommation au compteur tout en exploitant les progrès technologiques réalisés dans le domaine de l'informatique et des télécommunications. En plus de la raison économique, des compteurs intelligents ont été aussi conçus pour la gestion technique des réseaux électriques, la maîtrise de la consommation et l'optimisation de son coût.

En générale, le compteur est composé d'un contacteur général permettant l'enclenchement ou le déclenchement de l'électricité pour le client consommateur d'énergie [3,4,5], d'un système de mesure de la puissance consommée (en monophasé ou triphasé), d'un dispositif pour limiter la puissance maximale admissible et de plusieurs ports de communication, dont un d'eux est unidirectionnel, à usage domestique qui sert notamment à la connexion d'un affichage optionnel. Un autre port de communication, bidirectionnel, à usage du gestionnaire du compteur et c'est par ce port que le gestionnaire du réseau de distribution envoie les commandes au compteur et en récupère les données utiles.

### 2.2.2 Réseaux de communications

Le système de compteur intelligent en générale, est constitué de plusieurs composants qui coopèrent entre eux pour assurer la fonction de comptage intelligent et de transfert de données à la grille pour les utiliser afin de gérer les demandes d'énergie. En tant que composant communicant et bidirectionnel, il mesure la consommation d'énergie de différents appareils électriques et assure l'échange d'information. Différents types de réseaux sont distingués dans ce domaine [6] :

*Réseau domestique* : (en anglais : Home Area Network HAN) : c'est un réseau de communication local dans la maison. Il est formé par les appareils électriques résidentiels et supporte plusieurs applications distribuées comme le CI, la gestion d'énergie etc...

*Réseau de voisinage* : c'est un réseau reliant plusieurs réseaux locaux domestiques. Il collecte les données et les achemine vers un serveur appelé concentrateur de données.

*Réseau étendu* : c'est un réseau de transport qui délivre les données de mesures aux centres de contrôle.

Le tableau 2.1 résume les différents types de réseaux rencontrés dans la thématique du système de compteurs intelligents ainsi que leurs caractéristiques.

**Table 2. 1-Types de réseaux dans la grille intelligente[6]**

Type de réseau	Porté	Débit exigé	Technologies
<i>Réseau domestique</i>	Dizaines mètres	Débit binaire réduit	ZigBee, Wi-Fi, Ethernet, PLC
<i>Réseau de voisinage</i>	Centaines mètres	Selon la densité des nœuds du réseau 2Kbps	ZigBee, Wi-Fi, Ethernet, PLC
<i>Réseau étendu</i>	Dizaines de kilomètres	Quelques Mbps ou Gbps	Microwave, WiMax, 3G/LTE, Fibre optique, Ethernet,



### 2.2.3 Systèmes de tarification

Le système de tarification actuel, qui modélise la variation du prix d'électricité, tient en compte des demandes de chargement reçues et de la capacité de la grille pour leurs répondre. Il fait partie, entre autre, des stratégies adoptées par la grille pour assurer sa stabilité.

Parmi les types de tarification qui existent, on cite le prix variable selon le temps d'utilisation (en anglais : Time of Use TOU) ; en effet, le fournisseur d'électricité définit le prix de un kWh par tranche horaire de manière statique, sur des périodes de l'ordre du mois, similairement au bi-horaire existant actuellement. Ce type de prix est basé sur la prédiction de ses valeurs en se basant sur le niveau de consommation des années passées. Le TOU n'est pas limité à deux plages seulement, mais permet de mettre en place un système multi-horaire. Le TOU Dynamique suit le même concept avec une modification plus fréquente des prix et/ou des plages horaires.

Une autre politique de tarification dynamique qui varie selon les pics de puissance (en anglais : Critical Peak Pricing CPP) : elle permet aux fournisseurs d'actualiser les prix au jour le jour de façon à répercuter les conditions fluctuantes du marché et des effets climatiques sur le consommateur [2].

Le Demand Side Bidding (DSB) est un autre système de tarification qui permet aux consommateurs d'agir directement sur le marché en définissant avec le réseau de distribution ou le fournisseur de sa consommation, la fonction du prix [6].

Finalement, la tarification à variation en temps réel (en anglais : Real Time Pricing RTP) est dite à contrôle directe de la charge (en anglais : Direct Load Control DLC)[2] et se caractérise par un contrôle de prix de chargement très fréquent, ce que nécessite des temps de réaction très courts.

### 2.2.4 Stratégies de gestion de charge

La Maitrise de la Demande d'Énergie (MDE, en anglais Demand Side Management DSM) est l'un des problèmes le plus importants, dans notre planète et surtout dans les pays développés. La MDE touche aussi bien à l'économie et à l'environnement, qu'à la justice sociale. Il existe bien un potentiel d'économie important de la demande d'électricité ou d'énergie en général : dans la transformation et le transport d'énergie, dans l'efficacité énergétique des appareils et dans l'apprentissage des ménages à des comportements moins énergivores etc...

La stabilité de la grille, en présence de plusieurs sources d'énergie vis-à-vis de la satisfaction des demandes de charge des clients, représente le but principalement recherché.

L'infrastructure de comptage avancé (en anglais : Advanced Metering Infrastructure AMI), la gestion de la demande, la gestion de la charge ((en anglais : Load Management (LM)), et le contrôle de charge (en anglais : Load Control (LC)) sont actuellement des domaines de recherche intéressants. Dans un futur proche, il est prévu que ces technologies permettront aux opérateurs de réseaux électriques et des utilitaires de répondre à leur demande de puissance en temps réel en indiquant le coût de l'énergie instantané. Des dispositifs de détection seront utilisés pour communiquer le signal de l'information de commande «intelligent» afin de réagir à des événements de charges critiques par le biais de dispositif de commande directe.

Dans un système de grille intelligente, les stratégies de gestion de la charge traitent les signaux de retour provenant des capteurs et envoient des signaux de commande pour ajuster la forme du profil de charge en réponse à des événements de charge spécifiques. Les trois types de stratégies de gestion de charge rencontrés dans la littérature sont : la réduction de pics, le décalage de crête et les stratégies de remplissage de la vallée [7]. Les stratégies de réduction de pics de charge tentent à minimiser les effets de pics de charge en fermant toutes les charges de faible priorité. Les stratégies de décalage de crête tentent de déplacer des charges en dehors des heures de pointe, et les stratégies de remplissage de la vallée tentent de planifier les charges de faible priorité pendant les heures creuses lorsque le coût d'énergie est relativement faible. Ces diverses stratégies de gestion de charge peuvent être un processus potentiellement long et coûteux. Pour se faire, il est nécessaire d'acheter et de déployer de nombreux capteurs intelligents et des dispositifs de contrôle de charge pour les consommateurs et d'opter pour la gestion centralisée ou décentralisée suivant des zones géographiques, climatiques et temporelles précises.

La figure 2.2 ci-dessous illustre ces concepts:

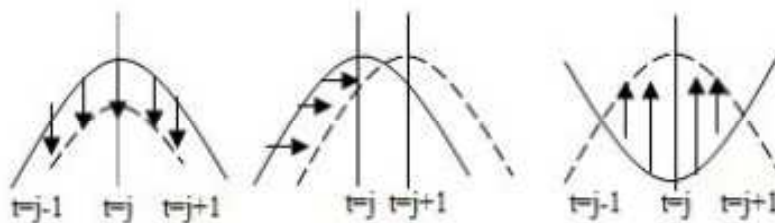


Figure 2. 2- Réduction de pic, décalage de crête, et remplissage de la vallée

Les lignes continues représentent le profil de la charge courante, les lignes en pointillés représentent le profil de charge ajustée en raison de la charge gérée, les flèches indiquent la façon dont les courbes sont ajustées par la stratégie de gestion de la charge respective.

Plusieurs études récentes se sont concentrées sur la MDE vue sous forme d'interaction entre la grille intelligente et le consommateur d'énergie. En effet, le papier [8] propose un algorithme optimal distribué au sens de la tarification d'électricité en temps réel avec deux voies de communication entre les compteurs intelligents (en anglais : two-way communication), pour la gestion de la demande. Cette technique est basée sur la maximisation d'une fonction d'utilité, ce qui permet de minimiser le coût de consommation d'énergie tout en respectant les conditions de la stabilité de la grille.

Parmi les problèmes importants dans la thématique de l'interaction entre la grille d'électricité et les appareils électriques (domestiques, électroménagers, etc..), on cite l'optimisation du coût de consommation d'énergie que ce soit par la minimisation du prix d'électricité ou du temps d'attente pour entrer en fonctionnement. Dans ce contexte, l'article [9] propose une idée dite optimale pour gérer la consommation d'énergie dans une résidence. Cette technique est basée sur la coordination et l'ordonnancement de l'énergie à consommer par chaque utilisateur tout en tenant compte de la variation du prix d'électricité et le besoin individuel d'énergie pour chaque appareil. Le modèle de prix utilisé pour ce protocole de gestion de consommation, est celui en temps réel (en anglais : Real Time Pricing RTP). Le problème d'ordonnancement est formulé mathématiquement sous forme d'une optimisation à plusieurs variables décrivant l'énergie pour chaque appareil à chaque instant durant 24 heures. Cette technique vise à atteindre un compromis entre minimiser le prix à payer et minimiser le temps d'attente pour consommer l'énergie.

L'article [10] traite les stratégies de contrôle basées sur les algorithmes d'ordonnancement distribués pour la grille intelligente. La réponse à la demande fait l'objet de cet article. L'auteur propose un algorithme de tarification dynamique et incitatif pour les consommateurs pour adapter le profil de la demande en charge global aux exigences du bon fonctionnement et de stabilité de la grille. Cet algorithme se base sur les degrés de partage des informations entre différents éléments mises en jeu dans la grille (les CIs).

L'article [11] aborde le problème de la gestion des pics de charge (en anglais : load-shaving) dans les maisons intelligentes pour l'amélioration de la rentabilité, la sûreté et l'efficacité énergétique dans les réseaux intelligents. Une architecture évolutive, flexible et intégrable

avec d'autres algorithmes de contrôle pour les systèmes de gestion d'énergie à domicile est introduite avec un algorithme d'ordonnancement pour les périodes de pics de demande.

L'un des objectifs de la grille intelligente est de permettre aux consommateurs résidentiels d'optimiser leurs consommations en électricité et de connaître le profil de leur énergie demandé. Pour atteindre cet objectif, plusieurs politiques de tarification dynamique doivent être communiquées en temps réel. L'article [12] propose un algorithme d'optimisation d'énergie sous la contrainte de satisfaire les clients. Cette optimisation est basée sur la théorie de programmation linéaire mixte.

## 2.3 Véhicule électrique

Les Véhicules électriques représentent un changement radical et important aussi bien dans le secteur des transports par comparaison avec les véhicules thermiques que celui de la production de la puissance électrique. En effet, un VE est alimenté par l'électricité, ce qui peut être produit à partir de nombreuses sources d'énergie telles que l'hydro-électricité, nucléaire, éolienne, photovoltaïque etc. Sur le plan énergétique, pour fonctionner, un VE demande une puissance énorme comparable à la puissance nécessaire pour une maison (éclairage, électroménager chauffage etc.). Par contre, les VEs peuvent être considérés comme étant un support de stockage d'électricité pour la grille. En effet, les batteries des VEs peuvent emmagasiner de la puissance électrique qui peut être utilisé pendant les périodes de pics de demande pour stabiliser le réseau électrique. Cependant, le but principal est de combler le besoin des clients (VEs) en électricité sous contrainte de ne pas déstabiliser la grille.

Pour l'intégration des VEs à la grille intelligente, il est important de prendre en compte l'état instantané des réseaux de distribution de l'énergie. En effet, cela va conditionner fortement les possibilités d'installer une infrastructure efficace comme des bornes de rechargement. Plusieurs types de rechargement sont possibles, soient des rechargements de courtes durées (stations de services publiques, parking), soient des rechargements plus lents (à la maison). L'augmentation du nombre de VEs va influencer sur la courbe de charge, et par conséquence sur la production d'électricité. Ainsi, il est nécessaire d'installer une infrastructure communicante et intelligente avec les VEs afin d'améliorer leur rentabilité.

En parallèle de cela, il est important de prendre en considération les fonctionnalités offertes par la grille intelligente en termes de gestion de la puissance électrique, d'optimisation de la consommation d'énergie et d'échange d'informations entre la grille et tout autre appareil

électrique suivant différentes politiques du prix, lors de l'étude de l'interaction de la grille avec les VEs.

Dans tout ce qui suit, on va présenter les caractéristiques des VEs, en suite l'infrastructure de recharge, puis les standards de communication VE/grille, et enfin on présentera les recherches bibliographiques liées aux VEs.

Dans la littérature [13, 14, 15, 16], plusieurs types de VEs sont rencontrés :

**Le Véhicule électrique (VE)** est un véhicule qui dispose d'une chaîne de traction électrique, c'est-à-dire d'un système consistant en un ou plusieurs dispositifs de stockage de l'énergie électrique (une batterie, un volant d'inertie électromécanique ou un super-condensateur, par exemple), un ou plusieurs dispositifs de conditionnement de l'énergie électrique et une ou plusieurs machines électriques conçues pour transformer l'énergie électrique stockée en énergie mécanique qui est transmise aux roues pour faire avancer le véhicule. C'est ce qu'on appelle un véhicule « tout électrique », ou un véhicule électrique pur (en anglais BEV, pour « Battery Electric Vehicle »). Les dispositifs de stockage doivent être régulièrement rechargés, soit en raccordant le véhicule lui-même à un réseau de distribution d'électricité, soit à l'aide de moyens de production décentralisés, soit en opérant un échange standard des batteries.

**Le Véhicule hybride (VH)** est un véhicule dont la propulsion mécanique est assurée par l'énergie provenant de deux sources embarquées comme un carburant consommable (identique à celui des véhicules thermiques) ; et un dispositif de stockage d'énergie, par exemple une batterie, un condensateur, un volant/générateur, etc.

La réglementation internationale retient la définition: « Véhicule doté de deux moteurs, thermique et électrique, fonctionnant ensemble ou séparément » [17].

Ces systèmes peuvent engendrer une économie en consommation significative. Ils sont équipés d'une batterie capable de délivrer une puissance importante mais de faible capacité, autorisant des déplacements en mode électrique pur de 2 km environ. Leur intérêt est d'améliorer le rendement global du véhicule, en permettant au moteur thermique de fonctionner avec un meilleur rendement, en combinant propulsion thermique et électrique.

**Le Véhicule hybride rechargeable (VHR)** est un véhicule hybride dont le dispositif de stockage d'énergie peut être rechargé grâce à une source extérieure d'électricité. En anglais PHEV (plug-in hybrid electrical vehicle), les véhicules hybrides rechargeables sont généralement dotés d'une capacité de batteries embarquées plus importante que les VHs et peuvent se mouvoir en mode électrique pur sur des distances d'environ 15 à 30 km selon les modèles [15]. On peut en distinguer deux principaux types : le premier s'intéresse aux

véhicules disposant d'une double motorisation, à combustion interne et électrique, et capables de se mouvoir grâce à chacune d'elles quant au deuxième type il regroupe les véhicules équipés d'une unique chaîne de traction électrique, mais disposant d'un dispositif de production d'électricité embarqué à base de carburant.

### 2.3.1 Éléments d'interaction des VEs avec la grille intelligente

La grille intelligente est un élément très important dans le système d'interaction avec les VEs. On a largement discuté sur son évolution et ses objectifs dans la section précédent. Dans cette section, on débute par les catégories de l'infrastructure de recharge de VEs puis on présentera les bornes de recharge qui sont les éléments clés de la transmission d'énergie électrique dans les deux sens entre les VEs et la grille intelligente. On finira par un résumé des problèmes liés à l'interaction VEs /grille intelligente dans de récentes publications.

#### a) L'infrastructure de recharge

Pour les véhicules électriques, cette infrastructure comprendra plusieurs exigences en matière de cas d'utilisation, de site de recharge, de modèle de gestion et de technologies. On compte quatre catégories principales : la première catégorie concerne la résidence, les maisons unifamiliales et les immeubles d'habitation qui exigent des capacités importantes de recharge de véhicule électrique; il s'agit de l'endroit où la recharge sera effectuée le plus souvent. La deuxième catégorie est le lieu de travail où la recharge des VEs sera plus utilisée par comparaison à celle effectuée à la résidence. Pour profiter du fait que les véhicules seront immobiles pendant plusieurs heures, les conducteurs voudront recharger leurs véhicules pendant les heures de travail, afin de pouvoir s'adonner à leurs activités après le travail. La troisième catégorie est la ville ; en effet, les véhicules électriques auront besoin d'une infrastructure dans toute la ville, à des fins de recharge durant le jour et le soir. Des endroits comme des hôtels, des cinémas, des parcs d'attraction auront aussi besoin de bornes de recharge. La quatrième catégorie concerne le parc comme lieu de recharge ; en effet, la définition des routes et l'utilisation distincte des véhicules font de l'électrification des parcs de véhicules une option très intéressante.

**b) Bornes de recharge**

Trois types de bornes de recharge des VEs existent actuellement et qui se distinguent par le débit de chargement en puissance (courant et tension électrique) et temps de chargement [17, 18].

*La recharge de niveau 1* est tout simplement la recharge à l'aide d'une prise standard à 120 volts. La durée maximale de la recharge est généralement de 6 à 8 heures pour un Véhicule hybride rechargeable et de 11 à 16 heures pour un Véhicule tout électrique.

*La recharge de niveau 2* est effectuée à l'aide d'une borne à 240 volts qui s'installe soit à l'extérieur de la maison où à l'intérieur de garage. La durée maximale de la recharge est généralement de 3 à 4 heures pour un Véhicule hybride rechargeable et de 6 à 8 heures pour un Véhicule tout électrique.

*La recharge rapide* est effectuée au moyen d'une borne à courant continu de haute puissance (Borne de charge rapide 400 V et plus) que l'on pourra retrouver à certains endroits stratégiques du réseau de bornes de recharge publiques du circuit électrique. La durée maximale de la recharge est généralement de 10 à 20 min pour un Véhicule tout électrique.

Aujourd'hui l'ensemble des intervenants (les fournisseurs d'électricité, les constructeurs de véhicules, les organismes de standardisation SAE, IEC, ISO ...) s'accordent également pour dire que les puissances de recharge seront différentes en fonction des situations d'utilisation. En plus, la charge « normale » des VE se fera plutôt la nuit au domicile ou dans les parkings des entreprises (en 6 à 8 heures). Les recharges « rapides » se feront lors d'arrêts de 1 à 2 heures (parking, centre commercial, stationnement sur la voie publique, pause du déjeuner,...) à l'aide de bornes spécifiques. Les recharges « très rapides » (15 à 20 minutes) n'interviendront que pour des stations publiques de recharge.

Table 2. 2 - Les normes standards du système de chargement des VEs[15,16,33]

	Niveau 1 AC	Niveau 2 AC	Niveau 3 DC
<b>Tension nominale</b>	120	208 ou 240 V	208-600V
<b>Courant nominale</b>	15 A	40-80A	400 A
<b>Débit de puissance (kW)</b>	1.4	3.6 - 7.7	20-160
<b>Nombre de phases</b>	1	1 ou 3	3
<b>Lieu de chargement</b>	à la maison	Dans les parkings	Station publique de recharge
<b>Interface</b>	Borne de charge de type NEMA 5-15R	EVSE	EVSE
<b>Standard</b>	IEC 62196-2/SAE J1772	IEC 62196-2	IEC 62196-2/ IEC 62196-3 (draft)

Pour des raisons de rentabilité de VEs et d'efficacité des réseaux électrique, la borne de recharge idéale doit être sûre et disponible. En effet, elle doit respecter les règles de sécurité et permet d'éviter tous risques de choc électrique pour l'utilisateur. Elle est amenée à répondre aux usages et aux besoins de déplacement des utilisateurs aux lieux du travail et aux domiciles. La borne doit aussi être communicante et intelligente. En effet, grâce à des protocoles standardisés, elle doit être capable de communication avec tous types de VEs. Elle doit être capable de charger des données sécurisées portant sur l'identification du véhicule, le transfert d'éléments de facturation, la localisation de la borne la plus proche en fonction de l'autonomie restante de la batterie. En plus, la borne de recharge doit assurer la charge optimale des batteries tout en préservant leur potentiel de durée de vie, d'optimiser la période de charge pour éviter les pics de consommation et d'offrir une facturation détaillée par utilisateur.

### 2.3.2 Interaction entre les VEs et la grille intelligente (V2G)

Dans cette partie, on présente des études bibliographiques qui traitent les problèmes de gestion de la recharge des VEs et leur interaction avec la grille d'intelligente.

#### a) Protocoles de communications

Plusieurs recherches récentes s'intéressent au transfert d'informations qui peut exister entre un VE branché au secteur électrique et la grille intelligente. Dans [20], l'auteur traite de la communication entre le véhicule électrique (PEV, PHEV) et la grille électrique intelligente, pour se charger en puissance électrique. Les supports de chargement standardisés (les bornes, les prises électriques) pour les véhicules sont aussi mis en études. L'idée était d'analyser les normalisations proposées dans IEC 6851/ISO 15118 au niveau bas et haut (LLC/HLC, low/high level communication) de communication pour l'interface V2G pour gérer la



---

demande en électricité. Dans [21], l'auteur présente, dans le cadre d'un projet (Harz.EE-mobility), un modèle de communication V2G permettant d'intégrer plusieurs ressources d'énergie. Ce modèle est basé sur les standards existants de l'interface entre VE et la borne de recharge. La connexion entre les ressources est implémentée en technologie web et une interface d'utilisateur mobile, décrivant le processus de chargement, est présentée. Ce travail se focalise sur les normes et les standards de la connexion d'un véhicule électrique avec la grille intelligente. Il présente les éléments de base de cette interface conformément aux normes ISO/IEC. Les structures et les formats de messages ainsi que leurs contenus sont mises en études. Cette étude est faite sans spécifications de l'endroit de recharge en terme matériels à savoir les bornes (les types de bornes de recharge, puissance maximale débitée etc..) et les lieux de recharge (les stations publiques, parking ou autres).

Toujours dans la partie interconnexion VE/Grille intelligente, l'article [23] traite les modules d'échange de messages entre le VE et la borne de recharge. Il propose une analyse de protocole de la couche application basée sur les normes internationales IEC existantes. Cette étude est menée à travers un exemple de processus de chargement élémentaire qui comporte trois parties à savoir l'établissement de la connexion, la phase de chargement et la phase de finalisation du chargement, par comparaison à un deuxième cas de chargement dit avancé qui tient compte de la phase de négociation dynamique de la puissance et du prix.

L'article [24], qui fait partie des deux projets : e-IKT et celui TIE-IN qui sont supportés en partie par le ministère de l'économie et de la technologie allemande et l'Union Européenne, traite le cas de chargement des VEs dans un lieu public comme le parking de travail. En se basant sur des données concernant la future pénétration des VEs dans le marché allemand, l'auteur étudie le dimensionnement et l'optimisation du réseau de point de recharge qui supportent le type de chargement rapide par rapport à la surface du parking. Il présente aussi un protocole de chargement optimisé ainsi qu'une étude des messages transmis suivant ce protocole. Une analyse de la communication V2G via PLC HomePlug GreenPHY, est présentée dans le but d'optimiser le chargement des VEs. L'auteur étudie par la suite l'efficacité d'un coordinateur local entre les processus de chargement dans un parking pour minimiser le risque du mal fonctionnement des bornes de recharge et pour permettre de répartir équitablement la puissance à chaque point de recharge.

**b) Gestion de la recharge des VEs**

La gestion de la puissance électrique, les protocoles de communication et les algorithmes d'ordonnement centralisés et décentralisés sont les principales techniques rencontrées dans de différentes références récentes.

La référence [24] se focalise sur le thème de la gestion de recharge électrique des VEs dans les maisons. Le but recherché dans cette référence est de réduire les pics de demande d'énergie et améliorer la stabilité de la grille, surtout pour un nombre élevé de VEs qui arrivent aléatoirement pour se brancher au réseau électrique. Pour se faire, l'auteur propose une nouvelle technique de gestion d'énergie en temps réel (en anglais : Real Time Smart Load Management RT-SLM) basé sur une optimisation dite : « sélection de la sensibilité maximale » (en anglais Maximum sensitivities selection MSS). Le principe de cette stratégie est de coordonner dynamiquement le chargement des VEs chaque 5 min tout en minimisant le coût de chargement et en respectant les contraintes limites de voltage et de puissance maximale débutée par la grille.

Toujours dans le contexte du problème de chargement des VEs et leur interaction avec la grille de puissance, la référence [25] propose un algorithme d'ordonnement distribué pour le processus de recharge des VEs basé sur la combinaison de l'optimisation de Lyapunov et les techniques d'échantillonnages selon les chaînes de Markov Monte Carlo. Cet algorithme tient compte du problème de la congestion du réseau électrique notamment pour un nombre élevé de VEs. Il permet de maintenir la stabilité de la grille par le fait qu'il permet de servir les VEs selon les lois de la file d'attente dont sa longueur est adaptée selon les périodes de pics de chargement rencontrées.

Le papier [26] propose un protocole décentralisé de gestion de la consommation de l'électricité dans des résidences. L'auteur explore les impacts potentiels de la haute pénétration des VEs sur le réseau électrique. Il traite le problème de chargement décentralisé des VEs. Par opposition au chargement centralisé avec lequel la gestion d'énergie en temps réel de tous les appareils électriques est gérée par la partie centrale de la grille, le chargement décentralisé vise à assurer la gestion d'énergie de façon régionale indépendante. Pour chaque maison on parle de compteur intelligent responsable de la gestion de la puissance électrique de VE et des autres appareils électriques qui peuvent exister, d'une façon indépendante des autres maisons du même région. L'auteur présente une formulation mathématique du problème décentralisé pour un nombre de VEs assez large. Dans cette formulation, qui est basée sur l'équilibre de NASH et la stratégie de chargement dit remplissage de la vallée (en

anglais : valley filling), les VEs réduisent leur propre coût de chargement, qui est fonction de la demande totale du système. En plus, chaque VE peut prendre individuellement les décisions de chargement à chaque instant.

Le papier [27] analyse l'impact des modèles de tarification d'électricité par moment d'utilisation (en anglais : Time Of Use Pricing TOUP) sur le profil de la puissance distribuée par la grille intelligente. Une modélisation de la demande à la réponse pour les consommateurs résidentiels avec de large pénétration des VEs hybrides (en anglais : PHEV) est présentée. Cette étude est menée pour la saison d'été qui est caractérisée par un profil de demande d'énergie réduite et celle d'hiver avec profil de demande d'énergie élevé, avec deux niveaux de pénétration des VEs hybrides ; haut et bas, et deux stratégies de recharge ; rapides et normales.

La planification et le dimensionnement infra-structurale du réseau des interactions de la grille intelligente et des VEs, présentent un thème de recherche très important. L'article [28] décrit un outil basé sur le modèle stochastique de Monte Carlo pour la planification du réseau de distribution d'énergie électrique, en fournissant une caractérisation des éventuelles conditions d'exploitation des réseaux électriques comme les profils de tension, d'énergie par secteur, des pics de puissance de la grille et des pertes d'énergie. En plus de l'évaluation de l'état de stabilité de fonctionnement de la grille, cet outil permet aussi d'identifier le scénario le plus critique et les composantes du système réseau qui sont soumises à des contraintes exigeantes. Il simule avec les chaînes de Markov discrètes, le mouvement des VEs pendant une année. Les quatre (4) états considérés pour un VE sont : en mouvement, dans une résidence, dans un parking commercial et dans celui industriel. Un autre travail [29] présente une modélisation toujours avec les chaînes de Markov et la théorie des files d'attente, d'une station de recharge publique des VEs dont le but est d'avoir des idées sur les paramètres nécessaires à la construction et la planification des stations de recharge des VEs. Les paramètres étudiés et estimés sont le temps d'attente dans la station en fonction du nombre des chargeurs, le temps de chargement, et le nombre des VEs non satisfaits.

Pour un nombre de VEs élevé, le processus de recharge devient stressant pour la grille et peut provoquer son instabilité ce qui dégrade le niveau de satisfaction des consommateurs. Les infrastructures du réseau électrique actuelles, qui sont dédiées à gérer la consommation de la puissance électrique traditionnelle à savoir ; l'électricité industrielle, résidentielle et publique, ne peuvent pas satisfaire la demande de pics de recharge de VEs qui peuvent être au nombre de million. Dans ce contexte se situe le papier [30] qui présente un système d'infrastructure

évolutive pour un grand nombre de VEs. Il est basé sur les technologies d'information pour gérer la recharge et la décharge des VEs en grand nombre. Le système de jetons est la base de cette technique qui se compose de deux parties : la communication et l'ordonnancement. La première partie est un protocole de communication distribué pour négocier le transfert d'énergie via les jetons et la deuxième s'intéresse au contrôle d'admission et la coordination des jetons de la part du consommateur avec ceux du producteur. Toujours dans la problématique de la réduction de pics de consommation, l'article [31] propose une plateforme d'infrastructure de chargement de VEs (en anglais : Electric Vehicle Advanced Metering Infrastructure EVAMI). Le but est de fournir une large gamme de fonctionnalités pour les propriétaires de véhicules électriques et les gestionnaires de services de rechargement publics. Cette plate-forme permet la réponse à la demande via une communication interactive et efficace basée sur le réseau de communication PLC. Elle permet un profil de charge basé sur la localisation et le temps via un processus de coordination de la distribution de la charge suivant le mode de recharge (rapide, non rapide) et la disponibilité de la station de recharge.

## 2.4 Fonctions essentielles de la grille intelligente

L'intelligence de la grille ne se résume pas en une seule technologie, mais à plusieurs applications dont chacune requière des techniques précises pour fonctionner. Certaines technologies sont installées chez la clientèle, alors que d'autres visent le service de production d'énergie. En générale, la grille intelligente utilise un réseau de communication déployé sur l'ensemble du réseau électrique.

Dix composants majeurs des technologies de la grille intelligente, dont chacun ayant différentes applications, sont distingués:

### 2.4.1 Infrastructure de mesurage avancé

#### a) Tarification différenciée dans le temps :

La fonction 'Tarification différenciée dans le temps' permet de changer la tarification de la charge électrique dépendamment du moment (temps) d'utilisation. En effet, le système de tarification actuel, qui modélise la variation du prix d'électricité, tient en compte des demandes de chargement reçues et de la capacité de la grille pour leurs répondre. Il fait partie, entre autre, des stratégies adoptées par la grille pour assurer sa stabilité.

Comme il a été déjà mentionné en détails dans les sections précédentes de ce rapport, parmi les types de tarification qui existent on cite le prix variable selon le temps d'utilisation (en

anglais : Time of Use TOU), Le TOU Dynamique, une autre politique de tarification dynamique et qui varie selon les pics de puissance (en anglais : Critical Peak Pricing CPP), le Demand Side Bidding (DSB), et la tarification à variation en temps réel (en anglais : Real Time Pricing RTP).

Dans le cas des EVs, on peut estimer que l'utilisation des équipements de charge pourront être sollicités plus pour des moments de la journée que pour d'autres. D'où l'utilité de la tarification différenciée dans notre cas d'interaction 'grille intelligente et VEs'. Cette fonction sera considérée dans la thèse pour tous les algorithmes et protocoles de recharge conçus.

#### **b) Télé-lecture des compteurs :**

L'élément clé dans cette fonction est décrit par les compteurs qui ont été conçus pour mesurer la consommation de puissance électrique et établir la tarification correspondante par la suite. Des études détaillées des réseaux électriques ont montré qu'il y avait une diversité pointue de la consommation telle qu'elle est faible pour des périodes et forte pour d'autres. D'où l'idée d'intégrer la gestion de la consommation aux compteurs tout en exploitant les progrès technologiques dans l'informatique et les télécommunications. En plus de la raison économique, des compteurs intelligents ont été aussi conçus pour la gestion technique du réseau électrique, la maîtrise de la consommation et l'optimisation de son coût.

La fonction 'Télé-lecture des compteurs' permet la lecture de la puissance électrique industrielle ou résidentielle qui est affichée par le compteur, pour gérer la consommation et le profil de charge sur le réseau en générale. On peut estimer que la grille peut être intéressé au profil de puissance consommée par chaque utilisateur en temps réel pour optimiser le coût d'électricité et pour satisfaire la demande du client sans stresser le réseau. Cette fonction sera évoquée lors de la recharge des VEs à la maison pendant la nuit et dans les stations de recharge publiques pendant le jour.

#### **c) Détection de pannes et de fraudes :**

C'est une fonction qui permet de vérifier la continuité de la fourniture électrique, la qualité de la tension et l'intensité chez l'utilisateur ainsi que la détection et la gestion des pannes potentielles à distance et les pertes non-techniques avant que des problèmes de perturbation sur le réseau électrique impactent les clients. Dans un premier temps, on ne s'intéresse pas à cette fonction pour l'intégration des VEs.

**d) Portail client en ligne :**

Cette fonction permet de véhiculer les informations descriptives de la demande du client, en puissance électrique avec l'intervalle temporelle correspondante (état de charge, et disponibilité, et tarification), vers la grille intelligente. On a utilisé cette fonction lors de la conception des protocoles de recharge des VEs ; on a établi une communication descriptive du profil de charge désirée avec la grille avant le démarrage de transfert de puissance de/vers des VEs connectés à la maison ou aux stations publiques de recharge électrique pour optimiser le processus d'ordonnement de la recharge/décharge en temps et niveau de charge dans de bonnes conditions de la grille.

**e) Afficheurs graphiques résidentiels :**

Le rôle de cette fonction est d'impliquer le consommateur dans le processus de gestion de la demande. Ce consommateur deviendra un consomm'acteur. Elle permet l'accès en temps réel aux informations de consommation globale avec un affichage spécifique. On s'intéresse à cette fonction dans la première partie du travail où on simule le chargement/déchargement des VEs à la maison. Le consommateur fixe son niveau de satisfaction désirée selon les valeurs de prix affichées.

**f) Déconnexion et connexion client à distance :**

Le principe de cette fonction est d'établir une connexion ou une déconnexion avec la grille. Cette fonction est utilisée dans tous les cas d'interaction VEs/grille. En effet, dans la première partie du travail, qui traite le transfert de puissance et de données entre un VE et la grille électrique, cette fonction qui est assurée via la PLC, permet de débiter une commination pour négocier le prix et la disponibilité pour le chargement/déchargement des VEs.

Dans la deuxième partie qui introduit la communication sans fil VANET pour les interactions V2G, cette fonction est aussi utilisée au niveau du protocole de communication avec lequel on cherche à optimiser le processus de recharge des VEs (choix de la station de recharge publique la plus adéquate selon le prix, la disponibilité et la stabilité de la grille).

### 2.4.2 Réponse à la demande

La grille intelligente offre l'opportunité de pouvoir gérer l'équilibre du réseau que ce soit par la sollicitation permanente des sources d'énergie et de stockage de réserve ou en agissant en priorité sur la consommation. Le client peut participer dans ce concept par le contrôle direct de charge par lui-même en tant que le consommateur (chauffe-eau, climatiseur...). La réponse

à la demande est un modèle selon lequel il est possible d'alléger la demande en électricité lors des pics de consommations en coupant certains appareils électriques ou en substituant la charge électrique effacée par d'autres sources de production [13,19].

Dans le domaine des VEs, on s'intéresse principalement à la fonction réponse à la demande pour optimiser le processus de chargement et déchargement dans des conditions stables de la grille. On évoquera cette fonction pour la recharge/décharge intelligente des VEs (protocoles et techniques d'ordonnancement des VEs).

### 2.4.3 Services réseaux et technologies complémentaires

Le système de la grille intelligente est en générale constitué de plusieurs composants et couches d'infrastructures matérielles et logicielles permettant de communiquer, mesurer, contrôler et piloter le processus de transfert de puissance électrique. Ces couches coopèrent entre eux aussi pour assurer la fonction de comptage intelligent, l'échange et le transfert de données entre ses composantes pour assurer la gestion des sources et des demandes d'énergie. En tant que système communicant et bidirectionnel, l'infrastructure de la grille repose sur différents types de réseaux de communication qui se distinguent par leurs portés et leurs débits.

En plus de cette fonction d'infrastructure réseaux, qui est évoquée dans notre travail dans l'interaction VEs/grille au moment de branchement à la maison et ailleurs aux stations publiques ou pour assurer la communications des VEs avec la grille depuis les autoroutes loin des lieux de stationnement ou de recharge, on cite d'autres fonctions intégrées à la grille comme l'infrastructure énergétique, celle de contrôle, de détection, de pilotage et de stockage qui est une fonction importante dans notre cas d'étude ou les batteries des VEs qui sont des dispositifs de stockage décentralisés, peuvent être sollicités pour répondre aux pics de demande.

### 2.4.4 Surveillance du réseau

Cette fonction traite les capteurs de données physiques (tension, courant, fréquence, température), qui embarquent plus d'électronique à des coûts compétitifs, permettent d'obtenir, en plus des données de comptage, des informations nécessaires d'une part à une gestion optimale des flux dans les réseaux énergétiques et d'autre part à la protection de ces infrastructures. Associés à des actionneurs, les capteurs de courant et de tension, sont des éléments critiques et de base de l'intelligence du réseau électrique. Ces équipements mesurent, surveillent et recueillent les informations d'environnement là où ils sont installés.

Ces données peuvent être de nature variée, selon les besoins d'analyse et de suivi de la qualité de l'onde électrique (phase, fréquence, tension, intensité, etc.). Ils permettent, en plus, d'analyser ces données, de les formater et de les enregistrer localement. Certaines de ces données sont transmises au niveau des centres de contrôle via des systèmes de télécommunication de diverses natures (optique, PLC, Wireless, etc...) en utilisant différents types de protocoles dédiés [5, 17].

Dans notre travail, cette fonction est traitée implicitement ; elle permet la détection des instants de pics et des puits de demande pour permettre à la grille intelligente de réagir avec les protocoles de gestion appropriés.

#### 2.4.5 Automatisation du réseau

Pour cette fonction, il s'agit de la reconfiguration automatisée du réseau électrique avec le contrôle à distance de la production distribuée (du côté des sources) ainsi que la gestion de la tension et de la puissance réactive en distribution. Cette fonction fait partie implicitement du présent travail de la thèse. En effet, l'état des bornes de recharge est communiqué à la grille d'une manière permanente. En plus, selon la politique de prix utilisée, le nombre des VEs et la charge demandée, la grille intelligente choisira automatiquement la stratégie correspondante pour gérer le rechargement/déchargement des VEs.

Le tableau 2.3 récapitule les fonctions à traiter dans notre travail.



Table 2. 3- Fonctions essentielles de la grille intelligente

N°	Fonction	Acronyme	Traitée/non-traitée	Remarques
1	<i>Tarifification différenciée dans le temps</i>	Tarif_diff	traitée	
2	<i>Télé-lecture des compteurs</i>	Télé-lect_CI	traitée	
3	<i>Détection de pannes et de fraudes</i>	Défect_pannes	Non traitée	
4	<i>Portail client en ligne</i>	Portail_client	Non traitée	Traité partiellement
5	<i>Afficheurs graphiques résidentiels</i>	Affichage_resid	Non traitée	Traité implicitement
6	<i>Déconnexion et connexion client à distance</i>	Connect_déconnect	traitée	
7	<i>Réponse à la demande</i>	Rép_Dem	traitée	
8	<i>Services réseaux et technologies complémentaires</i>	Serv_Res	Non traitée	Implicitement (PLC et communications sans fils)
9	<i>Surveillance du réseau</i>	Surveillance_Rés	Non traitée	Traitée implicitement
10	<i>Automatisation du réseau</i>	Automat_Rés	Non traitée	Traitée implicitement

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a introduit premièrement la grille intelligente de point de vue infrastructure ainsi que les problèmes liés à son bon fonctionnement. Deuxièmement on a présenté les VEs avec leurs infrastructures de recharge ainsi que les problèmes liés à leurs interactions avec la grille intelligente. Troisièmement on a détaillé les principales fonctionnalités de la grille intelligente tout en mettant l'accent sur les fonctions qui sont prises en compte pour le chargement et le déchargement des VEs. Dans le chapitre qui suit, on va présenter des modèles d'interaction entre les VEs et la grille dans un milieu résidentiel.

---

## CHAPITRE 3 INTERACTION DES VES AVEC LA GRILLE DANS UN MILIEU RESIDENTIEL

Dans ce chapitre, on présente deux travaux qu'on a réalisés et qui sont essentiellement basés sur des algorithmes et des modèles optimisés pour l'ordonnement des VEs pour leurs recharges et décharges en puissance électrique dans un milieu résidentiel.

Le premier travail est un papier présenté dans la conférence IEEE ICC [46]. Ce papier s'intitule «Advanced Scheduling Protocol for Electric Vehicle Home Charging with Time-of-Use Pricing».

Le deuxième travail est une extension du premier travail. En effet, on propose une technique de gestion de la charge pour permettre le contrôle des coûts de l'énergie au fil du temps et d'ajuster la charge des VEs à domicile.

### 3.1 Ordonnement du processus de recharge des VEs dans un milieu résidentiel

#### 3.1.1 Résumé

Dans ce travail, on introduit un protocole de recharge dynamique pour les véhicules électriques. La PLC est le support de transmission utilisé pour communiquer les fonctionnalités désirées. On propose un schéma d'ordonnement optimal pour la recharge des VEs à la maison avec des prix variables, pendant la période de la nuit, lorsque le nombre des VEs branchés au secteur électrique est susceptible d'être élevé. On considère le problème d'ordonnement et de planification de la recharge des VEs en puissance électrique en minimisant la consommation totale d'énergie. Ce processus de planification de recharge des VEs fonctionne sous un ensemble de contraintes qui correspondent à des situations réelles de chargement des VEs (débit de chargement, capacité maximale des batteries, temps de chargement, bornes de recharge de type 1, etc.). Des résultats de simulation démontrent l'efficacité de l'approche proposée pour réduire les demandes de charge pendant les périodes de pointe, tout en satisfaisant les contraintes définies.

#### 3.1.2 Abstract

In this paper, a scheduling protocol for electric vehicle (EV) home charging with time of use pricing is introduced. This work addresses the problem of EVs charging at home by adopting an appropriate charging process protocol over Power Line Communications (PLC). The

scheduling protocol is aimed at minimizing peak loads on distribution feeders due to multiple EVs charging while using pricing policies. Energy efficiency and performance are both taken into account. An appropriate analytical formulation of the scheduling problem is given together with the proposed scheduling protocol. Simulations demonstrate the effectiveness of the proposed approach in minimizing peak loads while satisfying the defined constraints.

Keywords- V2G, EV, scheduling, Smart Grid.

### 3.1.3 Introduction

The notion of connected vehicles is becoming a reality with the new advances and standards for vehicle communications becoming ready for market. In parallel, communication capabilities are also expected to link smart Electric Vehicles (EVs) to the smart grid. In fact, in the next few years, the load introduced by EVs charging operations will be one of the most important challenging issues for demand response systems in the smart grid. Moreover, the efficient energy management for EV supply will become central to achieving an efficient operation of the smart grid. For this, advanced scheduling algorithms seen as a part of Vehicle-to-Grid (V2G) interaction, are necessary. Integrated into the smart grid, these algorithms should enable the reaching of particular objectives such as the grid stabilization i.e. regulation service, by reducing the power fluctuating and controlling the charging procedure by infrastructure and vehicles.

EVs pose a greater challenge. As the more they are adopted and cluster for charging in areas and neighborhoods at peak load periods, the more there will a significant stress on the grid. This is because the charging of one electric car can add a demand equivalent of a new house [32], requiring for additional distribution capacity in areas that may already be congested and demanding more energy availability. The problem is further exacerbated at peak loads. A recent study [33] showed that, for example, 16,000 electric cars in the City of Toronto would represent 86 MW of load if they charged at the same time, the equivalent amount of energy used by a small city. If the same vehicles distributed their charging over a 12-hour period, load would be reduced to 13 MW. Moreover, during the night period, electrical networks are nowadays typically lightly loaded and thus may entice a large number of EV-owners to use electricity in this period because the charging price might be lower. It is evident then, that V2G interoperation has to offer the capability to manage vehicles charging load wisely according to the overall power demand. Moreover, pricing policies should also be taken into account.

In this work, we consider the dynamic scheduling for EVs charging as a grid communication process, where PLC [32, 34] is used to convey the desired functionality. We propose an optimal scheduling scheme for charging vehicles at home with varying prices, especially at night time, when the load of home EVs charging is expected to be high.

**Our contributions are:** 1) we present an analytical formulation of the scheduling problem that takes into account a number of constraints including a maximum neighbourhood charging capacity, a bounded scheduling time interval for charging, variable prices for charging at the given interval, and a random arrival of vehicles each requiring a maximum price threshold for charging at the end of the process; 2) we propose a scheduling mechanism that addresses the defined constraints; and 3) we perform simulations and demonstrate that the protocol and the mechanism can effectively schedule EVs charging operations within the defined constraints while considering realistic EV charging characteristics.

The remainder of the paper is organized as follows. Subsection 3.1.4 discusses the related work. In subsection 3.1.5, we present the proposed scheduling model. We formulate and solve the electricity load scheduling problem with time-of-use pricing in subsection 3.1.6. The simulation results are presented in subsection 3.1.7, and the conclusions are drawn in subsection 3.1.8.

### 3.1.4 Related Work

Existing related work on V2G interface can be classified into two classes:

1) New V2G protocols and standardization for EV and Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) communication, and 2) Scheduling algorithms for EV charging processes. For the first class, a few works [35, 36] make a good summary of current standard protocols and related architectures for EV and grid interaction. In [21] the basic principles of standard V2G communication interfaces currently under specification in the ISO/IEC are presented, with a focus on control communication but without a regard to administrative data, especially for V2G integration at home. In [20], the authors present a generic V2G information model allowing mutual charge scheduling negotiations between EVs and grid operators. The work discusses a system model with theoretical consideration without treating a specific charging mode (slow, rapid or fast) as in realistic situations. Moreover, it does not study the case where vehicles battery may be used to feed energy back into the grid whenever the price for energy is particularly high.

In the second class of works, authors in [25, 9] propose a decentralized charging control algorithm to schedule charging for large populations of EVs without considering EVSE characteristics such as plug in levels 1, 2 or 3 at home. The work in [8], presents smart energy control strategies for residential charging of EVs, aiming to minimize peak loads and flatten the overall load profile. However dynamic EV power loading situations were not studied, especially EVs random initial power distribution. Other works, such as [38], address the problem of scheduling and electric power management optimisation but not in the context of EVs charging.

In our proposal, we present a scheduling scheme that minimizes energy load peaks while taking into account constraints including maximum neighbourhood charging capacity, bounded scheduling time interval, variable prices for charging over time, and a random arrival of vehicles each requiring a maximum overall price threshold for charging. Furthermore, realistic EVSE characteristics were used.

### 3.1.5 Scheduling Process

In this section we present our proposed scheduling process. The scheduling process must operate under a set of constraints which correspond to realistic EV charging situations. These constraints are also defined below.

We suppose that all homes are connected to an Advanced Metering Infrastructure (AMI) [37]. AMI Infrastructure typically refers to the measurement and collection systems that include meters at the customer site, networks between the customer and the Grid, and data reception and management systems at the Grid itself. We thus also assume that a charging communication service initialisation is established between smart grid and EVs via a two-way communication scheme every time an EV is plugged at home. We are interested in solving the following problem: Given a neighbourhood that is connected to a single local transformer of some finite capacity, and comprising a finite number  $N$  of electrically powered vehicles that are plugged in for charging during a bounded time interval, what is the optimal charging schedule for these vehicles given a set of defined constraints?

We define the constraints as follows:

- The scheduling time interval is bounded (e.g., 12 hours duration, during night time).
- A maximum price is fixed and accepted by every vehicle during the charging process period. Every vehicle might accept a different maximum price.

- Pricing varies over time during the scheduling time interval.
- The initial charge prior to plugin for charge of each EV, denoted SoC, is random and can vary between 0% and 99 %.
- The arrival time of each of the N vehicles at their charging stations is also random.
- Each vehicle requires a minimum charge value at the end of the scheduling process. This minimum value can be different for each vehicle.

Of course the problem above defined, and corresponding solutions, can be easily scaled to a set of neighbourhoods within a defined area.

To solve this problem, we define the following system model:

We assume that the entire scheduling time interval is finite (e.g., at night) and is divided into  $T$  sub-intervals (for example 144 sub-intervals each of which has 5 min duration). The smart meter device determines the starting and finishing charging sub-intervals of each vehicle and also determines the amount of energy consumption of each vehicle at each sub-interval.

The energy consumption scheduling vector of each vehicle  $n$  is defined by

$$x_n = [x_n^t]_{t=1..T} \quad (3.1)$$

where  $x_n^t$  is the amount of energy consumption of vehicle  $n$  during sub-interval  $t$ . We suppose that each vehicle  $n$  has its schedulable interval  $[S_n; F_n]$  only during which it can be scheduled. In other words,

$$x_n^t = 0 \quad \text{if} \quad t \notin [S_n, F_n] \quad (3.2)$$

$L_n = F_n - S_n + 1$  is the length of this schedulable interval of vehicle  $n$ . We consider that each vehicle  $n$  has its maximum and minimum values for energy consumption,  $x_n^{max}$  and  $x_n^{min}$ , respectively, in each sub-interval  $t$ , i.e.,

$$x_n^t \in [x_n^{min}, x_n^{max}] \quad \forall n, \quad t \in [S_n, F_n] \quad (3.3)$$

The price variation model is very important in such case study. In fact, in research works various time-differentiated pricing models have been proposed [9, 26]; real time pricing

(RTP), day-ahead pricing (DAP), time-of-use pricing (TOUP), critical-peak pricing, inclining block rates (IBR), etc. Research findings [26, 27] indicated that compared to the other models, TOUP provides more incentives for customers to shift load to the less expensive hours. Thereby we use the TOUP model throughout this study. In TOUP model, the unit price for energy varies in each sub-interval  $t$  and it is denoted as  $\gamma_t$ . All  $\gamma_t$ 's for the entire scheduling interval (i.e.,  $\forall t \in [1, T]$ ) are known to the scheduler in advance. According to these assumptions, the total energy cost for each vehicle is

$$E_T(x_n) = \sum_{t=1}^T \gamma_t x_n^t \quad (3.4)$$

Each vehicle  $n$  has its utility function  $U_n^t(x_n^t)$  that represents its charging performance when it consumes  $x_n^t$  units of energy at sub-interval  $t$ . The energy consumption for each vehicle can be flexibly adjustable at each sub-interval and the vehicle charging performance depends only on the total energy consumption. In this context, each vehicle  $n$  has its total utility function  $U_n(x_n)$ , where  $x_n$  is its total energy consumption defined according to (1), (2) and (3) as

$$x_n = \sum_{t=S_n}^{F_n} x_n^t \quad (3.5)$$

The utility function is an increasing and strictly concave function [8, 40]. Moreover, for each vehicle  $n$ , the user has the following requirement:

$$U_n(x_n) \geq C_n, \quad \forall n = 1..N \quad (3.6)$$

This requirement indicates for vehicle  $n$  the total energy consumption should be higher than or equal to its minimum threshold  $C_n$ . We define a scheduling set  $X_{sched}$  that satisfies the last equation as

$$X_{sched} = \left\{ x \mid \begin{array}{l} x_n = \sum_{t=S_n}^{F_n} x_n^t, U_n(x_n) \geq C_n, \\ \forall n = 1..N \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

Where

$$x = [x_1, x_n, \dots, x_N] \quad (3.8)$$

### 3.1.6 Power Load Scheduling

We consider a power load scheduling problem minimizing the total energy consumption [8, 37], which is formulated as

$$\text{Minimize}_x \left\{ \sum_{t=1}^T \gamma_t \sum_{n=1}^N x_n^t \right\} \quad (3.9)$$

$$\text{Subject to} \quad x_n^{\min} \leq x_n^t \leq x_n^{\max}, \quad \forall n, \quad S_n \leq t \leq F_n$$

Note that our formulation is valid when there is no constraint on the aggregate power demand to the grid.

This problem can be decomposed into sub-problems each of which corresponding to each vehicle  $n$ . For each vehicle  $n$ , we have to solve the following problem:

$$\text{Minimize}_{x_n} \left\{ \sum_{t=1}^T \gamma_t x_n^t \right\} \quad (3.10)$$

$$\text{subject to} \quad x_n = \sum_{t=S_n}^{F_n} x_n^t \quad (3.11)$$

$$\text{and} \quad U_n(x_n) \geq C_n \quad (3.12)$$

The above problem is a convex optimization problem [40]. To solve this problem, standard algorithms for convex optimization should be used [39]. Since the utility function is strictly increasing [8, 40], it has an inverse function. As a result, the first and second constraints can be rewritten as

$$\sum_{t=S_n}^{F_n} x_n^t \geq U_n^{-1}(C_n) \quad (3.13)$$

Moreover, to minimize the cost, the amount of energy consumption has to be minimized while satisfying the constraints. The inequality (3.13) should be satisfied with equality and the problem posed by equations (3.10, 3.11, 3.12) subject to equation (3.3), is reformulated as

$$\text{Minimize}_{x_n} \left\{ \sum_{t=1}^T \gamma_t x_n^t \right\} \quad (3.14)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{t=S_n}^{F_n} x_n^t = U_n^{-1}(C_n) \quad (3.15)$$

To solve equation (3.14), we use the following optimisation algorithm I.



1. Put the unit prices for sub-intervals  $[S_n; F_n]$  in an increasing order as :

$$\gamma_{(1)} \leq \gamma_{(2)} \leq \dots \leq \gamma_{(L_n)}$$

given a mapping function  $f$  between  $t$  and  $t'$

such that  $\gamma_{(t')} = \gamma_{f(t)}$  and  $\gamma_{(t)} = \gamma_{f^{-1}(t')}$

Begin by initialization of counter  $p$  :

2. Let  $p = 1$  and  $Z = U_n^{-1}(C_n)$

Procedure {

3. Assign  $x_n^p = \min\{Z, x_n^{max}\}$  and  $Z = Z - x_n^p$

incrementation of counter  $p$

4. Let  $p = p + 1$

}

Repeat this Procedure until  $Z \leq x_n^{max}$

5. Assign  $x_n^p = \max\{Z, x_n^{min}\}$

From the algorithm I description, it is clear that its implementation requires low computation cost.

Figure 3.1 summarizes the interactions between the smart Grid and EVs when the dynamic scheduling process for EV charging at home is considered. The figure shows that the Grid begins by broadcast the price profile  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_T$  to all connected EVs. As a response to the Grid, each EV send its loading interval, the maximum and minimum power demand as given by eq.(3.2) and eq.(3.3). After compiling all input data from EVs, the smart Grid send for each EV its energy consumption scheduling vector which is highlighted in red color in Figure1.

### 3.1.7 Simulations

In this section, we evaluate the performance of our scheduling algorithm through simulations and we present and discuss the simulation results. We used Matlab to perform the simulations, and we adopted the following function as a utility function for vehicles [20]:

$$U(x) = \log(x+1) \tag{3.16}$$

We performed simulation sets with two scenarios; the first one having 50 EVs plugged in to their respective level 1[41] EVSEs at the scheduling start, and the second scenario having 100 EVs. Level 1 equipment is the one expected to be installed in homes as part of the AMI. The scheduling period was considered 12 hours with subintervals of 5mn. We assumed the neighborhood transformer can allow a simultaneous load of 100 EVs. We compared in simulation the performance of our scheduling algorithm with the un-scheduled case. Figures 3.2 and 3.3 show example random distributions of plugged in EVs in the scheduling period for scenarios 1 and 2.

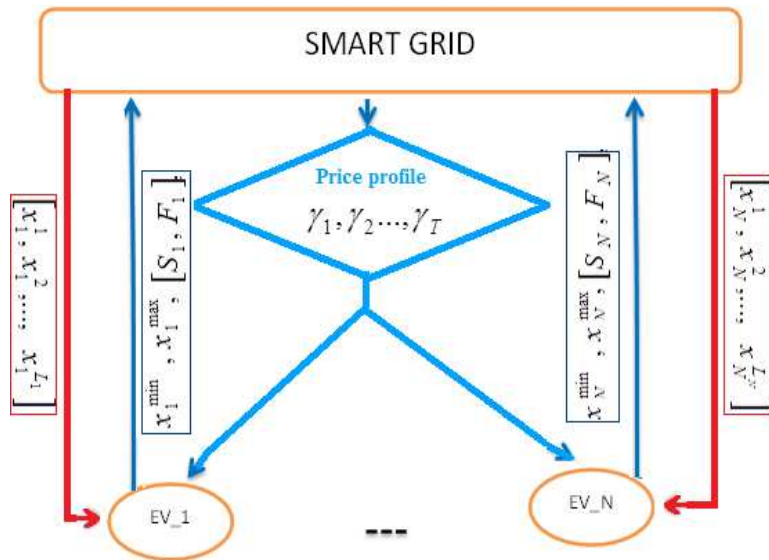


Figure 3. 1- Schematic view of information flow patterns between the Smart Grid and EVs when considering our charging algorithm

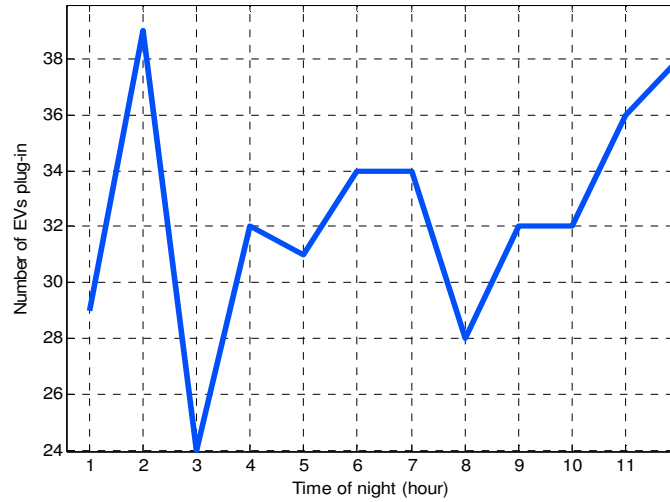


Figure 3. 2- Random distribution of connected EVs in the night period (First scenario)

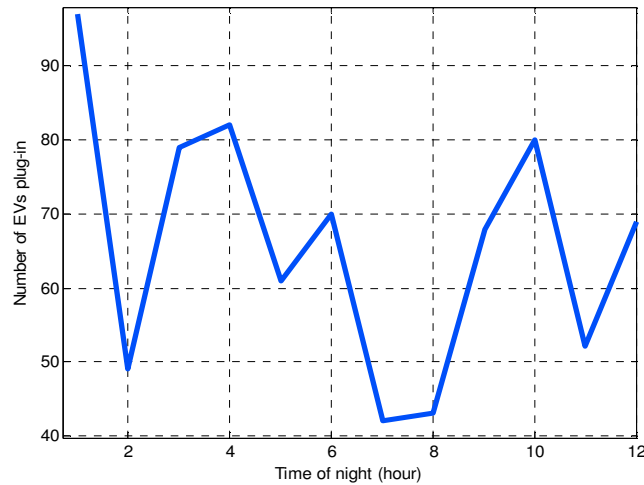


Figure 3. 3- Random distribution of connected EVs in the night period (Second scenario)

At the end of the overall charging period, all vehicles should be satisfied. We rank vehicles based on their initial SoC. We start the charging process for vehicles which have the least charge ( $x_n$ ). The parameters for each vehicle are generated randomly as follows:

- starting time ( $S_n$ ): with a uniform distribution between sub-intervals of the night period;

- finishing time ( $F_n$ ): with a uniform distribution between sub-intervals  $S_n$  of the of the night period;
- maximum power consumption ( $x_n^{max}$ ): with a uniform distribution between 0 and 100 percent of charge ;
- the constraint  $\gamma_{(t)}$  is generated according to the TOUP model.
- threshold ( $C_n$ ): with a uniform distribution between 0 and  $L_n \times U_n(x_n^{max})$ .

We study the power consumption of our algorithm compared with the unscheduled case with the variation of the electricity price over night time. In the unscheduled case, we assume that the charging process of each EV starts at the first sub-interval in its schedulable interval, i.e., sub-interval  $S_n$ , and no active control of EV charging is present (once an EV is connected, the charging process commences until the maximum value of the charging price for the corresponding user is attained, or charging is completed). We assume that an EV always consumes the energy with its maximum power limit until its performance threshold is satisfied.

Simulations were run 50 times for each scenario and average power consumption values at each sub-interval were noted. Figures 3.4 and 3.5 show examples of the charging process operations scheduled for 50 and 100 vehicles respectively.

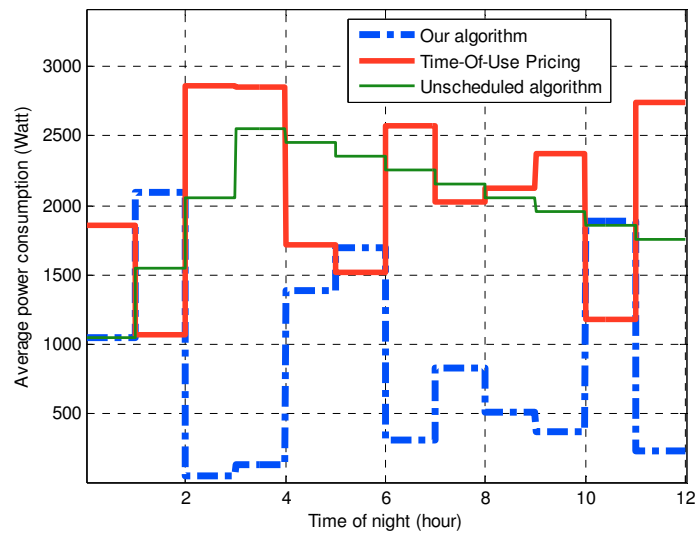
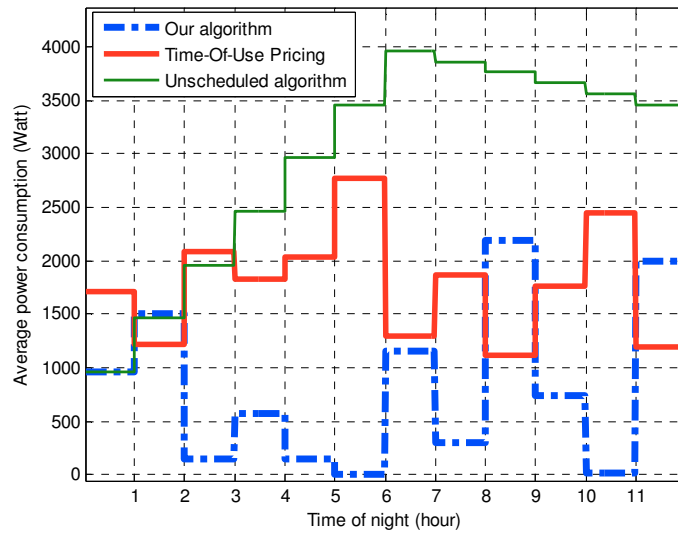


Figure 3. 4-Average power consumption comparison between our algorithm and the unscheduled case (simulation for 50 EV)



**Figure 3. 5-Average power consumption comparison between our algorithm and the unscheduled case (simulation for 100EV)**

The results of our algorithm correspond to the blue dashed curve in each of the two Figures 3.4 and 3.5. We observe from these figures that the average power consumption is sensitive to the price variation. This shows that with using the proposed scheduling, the Grid can change power consumption distribution using TOUP variation. The figures also clearly show that the algorithm follows inversely TOUP variation in order to optimize the individual power consumption for each EV. Additionally, we observe from these figures that, compared to the unscheduled case, our algorithm consumes relatively more power when the electricity price is low and relatively less power when the electricity price is high.

Table 3.1 highlights the peak power consumption for our algorithm and the unscheduled one as shown in figures 3.6 and 3.7 corresponding to scenario 1 and 2 respectively. As illustrated in these figures, it is clear that our algorithm can reduce the peak power consumption by more than 22% for the first scenario, the least loaded one (50 EVs), and by more than 42% for the second scenario (100 EVs).

**Table 3. 1- Comparison of peak electricity with unscheduled case**

	Unscheduled algorithm (KW)	Our algorithm(KW)	Saving rates (%)
Scenario1 50 EV	2700	2100	22,22%
Scenario2 100 EV	3900	2250	42.30

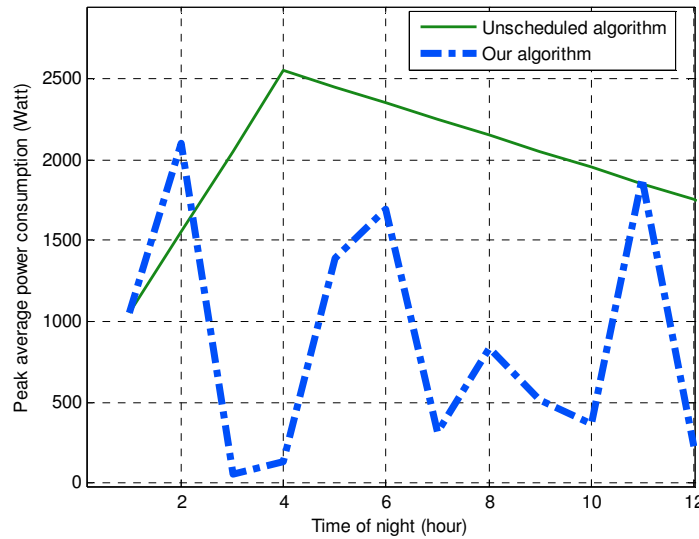


Figure 3. 6- Peak average power consumption comparison between our algorithm and unscheduled algorithm (simulation for 50 EV)

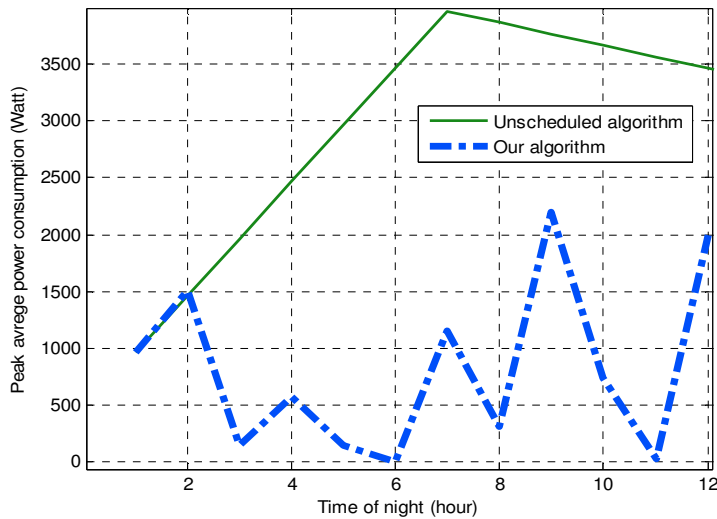


Figure 3. 7- Peak average power consumption comparison between our algorithm and unscheduled algorithm (simulation for 100 EV)

### 3.1.8 Conclusions

In this paper, a dynamic scheduling algorithm for EVs charging at home with TOUP is formulated, developed and analysed through simulations considering different vehicle load scenarios. With the proposed algorithm, where PLC is a straightforward means to convey the desired scheduling functionality, two principal objectives are taken into account. First, satisfying each EV charging demand under TOUP constraints and second, lowering the peak

loads during the charging period. Simulations that considered realistic EV home station charging models showed that the proposed scheduling algorithm manages the charging process in an efficient way under the defined constraints. Our future work will be targeted at including load balancing techniques among neighbouring transformers to maximize the total number of EVs satisfied with a minimum charging cost, while minimizing the overall peak load.

## 3.2 Gestion de la charge

### 3.2.1 Résumé

Ce travail est en cours de soumission dans la revue IEEE Transactions on Smart Grid. Il s'intitule «Dynamic Scheduling Algorithm and Load Management Technique for EVs charging ». Dans ce papier qui est une extension des deux articles (IEEE ICC 2013 [46] et IEEE Globecom 2014 [78]), nous proposons une technique de gestion de la charge pour permettre le contrôle des coûts de l'énergie au fil du temps et d'ajuster la charge des VEs à domicile.

On s'intéresse à la grande variation de la consommation d'énergie qui a un impact majeur sur le profil de la charge à domicile des VEs en même temps que la consommation d'énergie qui ne cesse d'augmenter. Pour résoudre ce problème, une technique de gestion de la charge devra être adoptée pour profiter de la variation des coûts d'énergie et d'améliorer la stabilisation du réseau. Pour notre étude, l'ajustement du profile de la charge à domicile des VEs peut être fait suivant plusieurs stratégies, par exemple avec la réduction de pic de charge. L'objectif est d'aplatir la courbe de consommation autant que possible pour ne pas effectuer seulement l'optimisation des coûts de recharge des VEs mais aussi pour améliorer la stabilité du réseau. L'idée principale est basée sur l'exploitation de l'information décrivant le niveau de priorité de recharge pour chaque VE qui est communiqué à la grille intelligente au début de branchement de VE au secteur électrique. En effet, si un VE a une priorité faible, la grille peut le solliciter à vendre sa charge stockée.

### 3.2.2 Abstract

In the context of massive EVs penetration, the smart grid will be solicited to satisfy high power demands. To deal with this problem, efficient power charge scheduling techniques are required. In this paper, an EV load management (LM) protocol for green home EV is introduced. This protocol is based on dynamic EV charging and discharging process during

the night period. We first address the problem of EVs charging at home by adopting an appropriate charging process protocol. Second, we propose to coordinate charging and discharging processes to improve the cost optimization and grid stability. The proposed EV load management protocol is aimed at minimizing peak loads on distribution feeders due to multiple EVs charging while using time of use pricing (TOUP). An analytical formulation for the EV charging and discharging problems is given. The simulation results showed the performance of our proposed LM technique in terms of EVs cost charging optimisation and grid stability while satisfying the defined constraints.

Keywords - EV; scheduling; smart grid; LM; priority level; V2G.

### 3.2.3 Introduction

One of the main priorities taken in these last few years is the global warming. A candidate solution to address this issue is to develop and promote hydroelectricity for global industry and especially for public transport such as Electric Vehicles (EVs). As a result to this solution, the EVs interface with smart grid poses an important challenge [33, 34]. In fact, the load introduced by EVs charging operations will be one of the most important challenging issues for demand response systems in the smart grid especially for high EV penetration.

The EV adaptation to electricity power and smart grid functionalities will become of special interest where the energy available will be not only limited but also fluctuating. Moreover, the efficient energy management for EVs supply will become central to achieving efficient operations of the smart grid. For this end, advanced scheduling algorithms, seen as a part of Vehicle-to-Grid (V2G) interaction [35, 21, 36], are necessary. Integrated into the smart grid, these algorithms should enable the reaching of particular objectives such as the grid stabilization (i.e., regulation service) by reducing the power fluctuation and controlling the charging procedure by infrastructure and vehicles. Due to the importance of the power load practice, it is evident that the future V2G interface has to offer the capability to manage the load wisely according to the power demand or price variation, and to provide smart functionalities to improve the EV charging process. For residential load management in general, the smart grid typically will use three types of strategies [8, 38]: 1) reducing peaks by disabling low priority loads when necessary, 2) shifting peaks by moving some loads past peak times occurrences; and 3) valley filling strategies which schedule low priority loads at times where the cost of energy is lower or at its lowest.



In this work, we propose a dynamic scheduling protocol for EVs charging with a Load Management (LM) technique. The scheduling protocol integrates a load management technique with a valley filling strategy. This allows the grid to alleviate the load at peak periods while letting EVs take advantage of lower power prices. The scheme also lets EVs provide the grid with some of their stored power when the power demand is high and power prices can be twice as high as those of off-peak hours. Moreover, since some EVs may have diverse application descriptions (e.g. emergency vehicle, security vehicle, etc.) while using the same charging service, the priority of each EV application is an important parameter to consider in the load scheduling process. Therefore the proposed scheme is an optimized scheduling process integrating an LM technique with varying prices, which takes into account the individual EVs charging priority information during the plug-in phase for charge scheduling. This information is also exploited by the smart grid to take advantage, when necessary, of the power charge stored in batteries of EVs with low charging priority.

Our contributions are: 1) we present a formulation of the scheduling problem with load management that takes into account variable prices for charging at a given scheduling interval, with a random arrival of vehicles accepting each some maximum price for charging; 2) we propose a scheduling mechanism that addresses the defined constraints; 3) we formulate our EV load management technique to provide electricity to grid at peak loading period and improve its stability by the scheduling of EV charging and discharging process ; and 4) we perform a simulations study to show the performance of our proposed LM technique in terms of EVs cost charging optimisation and grid stability.

The remainder of the paper is organized as follows. Subsection 3.2.4 presents related work review. In subsection 3.2.5, we formulate a system for home EVs charging and discharging processes, and we solve its corresponding electricity load scheduling problem with time-of-use pricing variation. The complexity analysis is presented in subsection 3.2.6. The performance evaluation of the proposed scheduling algorithm and LM technique in terms of load cost optimization and grid stability are presented in subsection 3.2.7. Finally, subsection 3.2.8 concludes the paper.

### 3.2.4 Related work

In this section, we are interested in some references dealing with two themes: 1) the load management techniques and 2) the EVs scheduling consumption. For the first one, the authors in [42, 43] discuss a direct load control (DLC) scheme for residential load control as an

essential smart grid functionality. These works do not consider the EV charging/discharging process constraints. The work [44] presents a smart grid incentive based energy consumption controlling scheme for home appliances. Other works, such as [45], address the problem of the global peak loads reduction by home appliances scheduling to enable the demand side management. This work does not consider EV charging-discharging process mainly when the EV battery, which can provide further flexibility for optimization of its consumption across time, can be discharged to serve other electric appliances. The load-shaving technique in smart homes is addressed in [11] to improve the smart grid efficiency and a scheduling algorithm is developed for peak-load shaving. Nevertheless, EVs as home appliance are not taken into account in this technique.

For the second theme, recent researches in [9, 25, 37] propose a decentralized charging control algorithm to schedule charging for large populations of EVs without considering Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) characteristics such as plug-in level 1, 2 or 3 in public power supply or at home. The work in [8] presents smart energy control strategies for residential charging of EVs, aiming to minimize peak loads and flatten the overall load profile. However, dynamic EV power loading situations were not studied, especially EVs random initial power distribution. Other works, such as [38], address the problem of scheduling and optimization of electric power management but not in the context of EVs charging.

The dynamic scheduling protocol for EVs charging at home shown and studied in [46] is aimed at minimizing peak loads on distribution feeders due to multiple EVs charging while using a Time-Of-Use Pricing (TOUP). This scheduling algorithm [46] presents several advantages; satisfying each EV charging demand under TOUP constraints during the night period and lowering peak loads.

Nevertheless, this charging protocol [46] in its current version has no mechanism that guarantees good grid stability in terms of peak loads demand where the plug-in EV number is high and it doesn't introduce any load fluctuation reduction or regulation service procedure. As a result, a load management technique, mainly in peak loading period where the power price and demand are twice expected to be high, can be taken into account in the charging algorithm presented in [46]. Moreover, EVs may have diverse application descriptions for the same loading service, and thus require a service loading affinity to alleviate the stress in power grid under peak demand. The priority of each EV application is an important parameter to consider in the loading process and to take advantage from it.

In this work, we present a system for EV loads based on dynamic charging and discharging processes to take advantage of peak and off-peak hours without forgetting the priority level of each EV which is susceptible to sell its charge. We take into account several constraints such as random arrival of vehicles, random initial value of EVs state of charge (SoC ) and random EVs priority. Furthermore, realistic plug-in socket type1 characteristics are used.

### 3.2.5 EV charging and discharging formulation

In this section, we present a theoretical formulation of power load scheduling for EVs charging and discharging processes with some defined constraints related to realistic situations of EVs charging process. Table.1 shows the parameters considered to represent EVs charging and discharging process.

We assume that all homes are equipped by an Advanced Metering Infrastructure (AMI), and we assume that a charging communication service initialisation was established between smart grid and EVs via a two-way communication scheme.

We consider that the scheduling time interval is bounded (e.g., night time between 6pm and 6am). Each vehicle has accepted some maximum charging price for the charging service and the initial charge of each vehicle prior to plug is random between 0% and 100 %. The arrival time of each of the vehicles at their charging stations is also supposed random. Table 3.2 includes the definitions of variables used in the paper.

We assume a neighbourhood with a set  $N$  of vehicles that consume electricity and are connected to the same transformer. We consider that the entire scheduling time interval is finite (e.g., at night) and is divided into  $T$  sub-intervals (for example 12 sub-intervals each of which has one hour duration). The smart meter device determines the starting and finishing charging sub-intervals of each vehicle and also determines the amount of energy consumption of each vehicle at each sub-interval.

For each EV battery, the total energy provided to or drawn from the battery during the night time is given by:

$$x_n = [x_n^1, \dots, x_n^t, \dots, x_n^T], \forall n, t = 1, \dots, T \quad (3.16)$$

As presented in Figure 3.8, the EV SoC for each EV will be

$$SoC_n^t = SoC_n^{t-1} + x_n^t, t = 1, \dots, T \quad (3.17)$$

Table 3. 2- Notation for our EV charging discharging model

Notation	Description
$N$	EV number
$T$	The number of sub-intervals of the entire scheduling time interval (e.g., at night)
$[S_n; F_n]$	The schedulable interval for EV
$\gamma_t$	The unit TOUP model price for energy consumption in each sub-interval $t$ (i.e., $\forall t \in [1, T]$ ).
$x_n^t$	The energy provided to or drawn from the battery
$x_n^{max}$	Maximum value for energy consumption
$x_n^{min}$	Minimum value for energy consumption
$C_n$	Energy consumption minimum threshold.
$x_n^{ch}$	The maximum charge rate
$ x_n^{dis} $	The maximum discharge rate
$SoC$	The state of charge of any EV
$\xi_n$	The efficiency parameter
$\overline{SoC}$	$1 - SoC$
$\overline{New\_SoC}$	State of charge needed after a new EV plugged-in

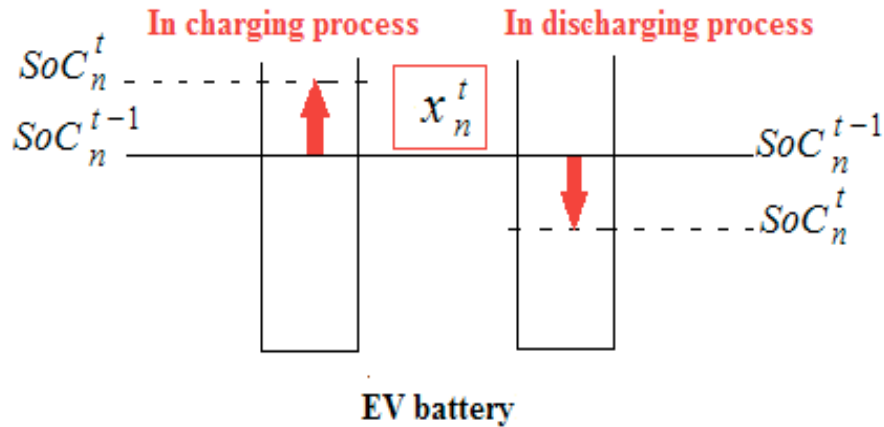


Figure 3. 8- EV charging and discharging model

Figure 3.8 describes the proposed charging and discharging model. The TOUP pricing model is used in which the unit price for energy, denoted as  $\gamma_t$ , varies in each sub-interval  $t$ . For the entire scheduling interval, we assume that all  $\gamma_t$  (i.e.,  $\forall t \in [1, T]$ ) are known to the scheduler in advance.

In the following, we consider EVs power selling with EV discharging process based on the formulation of power load scheduling for EV charging model presented in previous section. This strategy of coordinating the charging and discharging process of EVs is seen as a load management technique to enable the energy cost monitoring over time and to adjust the home EVs load. The LM technique is based on using of EVs priority level which is communicated to smart grid in the beginning of plug-in phase.

We propose a load management technique to enable the energy cost monitoring over time and to adjust the home EV load.

We focused on large variation of the power consumption that has a major impact on the home EV load at the same time as the energy consumption continues to increase. To solve this problem, a load management technique is adopted to take advantage of low energy cost and to improve the grid stabilization. For our study, the home EV load shape adjustment can be done by many strategies, such as peak reduction and peak shifting. The objective is to flatten the consumption curve as much as possible not only to perform EVs cost optimization but also to improve grid stability.

The main idea is based on using the individual EV charging priority information which is communicated to smart grid in the beginning of plug-in, to exploit the charge stored in EV battery with low charging priority.

We consider the following assumptions:

- Each EV sends its priority level to be fully charged to smart grid in the beginning of its plug-in.
- The load shifting technique is considered.

The LM technique is based on the same parameter used in the EV charging process  $x_n^t$  which is the amount of energy consumption of EV  $n$  in the charging process and which represents also the energy drawn from EV  $n$  in the discharging process during sub-interval  $t$  (see figure 1).

The instantaneous EV SoC for each EV will be

$$SoC_n^t = SoC_n^{t-1} + x_n^t, t = 1, \dots, T \quad (3.18)$$

where  $x_n^{t(t=1 \dots T)}$  is limited by the maximum charge  $x_n^{ch} > 0$  and discharge  $x_n^{dis} < 0$  rates, i.e.,

$$x_n^{dis} \leq x_n^t \leq x_n^{ch}, \quad \forall n, \quad t = 1, \dots, T \quad (3.219)$$

Each battery has an efficiency parameter  $\xi_n \in (0, 1)$  and the EV discharging energy at slot time  $t$  is limited by

$$x_n^t \geq -\xi_n SoC_n^{t-1}, \forall n, t = 1, \dots, T \quad (3.20)$$

This means that if EV is in the charging process, then the efficiency parameter

$$\xi_n = 0 \text{ and } x_n^t \geq 0, \quad (3.21)$$

otherwise (i.e., if EV is in the discharging process), the efficiency parameter

$$\xi_n = 1 \text{ and } x_n^t \geq -SoC_n^{t-1} \quad (3.22)$$

The total state of charge according to the energy consumption scheduling vector of each vehicle  $n$  is

$$SoC_n = [SoC_n^1 + x_n^1, \dots, SoC_n^{t-1} + x_n^t, \dots, SoC_n^{T-1} + x_n^T], \quad (3.23)$$

$\forall n, t = 1, \dots, T$

where

$$-SoC_n^{t-1} \leq x_n^t, \quad \forall n, 1 \leq t \leq T$$

and the total energy cost for each vehicle is

$$E_T^{New}(x_n) = \sum_{x_n^t \geq 0} \gamma_t x_n^t - \sum_{x_n^t \leq 0} \gamma_t |x_n^t| \quad (3.24)$$

subject to  $x_n^{dis} \leq x_n^t \leq x_n^{ch}, \quad \forall n, 1 \leq t \leq T$

$$x_n^{min} \leq x_n^t \leq x_n^{max}, \quad \forall n, S_n \leq t \leq F_n$$

$$x_n^t \geq -\xi_n x_n^{t-1}, \quad \xi_n \in (0, 1)$$

According to the cost formulation given by Eq.(3.24), we have to solve the following :

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{x_n^t \geq 0} \gamma_t x_n^t - \sum_{x_n^t \leq 0} \gamma_t |x_n^t| \right\} \quad (3.25)$$

As previously, note that our formulation is valid when there is no constraint on the aggregate power demand to the grid.

The purpose of this theoretical study is to model the scheduling of EV charging and rescheduling of EV discharging process of connected EVs. Eq. (3.25) is composed by two

important terms: the first one (i.e.,  $\sum_{x_n^t \geq 0} \gamma_t x_n^t$ ) describes the loading power cost provided to the EV battery where optimisation algorithm presented in previous section and noted in this part by algorithm I (see 3.1.6) is proposed to resolve this problem. The second term (i.e.,  $\sum_{x_n^t \leq 0} \gamma_t |x_n^t|$ ) describes the cost of the power drawn from the EV battery, during the night time. To solve equation (3.18-3.25), we use the algorithm II.

---

**Algorithm II . EV load management protocol**

---

**Input:** price profile, sub-intervals [S,F], utility function(U),

EVs\_priority,  $\xi_n$ ,  $x_n^{ch}$ ,  $|x_n^{dis}|$ , Peak (Load )

Time\_Slot =5 min, N\_Slot= 144, T=12 hours

**Output:**  $x_n^t$ , /\* EV energy consumption \*/

---

1. **For** Slot=1 to N\_Slot do
2. Smart grid broadcasts the electricity price profile
3. EV sends to the smart grid its profile  
(priority (HP or LP),  $[S_n; F_n]$ ,  $x_n^{max}$ ,  $x_n^{min}$ , SoC) /\* EV profile \*/
4. Smart grid calculate  $_{New} \overline{SoC} = \sum_{EV} \overline{SoC}$  /\* update power profile needed by all EVs\*/
5. **If**  $_{New} \overline{SoC} \geq Peak (Load)$
6. **Then**  
Discharging EV with LP level  
Charging EV with HP level (**Algorithm I**)
7. **Else** Charging all EVs (LP or HP) (**Algorithm I**)
8. **End if**
9. **EndFor**

---

To better explain our LM technique, we take as example a scenario of EVs with random priority level (H, L). Figures 3.9 and 3.10 show EV states at each time step for high and low

EV priority, respectively. Indeed, according to the EV priority level, any EV plug-in will be in one of the following three (3) states:

- Idle: the EV is not in charging or in discharging state
- Char: the EV is in the charging state
- Dis: the EV is in the discharging state

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
State	Idle	Idle	char	char	char	char	Idle	Idle	char	char	char	Idle

**char** : EV in charging process

**Idle** : EV isn't in charging or in discharging process

Figure 3. 9 - High priority EV states at each time step

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
State	dis	dis	char	char	char	char	dis	dis	char	char	char	dis

**dis** : EV in discharging process

**char** : EV in charging process

Figure 3. 9- Low priority EV states at each time step

### 3.2.6 Complexity analysis

In our LM technique, we aim at a fair scheduling of EVs based on the arrival of requests for service to the smart grid, and on the priority of the requesting EVs. The fair scheduling of EVs charging and discharging is performed according to the priority disciplines. The first come first served (FCFS) method is adopted, where the EVs arriving with the same priority are treated in the order of arrival.

From the description of our two algorithms; the scheduling algorithm for charging process (Algorithm I) and the scheduling for charging and discharging process one (Algorithm II), we can see that the complexity is in the order of  $O(n)$ .

Figure 3.11 shows the exchange of information between the grid (scheduling & load management controller) and each EV during the real-time operation. This takes advantage of the communication capability of the smart grid. Indeed, when the price is low, all EVs will be charged if they are not full already; otherwise (i.e., the price is high), only EVs with high priority level will be charged and the others EVs (with low priority level) will be discharged if they are already not empty.



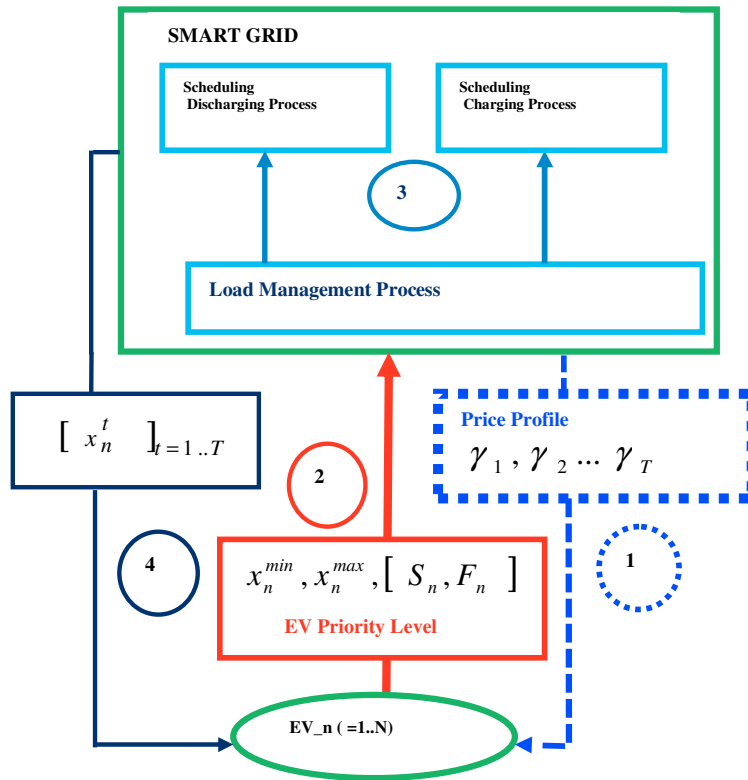


Figure 3. 10- Schematic view of information flow patterns between the smart grid and EVs by considering our LM technique for EV loads Algorithm II

Figure 3.11 shows that the grid begins by broadcasting the price profile  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_T$  to all connected EVs (step 1). As a response to the grid, each EV sends its loading interval, the maximum and minimum power demand as given respectively by eq.(3.18) and eq.(3.19), and its priority level (step 2). After receiving all inputs data from EVs and running Algorithm II (step 3), the smart grid sends for each EV its energy consumption scheduling vector which is highlighted by the dark blue color (step 4).

### 3.2.7 Illustrative results

In this section, simulation results and discussion are presented to highlight the performance of our charging algorithm and LM technique.

We used MATLAB to perform the simulations. We adopted function  $U(x) = \log(x+1)$  as an utility function for vehicles [37]. The price variation model is very important in such case study. Research findings [27] indicated that compared to others models, TOUP provides more incentives for customers to shift load to the less expensive hours. Thereby, we use the TOUP model in the simulations.

In the simulations, a number of vehicles (100-1000) plugged in via EV charging equipment Level1. The duration of the charging period is 12 hours. The parameters for each vehicle are generated randomly. Indeed the starting time ( $s_n$ ) is generated with a uniform distribution between sub-intervals 1 and 12, the finishing time ( $F_n$ ) is generated with a uniform distribution between sub-intervals  $s_n$  and 12; the maximum power consumption ( $x_n^{max}$ ) is generated with a uniform distribution between 0 and 100 % of charge ; and the threshold ( $C_n$ ) is generated with a uniform distribution between 0 and  $L_n \times U_n(x_n^{max})$ . The constraint  $\gamma_{(t)}$  is generated according to the TOUP model.

To illustrate the behavior of our LM technique, we consider the simulation conditions given by Table 4.2. We assume that all EVs communicate its charging priority level in the beginning of plug-in, to smart grid. We assume that the smart grid updates the profiles of EVs plugged-in and runs Algorithm II periodically every 5 minutes during the night period. Thus, an EV can be in charging or discharging mode according to its priority level communicated before to smart grid, in 5 minutes after its plug-in phase.

Figure 3.12 illustrates the optimal schedules for charging and discharging processes for four (4) EVs which are plug-in at the night period by running the Algorithms I and II. The power consumption for each EV is highlighted by continuous blue and green curves, respectively, for EV scheduling for charging process (Algorithm I) and EV charging and discharging process (Algorithm II). The time to use pricing variation is highlighted by the dashed (red) curve. We remark that the EV power consumption curves follow inversely the price variation. Moreover, considering the discharging process, each EV can provide power to the smart grid mainly for high level price.

Table 3. 3- Simulation condition

Parameter	Value
$x_n^{\max}$	3.1 kW
$x_n^{ch}$	0.5kWh
$x_n^{dis}$	-0.5kWh
$\xi_n$	0.95, 0.9, 0.85
$x_n^{\min}$	1 kWh
$N$	100 et 1000 EV
$T$	12 hours
Time_Slot	5 min
$N\_Slot,$	12*12=144
Priority level HP/LP	Uniform distribution

Thereafter, we study the influence of the number of EVs on the performance of the Algorithms I and II. We consider two scenarios: 50 homes (for scenario 1) and 500 homes (for scenario 2), each of which there are two EVs plugged in. The transformer is maintained with its acceptable operating limit and can allow a simultaneous loading of 100 EVs (for scenario 1) and 1000 EVs (for scenario 2). We compare the outcome of our charging algorithm without the LM technique (algorithm I) with the LM technique (algorithm II). We assume that an EV always consumes the energy with its maximum power limit until its performance threshold is satisfied. The simulations were run 50 times and we took the average power consumption at each sub-interval, using the TOUP price model, overnight time.

We assume that all EVs communicate its charging priority level in the beginning of plug-in, to smart grid. Two EV groups are considered: the first group includes EVs with high level charging priority and they have to be charged even if the price is high. The second one is composed by EVs with low level charging priority and they choose the lowest price period to be charged. The EVs of this second group can sell its stored power when the price becomes high. Thereby, they can save money when they consume and sell power, respectively, at low and high price time.

Figure 3.13 shows an example of random distributions of EVs charging and discharging process considering TOUP price model. The continuous (blue) curve in this figure represents the number of EVs that consume power and the dashed (red) curve indicates the number of

EVs that sell power to grid. It is clear that this selling process of the power to grid starts when the price becomes high and only EVs with low charging priority can achieve this process. For the scenario 1, the outcomes of our charging algorithm without the LM technique (algorithm I) with the LM technique (algorithm II) correspond, respectively, to the continuous (green) and dashed (blue) curve in figures 3.14 and 3.15. We observe from these figures that the average power consumption is still sensitive to the price variation. It is shown that with our LM technique, the grid manages more efficiently the power distribution compared to the outcome of our EV scheduling for charging process. Indeed, by running the Algorithm I, we remark in figure 3.15 that there are periods of time (for example between 8:00 and 9:00) where EVs are almost off. These same EVs become active (i.e., in a discharging state) in the same periods of time by running the Algorithm II. In addition to its noncomplex scheduling operation, our LM technique consumes relatively more power when the electricity price is relatively low and provides electricity to grid via an EV discharging process applied to EVs which are low priority level charging.

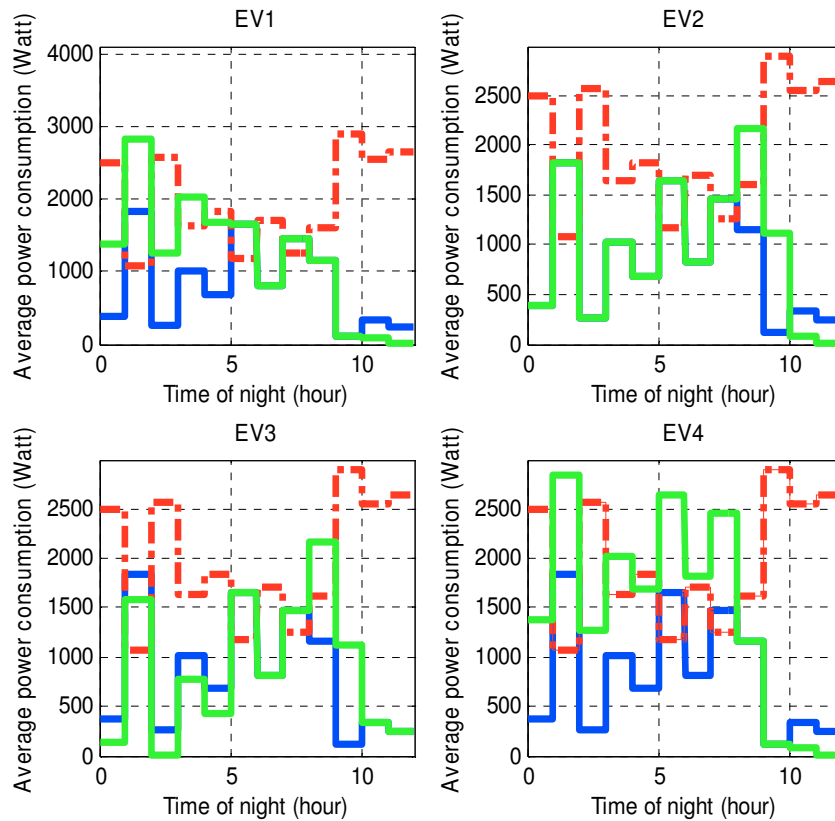


Figure 3. 11-The optimal schedules for EVs charging and discharging process

Table 3.4 presents the observation results obtained from figure 3.15, which illustrates the performance comparison between our algorithm I and II in terms of load variation considering TOUP model. It is clear that our LM technique can improve the average load with a saving rate more than 7% by increasing the average load compared to the outcome of our EV scheduling for charging process. The simulation results show that our LM technique is indeed beneficial to EV owners and utility companies. EV owner achieves an important cost savings when buying electricity with low price and selling it in high price periods, while archiving a substantial saving by considering the scheduling with peak loads reduction.

For the second scenario, we consider a new scenario where the number of EVs is around 1000. We show an example of random distribution of plug-in EV number with high priority variation in each time period is given by figure 3.16.

The outcome of the Algorithm I compared to our LM technique considering TOUP model with 1000 EVs plug in, corresponds, respectively, to the continuous (green) and dashed (blue) curve in figures 3.17 and 3.18. In addition to the remarks described in the first scenario of 100 EVs, we observe from figures 3.17 and 3.18 that the performance of our LM technique is significantly higher compared with our EV scheduling for charging process.

Table 3.5 summarizes the observation results obtained from figure 3.18. We observe that with increasing the plug-in EVs number, our LM technique can improve the average load with a saving rate more than 40.4% compared to the outcome of our Algorithm I. This result confirms that this technique improves the grid stability by injecting electric power in the smart grid which reduces the peak demands.

### 3.2.8 Conclusion

This paper proposes a dynamic scheduling algorithm for EVs charging at home with load management technique considering TOUP price model. Two principal constraints are taken into account: 1) satisfying single EV charging demands under-price constraint and 2) judiciously managing the energy load by shifting the load of low priority vehicles, out of peak loading periods and taking advantage of the power stored in battery of low priority EV. Numeric results for realistic EV characteristics and home station charging models (socket level 1) show that the proposed scheduling algorithm manages the charging process in an efficient way. Furthermore, the simulation results show that our coordinating charging and discharging process can reduce the cost of EV ownership to consumers by saving money when EV consumes energy with low price and sells it with high price, and can also improve

the grid stability. In addition, by increasing the plug-in EVs number, the performance in terms of grid stability of our LM technique increases.

Our LM technique implementation requires low computation capability and could be used with additional constraints. It can be seen as a solution to improve the EVs charging cost reduction in terms of peak loading, to compensate power fluctuation and to improve the grid stabilization (i.e., regulation service especially when the price and demand are high). Our solution could also be extended to include load balancing techniques used between neighbour transformers to improve the maximum number of EVs satisfied, with minimum charging cost constraint, during the charging periods.

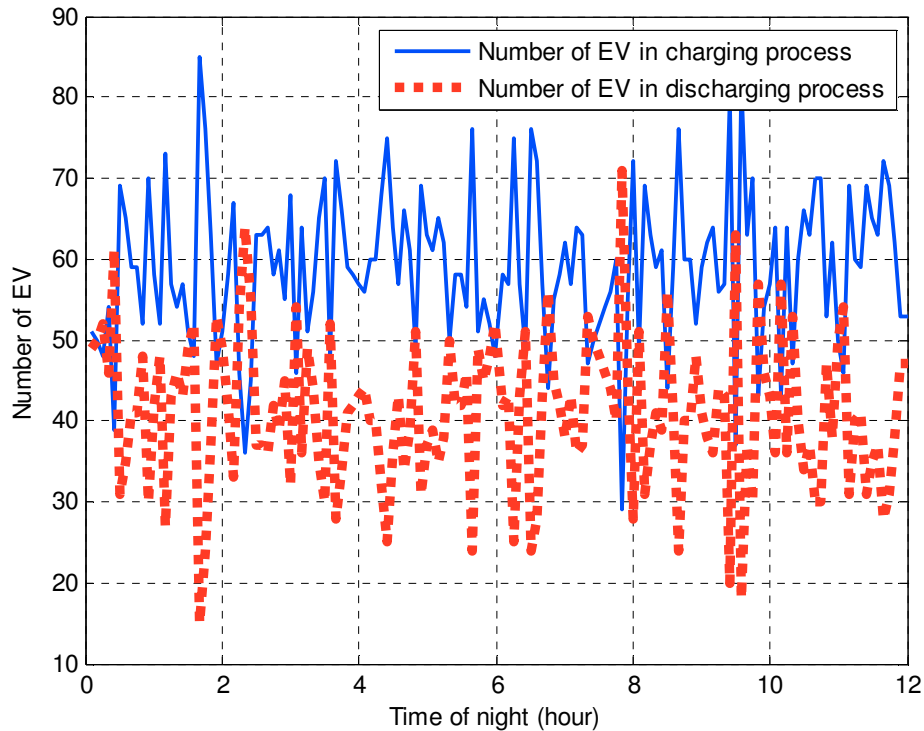


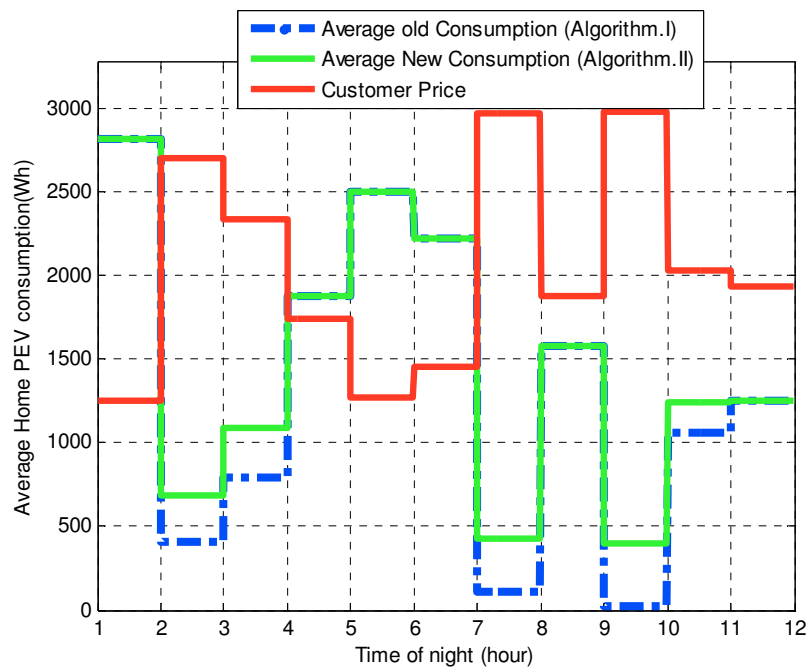
Figure 3.12- Random distribution of EVs in charging and discharging process

Table 3.4- Comparison of home PEV consumption with LM case (100 EVs, TOUP model)

	Maximum average load (kW)	Minimum average load (kW)	Average load (kW)
Algorithm I	2.812	0.027	1.341
Algorithm II	2.812	0.394	1.452

**Table 3. 5-Comparison of home PEV consumption with LM case (1000 EVs, TOUP model)**

	Maximum load (kW)	Minimum load (kW)	Average load (kW)
Algorithm I	2.612	0.063	1.15
Algorithm II	3.004	0.9	1.930



**Figure 3. 13- Home EVs Consumption patterns (100 EVs)**

### 3.3 Conclusion

Ce chapitre traite des modèles d’interactions entre la grille intelligente et les VEs dans un milieu résidentiel. Premièrement, on a proposé un algorithme d’ordonnancement dynamique pour la recharge des VEs dans un milieu résidentiel à prix d’électricité variable selon le temps d’utilisation (TOUP). Deuxièmement, comme extension de la première partie, on a proposé une technique de gestion de la charge pour permettre le contrôle des coûts de l’énergie au fil du temps et d’ajuster la charge des VEs à domicile. Le but recherché dans ce chapitre est de satisfaire les demandes des VEs en électricité tout en gardant un niveau de stabilité de la grille acceptable.

Dans le chapitre qui suit, on va étudier un autre type d'interaction entre les VE et la grille dans un milieu public. En effet, on proposera un modèle où les VE, depuis qu'ils sont encore en route, communiquent au préalable leurs profils de charge initiaux à la grille intelligente.

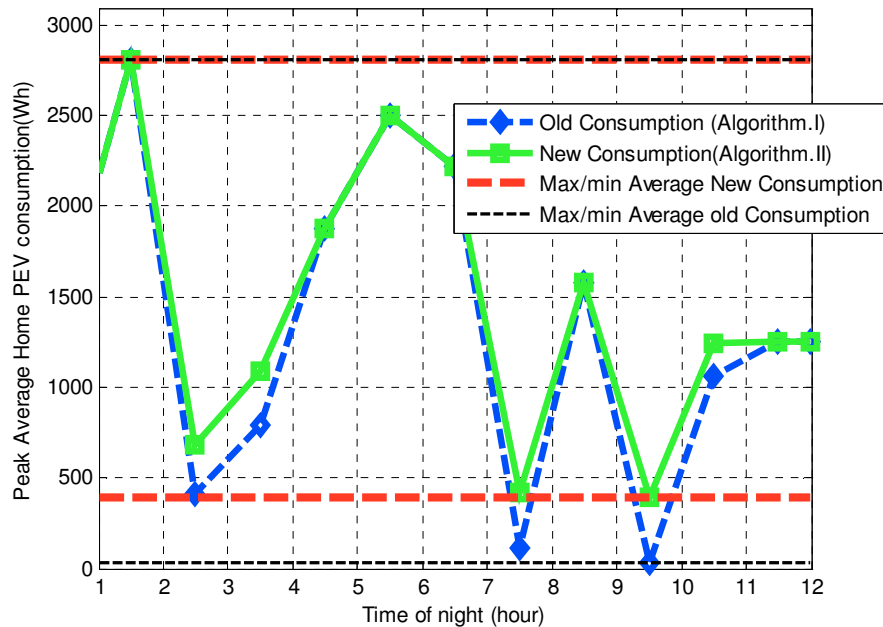


Figure 3. 14- Peak average home EVs Consumption patterns (100 EVs)

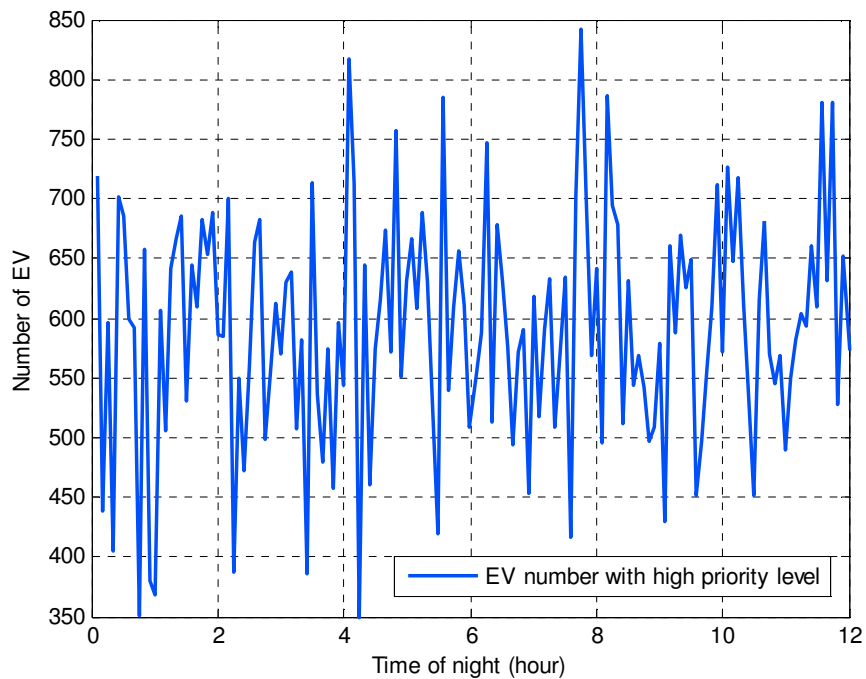




Figure 3. 15- Random distribution of EVs in charging process

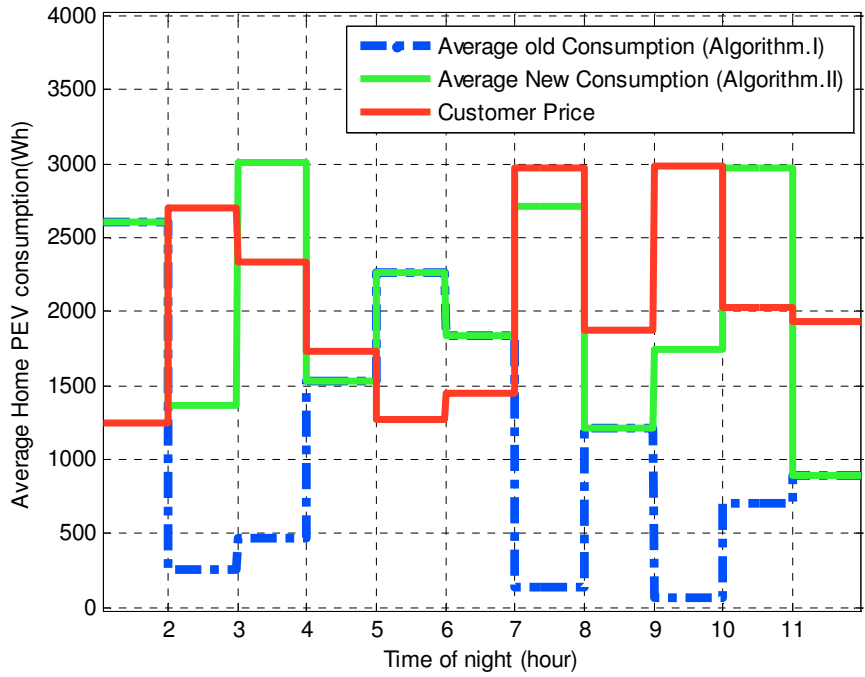


Figure 3. 16- Home EVs Consumption patterns (1000 EVs)

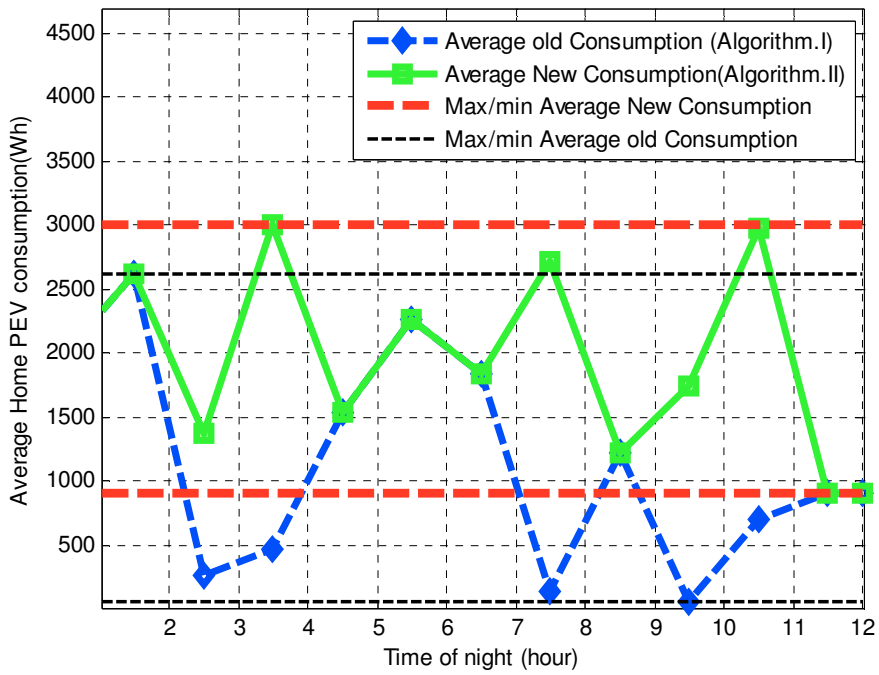


Figure 3. 17- Peak average home EVs Consumption patterns (1000 EVs)

# CHAPITRE 4 INTERACTION DES VEs AVEC LA GRILLE DANS UN MILIEU PUBLIC

## 4.1 Résumé

Ce travail a été publié dans la revue *Wireless Communications & Mobile Computing-WCM* 2014 [79]. Il s'intitule « Multi-Priority Queuing for EVs Charging at Public Supply Stations with Price Variation ».

Ce papier journal est une extension d'un papier conférence qui s'intitule « Queuing model for EVs Charging at public supply stations » qui a été présenté dans la conférence *IEEE IWCMC* [80].

Dans cette contribution, on aborde une approche qui permet d'équilibrer la charge entre les bornes de recharge dans une station publique de recharge des VEs tout en minimisant le temps de charge pour chaque VE. En effet, on propose un modèle où les VEs, depuis qu'ils sont encore en route, communiquent au préalable leurs profils de charge initiales à la grille intelligente. Ce modèle qui permet de traiter des demandes de recharge des VEs dans une station de charge publique, est basé sur la théorie des chaînes de Markov et les files d'attente. Un algorithme est conçu pour diriger les VEs aux stations de recharge de manière à minimiser le temps d'attente pour achever le chargement.

## 4.2 Abstract

As electric vehicles (EVs) become more popular, public charging stations for such vehicles will become common. Since the load introduced by such stations on the grid is high, the smart grid will need to balance the load among charging stations in an area while minimizing the charging waiting time. To achieve this goal, we propose two models where vehicles communicate beforehand with the grid to convey information about their charging need and location. In the first model, we develop a mathematical formalism for handling requests for charging vehicles at public charging station based on queuing theory. The second model extends the first one by considering priority queues with two EV classes, high and low, and a cut-off service discipline. Both models are evaluated while considering mobility of vehicles in

an urban scenario and time-of-use-pricing (TOUP). Finally, we propose two algorithms for directing vehicles to charging stations in a way to minimize either their waiting time to plug-in or their waiting time to charge completion. Simulation results show the effectiveness of the proposed approaches when considering both real EV and charging station characteristics and constraints.

Keywords- V2G, EV, charging time, waiting time, smart grid.

### 4.3 Introduction

Electric Vehicles (EVs) are increasingly becoming popular as a result of many factors among which the concern of many road users with greenhouse emissions, and the recent advances in EVs engineering that made them more performing. The popularity of EVs is expected to grow even more in the next years as we see municipalities adopting the technology for their public transportation fleets and with charging stations made available at many public parking areas. A large adoption of EVs poses, however, many challenges from the point of view of electricity demand management. In fact, EVs charging operations will be one of the most challenging issues for demand response systems in the smart grid [35]. This is because the load introduced by the charging of one vehicle in a neighborhood may be equivalent to the one of an entire new household in the area [49].

The vehicle-to-grid (V2G) interface within the smart grid has to offer the capability to manage the charging load of EVs wisely both according to demand and by providing smart functionalities to improve EV charging process experience for users [29, 50]. One of the most challenging issues in EVs charging management is how to satisfy EVs demand adequately, to meet users' expectations, in all grid situations while ensuring grid stability. EV charging process has to be managed in a way to ensure grid operation efficiency, especially at peak load times, while lowering charging times for EVs to maintain users' satisfaction.

Charging time is an important factor to consider from the users' point of view, because charging an EV takes considerably longer than a regular vehicle, i.e. tens of minutes at least [35]. The charging time is composed of two parameters: the waiting time and the service time, which in turn depends on the EV state of charge (SoC) needed. Given a SoC, the service time will only depend on the type of electric vehicle supply equipment (EVSE) (charging stations) used. The waiting time is thus a factor that has to be reduced in each EV public supply station (EVPSS), and therefore, scheduling the charging of EVs at available stations in a way to minimize their waiting time is a key to achieving users' satisfaction.

In this work, we consider the problem of EVs charging time optimization in EVPSS using queuing model techniques. In particular, we propose an optimized charging process for electric vehicles at EVPSS when the load demand is expected to be high. For this, we consider a model where EVs communicate to the smart grid their individual EV charging demand information before the plug-in phase, i.e. while the EVs are on the road side, to allow the grid to manage adequately their charging process.

**Our contributions** in this paper are three fold. 1) We present two analytical formulations of the EV charging problem. The first one is based on a multi-service queuing model. This model takes into account a number of constraints including the number of EVPSS with their charging capacity, the arrival process of vehicles with their initial SoC, and the vehicles required charge level at the end of the process. The second mode is an extension of the first one. It is based on cut-off priority queuing and considers a realistic mobility model with an EV priority level added to the constraints considered in the first model. 2) We also propose two algorithms: the first, called Best Available EVPSS (BA-EVPSS), is used for assigning vehicles to EVPSS based on the defined constraints and supposes prior EV/smart grid communication when EVs are on road; the second algorithm, called Advanced BA-EVPSS, takes into account a realistic mobility scenario with a TOUP price variation. This algorithm can be used by the smart grid not only to satisfy EVs demand, but also to further grid stability. 3) Finally, we demonstrate that the proposed algorithms can effectively manage EVs charging demand within the defined constraints while considering realistic EV charging characteristics.

The remainder of the paper is organized as follows. In section 4.4, we present the related work. We formulate a multi-server queuing model of EVs charging process in section 4.5. EVs charging time and EVs waiting time when considering a queuing model for multi-EVPSS are analyzed in section 4.6. In section 4.7, we present our multi-server priority queuing model. The cut-off discipline description of EVs queues is formulated in section 4.8 and fairness and complexity analysis are presented in section 4.9. The performance evaluation of EVs charging at EVPSS in terms of charging time is presented in section 4.10. Finally, section 4.11 concludes the paper.

## 4.4 Related work

Existing related works can be classified into two classes: 1) Stochastic modeling for EV charging processes, and 2) V2G protocols and standardization for EV/ EVSE communication. In the first class of works, the authors in [49] describe a tool based on a stochastic model for distribution grid planning, which provides a characterization of possible grid operation conditions, voltage profiles, branch loading, grid peak power and energy losses. Lojowska et al. present in [50] a Monte Carlo simulation approach for the derivation of the system load due to EVs based on a model representing real vehicle commuting patterns. In these two works, EVs charging time optimization according to constraints associated with each EV, is not addressed. In [29], an EV charging station is represented using mathematical models to derive the parameters needed for charging stations planning. Nevertheless, parameters such as EVs priority or maximum charging time for each individual EVs are not taken into account in the scheduling process.

In the second class of works, authors in [36] and [33] made a good summary of current standard protocols and related architectures for EV and grid interaction. In [21], the basic principles of standard V2G communication interfaces currently under specification in the ISO/IEC are presented, with a focus on control communication but without a regard to administrative data, especially for V2G integration since EVs are still on the road. In [20], Ruthe et al. present a generic V2G information model allowing mutual charge scheduling negotiations between EVs and grid operators. The work discusses a system model with theoretical concerns without treating a specific charging mode (slow, rapid or fast) as in realistic situations. Moreover, the work does not consider the case where EVs need to communicate with the grid to know the most suitable EVPSS in terms of waiting time and cost.

In this work, we present optimization models of EVs charging process in terms of charging time minimization while taking into account constraints including a random arrival of vehicles with a random initial value of EVs SoC and maximum SoC. Furthermore, realistic EVSE characteristics were used.

## 4.5 M/M/s model of one EV public supply station

In this section, we present a basic queuing theory which will be used to represent our EV charging model with some defined constraints related to realistic situations of EVs charging process.

Figure 4.1 shows the system considered to represent EVs charging process. The input data are the EVs in need of charging and the output data are the EVs with the required SoC. Each EVPSS is considered a multi-server queue with  $S$  identical servers, each operating with an exponential service rate  $\mu$ . The EVs arrival process is assumed to be Poisson with arrival rate  $\lambda$ .

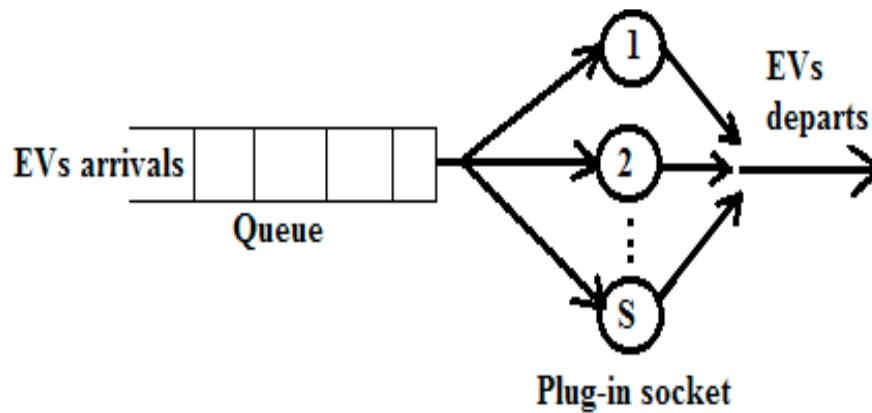


Figure 4. 1- Schematic view of our EV charging model for one EVPSS

In general, every EV that arrives can immediately enter service if there is an available plug-in socket in the EVPSS. If all servers are occupied, then the EV has to wait until a plug-in socket becomes available. The scheduling discipline adopted is first-come-first-serve (FCFS). The number of EVs is assumed to be high.

In principle, any practical queuing process tends to derive its major results with Markov chains [51, 52, 53, 56] by incorporating information in the state description. In this work, each state of the chain corresponds to the number of EVs in the queue, and state transitions occur when new EVs arrive or an EV reaches its required SoC and departs.

We use the birth-death process as a stochastic model to describe the evolution of our system. The state transition diagram is represented in figure 4.2. The model has two cases. The first case is where the number of plugged in EVs plug-in is  $k \leq s$ , the overall completion rate is

then  $k\mu$ . The second case is where the number of plugged-in EVs is  $k \geq s$  and the entire plug-in sockets are occupied and the completion rate is  $s\mu$ .

Definition: a stochastic process with state space

$\xi = \{1, 2, 3, \dots\}$  is said to be a Markov chain [52, 54, 55] if

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_0 = x_0) = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (4.1)$$

Where,  $X_n$  is a random variable that represents the value of the chain at step  $n$ .

The transition probabilities function with time-homogenous is defined as:

$$p(m, m + n) = p_{ij}(0, n) \equiv p_{ij}^{(n)}, \quad \forall m \quad (4.2)$$

and the transition matrix is defined as

$$P = [p_{ij}] \quad (4.3)$$

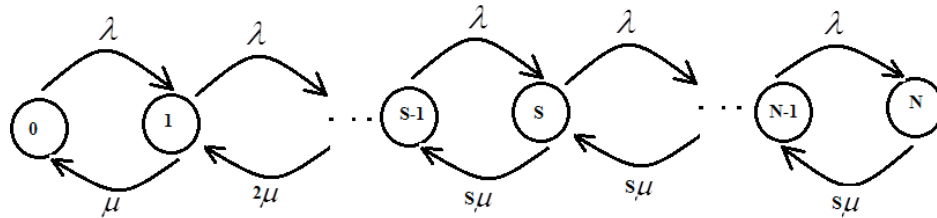


Figure 4. 2- The state transition diagram

Considering the equations and the state transition diagram given above, the correspondent transition matrix is





$$\pi_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^2 \pi_0 \quad (4.8)$$

The balance equation for state 2 is expressed as:

$$(\lambda + 2\mu)\pi_2 = \lambda\pi_1 + 3\mu\pi_3 \quad (4.9)$$

Using Eq. (5) and (6), we obtain:

$$\pi_3 = \frac{1}{3 \cdot 2} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^3 \pi_0 \quad (4.10)$$

The general recursive form of the stationary distribution (state  $k$ ) is:

$$\pi_k = \begin{cases} \frac{1}{k!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \pi_0, & \text{if } k \leq s \\ \left( \frac{1}{s} \right)^{k-s} \frac{1}{s!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \pi_0, & \text{if } k \geq s \end{cases} \quad (4.11)$$

The total probability condition is:

$$\sum_{k=0}^{s-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \pi_0 + \sum_{k=s}^N \left( \frac{1}{s!} \right)^{k-s} \frac{1}{s!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \pi_0 = 1 \quad (4.12)$$

Where  $N$  is the number of states en  $S$  is the number of plug-in in EVPSS.

The  $\pi_0$  expression can be easy derived by simplifying eq. (4.12) as:

$$\pi_0 = \left( \sum_{k=0}^{s-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \sum_{k=s}^N \left( \frac{1}{s!} \right)^{k-s} \frac{1}{s!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \right)^{-1} \quad (4.13)$$

Thus, the behavior of the Markov chain is completely characterized once its transition matrix  $P$ , the transition diagram and the initial condition  $\pi_0$  are given.

The mean queue length is given in [52] by

$$E(L_q) = \sum_{k=S}^N (k - S) \cdot \pi_k \quad (4.14)$$



---

**Algorithm . BA- EVPSS algorithm**

---

**Input:** current EV position, EV SoC,  $P_{EVPSS}$   $\pi_0$ ,

**Output:** @ EVPSS /\*station selected \*/

---

1. EV coordinates and SoC received /\* EV profile received by the smart grid \*/
  2. Calculate for each EVPSS in area, the average queue length and the average waiting time using the matrix  $P_{EVPSS}$  and  

$$E(L_q)_{k=1..m}, E(W_q)_{k=1..m}$$
  3. Assign  $BA - EVPSS = EVPSS\{\min\{E(W_q)\}\}$
  4. Send @ of EVPSS to EV
  5. Update the EVPSS state./\*Smart grid updates EVPSS state\*/
- 

Figure 4.4 shows the exchange of information between the grid and each EV while the EVs are on the road. Initially, each vehicle sends its profile, i.e., position and SoC, to the smart grid. Based on these input data, the smart grid executes the BA-EVPSS algorithm and sends to the EVs the information about the best available EVPSS.

## 4.7 Multi-server-priority queues

The proposed EV charging model process can be enhanced using a multi-server priority queue concept. In this section, we adopt the multi-EVPSS model presented in sections III and IV, and we improve it by including a priority strategy with includes a TOUP pricing model while taking mobility of vehicles. The proposed enhancements will enable energy cost (i.e. price cost) monitoring over time and adjust the EV charging according to the EV charging need and cost constraints.

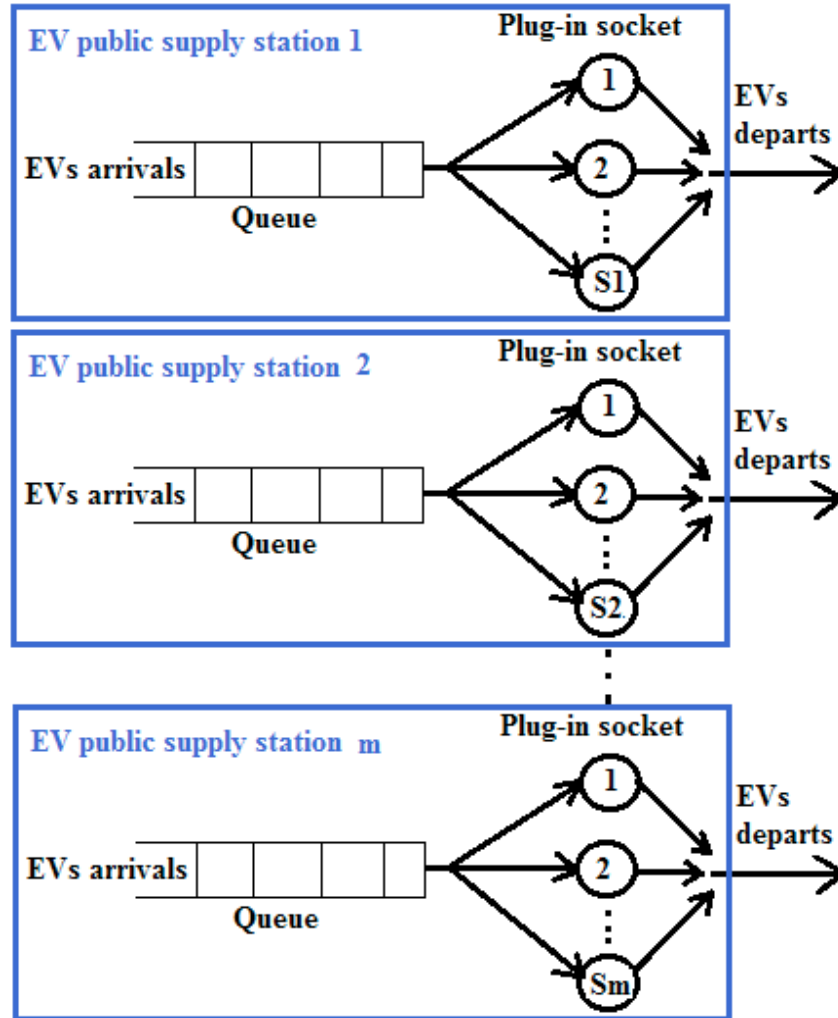


Figure 4. 3- The multi M/M/S queue model

We focused on large variations of the charging time which has a major impact on the effectiveness and cost of the charging process at EV public stations. Our objective is to improve EVs satisfaction in terms of charging service by achieving waiting time reduction and charging cost minimization.

The proposed model is based on using three important parameters; (1) individual EV position, (2) charging priority, and the EV price constraints information, all of which are communicated to the smart grid before the plug-in phase, i.e. while the EVs are on road side.

In the following paragraphs, we present the three (3) models proposed in this work.

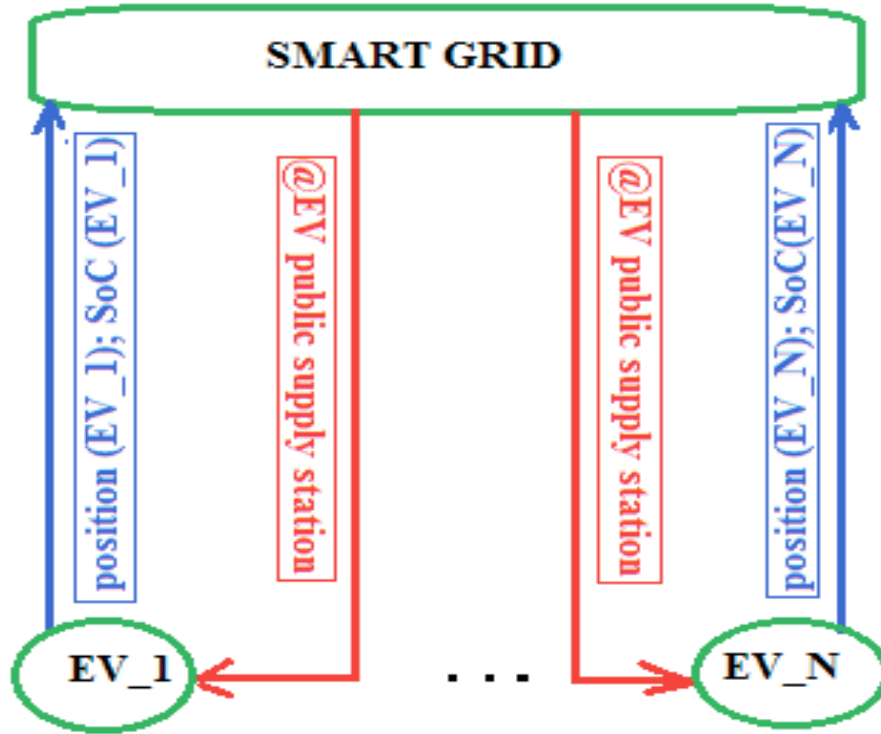


Figure 4.4-Schematic view of information exchange between the smart grid and EVs when considering the B-A EVPSS algorithm

#### 4.7.1 Priority queuing strategy

A priority-based system having separate buffers to accommodate high priority and low priority incoming EVs was adopted as presented in figure 4.5. Indeed, a simple case of two priority classes, high ( $H$ ) and low ( $L$ ) is considered, with respectively an arrival rate  $\lambda_H$  and  $\lambda_L$  and an exponentially distributed sizes the rates  $\mu_H$  and  $\mu_L$ .

Figure 4.5 illustrates a Markov chain of the charging system model, which states the number of high priority and low priority jobs; hence, this chain grows infinitely in two dimensions. Indeed, we observe that high priority jobs simply see an M/M/S queue, and thus their mean delay is well-known. Low priority jobs, however, have access to either an M/M/k ( $k=S..I$ ), or no server at all, depending on the number of high priority jobs. As a result, the low priority class will lead to a large waiting delay.

In order to take into account priority, we will refine our strategy description in section VI taking into account two types of interaction; namely smart grid- EV and smart grid-EVPSS.

#### 4.7.2 TOUP price model use

The price variation model is very important in such case study. In fact, in many research works, various time-differentiated pricing models have been proposed [9, 26], such as real-

time pricing (RTP), day-ahead pricing (DAP), time-of-use pricing (TOUP), critical-peak pricing, Inclining block rates (IBR), etc.

Research findings [27] indicate that compared to other pricing models, TOUP provides more incentives for customers to shift load to the less expensive (hence loaded) hours. Thereby, we use the TOUP model throughout this study to give incentives for arriving EVs to go to the EVPSS with low price which will improve the EVs load balancing to reduce EVPSS busy state.

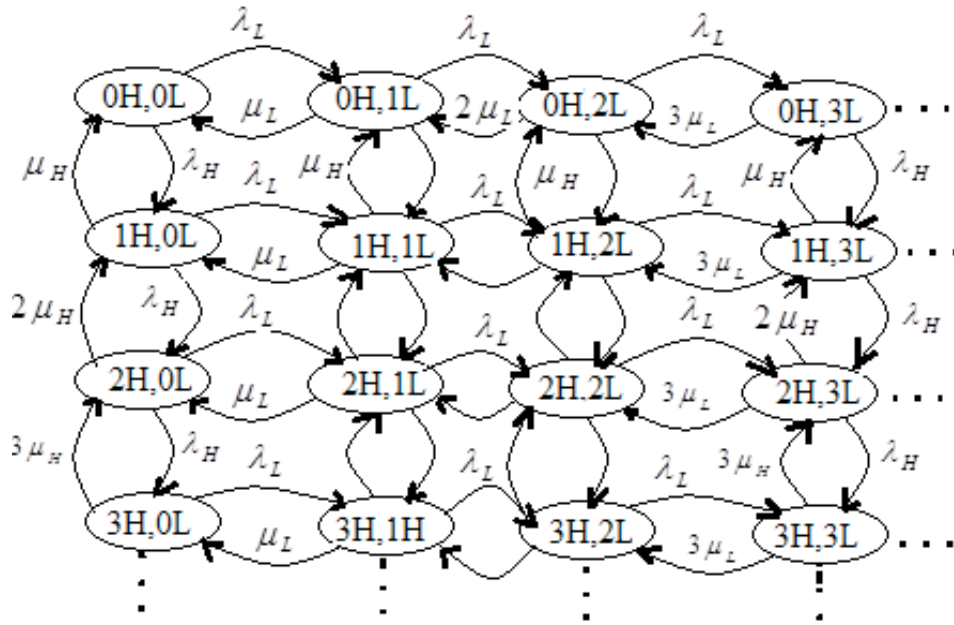


Figure 4. 5- Markov chain illustration of the case of two priority classes (H,L) in multi servers for one EVPSS

### 4.7.3 Mobility model

Without losing generality, we consider a scenario as illustrated in figure 4.6, where a number of roads (e.g. 4) allow accessing part of a town as illustrated by the circle. We consider that  $N$  EVs can get through these roads to  $m$  EVPSSs located in this part of the city, which covers a certain area (e.g. 4kmx4km).. All vehicles are travelling with a speed which cannot exceed a certain value (e.g. 50 km/h). We assume EVs, the smart grid and EVPSSs can communicate with each other while EVs are on the road and that EVs communicate their position, SoC and priority level to smart grid when they are on roadside.

We suppose that the time needed by any EV entering the town to reach any EVPSS can be calculated. This calculation is today possible with most navigation tools which can easily calculate time to destination given a current position, and traffic conditions. This time

duration for vehicle  $J$  to reach EVPSS  $i$  is noted  $T_{i=1..m}^{J=1..N}$  where  $N$  is number of EVs and  $m$  is the number of EVPSSs.

This time information which is presented as in table 4.1 will be used by smart grid as a parameter to decide which EVPSS can best serve a particular EV.

**Table 4. 1- The estimated time periods for all EVs to joint any EVPSS**

	<b>EV<sub>1</sub></b>	<b>EV<sub>2</sub></b>	...	<b>EV<sub>J</sub></b>	...	<b>EV<sub>N</sub></b>
<b>EVPSS<sub>1</sub></b>	$T_1^1$	$T_1^2$	...	$T_1^J$	...	$T_1^N$
<b>EVPSS<sub>2</sub></b>	$T_2^1$	$T_2^2$	...	$T_2^J$	...	$T_2^N$
...	...	...	...	...	...	...
<b>EVPSS<sub>i</sub></b>	$T_i^1$	$T_i^2$	...	$T_i^J$	...	$T_i^N$
...	..	...	...	...	...	...
<b>EVPSS<sub>m</sub></b>	$T_m^1$	$T_m^2$	...	$T_m^J$	...	$T_m^N$

## 4.8 Cut-off-discipline for M/M/S queue

Using the three (3) parameters (priority, price and mobility) modelled as described in section 4.7 the proposed multi-server priority queues model is a Markov chain with a cut-off discipline priority queues. Figure 4.7, figure 4.8 and figure 4.9 describe the proposed charging model for one EVPSS.

Indeed, when arriving, EVs are placed in different queues of EVPSS, each of which has a different service priority; the queues discipline is pre-emptive. In this work, low priority EVs (LP) receive service only when no high priority EVs are waiting, but a low priority EV which is receiving service is not interrupted if a high priority EV (HP) arrives and all servers are busy. As a result, our model presents two EV categories and a first-in-first-out (FIFO) discipline for each category.

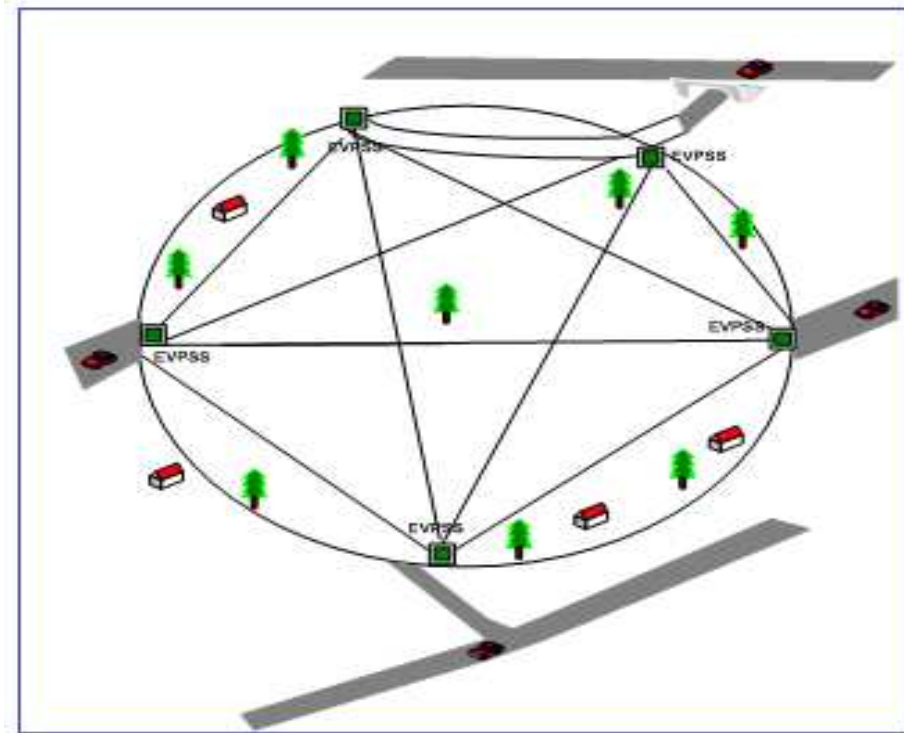


Figure 4. 6-Our realistic mobility model

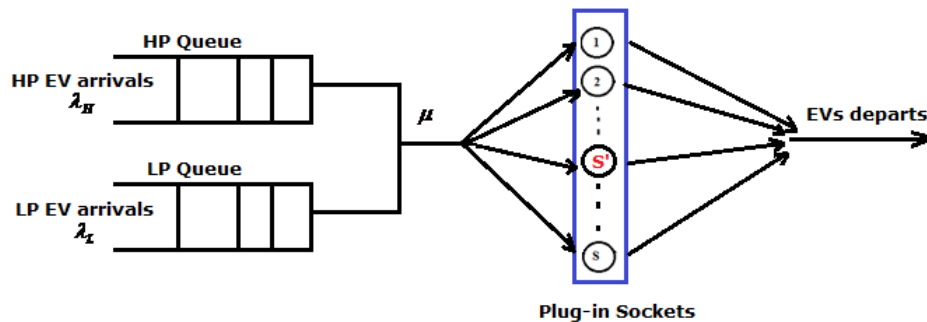


Figure 4. 7-Schematic view of our cut-off priority EV charging model for one EVPS

Let us consider the two (2) priorities levels (HP and LP), and a total of  $S$  plug-in sockets (servers) in the EVPS (see figure 4.7). We define a cut-off level of  $S'$  for admission of LP EVs according to the following discipline:

- For the low priority EVs (LP): (1) Serve an arriving LP EV if and only if fewer than  $S'$  plug-in sockets are occupied, otherwise place it in the queue. (2) Serve a low priority EV from the queue whenever one of  $S'$  busy plug-in sockets becomes free.
- For the high priority EV (HP): a HP EV enters charging service immediately unless all plug-in sockets are busy, in which case it can be queued.



Under this discipline, we pre-empt the HP charging service relative to the LP one in order to serve arriving HP EVs. Thus, an arriving LP EV is kept waiting if the number of busy plug-in sockets when it arrives, is above a specified cut-off level  $S'$  (see figure 4.8 and figure 4.9).

The unoccupied plug-in sockets are kept free for subsequent HP EVs arrivals.

We define the workload parameters:

$$\lambda = \lambda_L + \lambda_H, \mu_H = \mu_L = \mu,$$

$$\rho_L = \lambda_L / \mu, \rho_H = \lambda_H / \mu \text{ and } \rho = \rho_H + \rho_L$$

In the EVSS, let  $n$  be the number of busy plug-in sockets.

If  $n < S'$ , no EVs of either priority wait and all arriving EVs for both priorities (HP and LP) are admitted to immediate charging service.

If  $S' \leq n < S$  only HP EVs are admitted, and arriving LP EVs are placed in the queue. Waiting EVs are served from the queue, in FIFO order, whenever the number of busy plug-in sockets gets reduced to  $S'-1$  by the completion of service for a previous EV. We use three (3) parameters to describe our cut-off priority model;  $n$ ,  $N_H$  and  $N_L$  which are defined in Table 4.1. Figure 4.9 describes the proposed cut-off discipline.

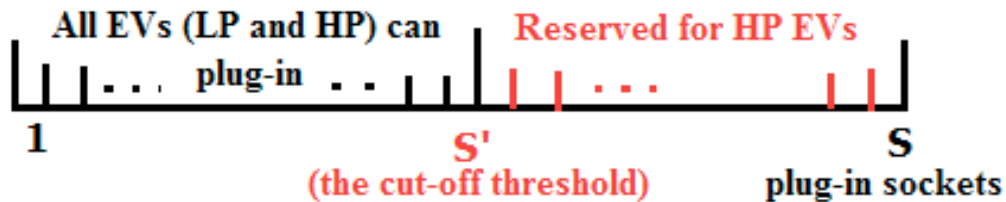


Figure 4. 8-Cut-off priority threshold for any EVSS

Table 4. 2- Notation for our cut-off priority queuing model

Notation	Description
$N_H$	The EV number in the HP queue
$N_L$	The EV number in the LP queue
$\lambda_H$	The arrival rate into the HP queue
$\lambda_L$	The arrival rate into the LP queue
$\mu = \mu_H = \mu_L$	Processing or service rate for an EV ( $\frac{1}{\mu}$ is the mean service time)
$n$	The number of busy plug-in sockets in EVPSS
$S$	The number of plug-in sockets in EVPSS
$S'$	The cut-off level for admission of LP EVs in charging service
$\pi_n^c$	The steady-state probabilities with cut-off consideration
$E(W_H)$	The mean waiting time for an EV in the HP queue
$E(Lq_H)$	The mean HP queue length
$E(W_L)$	The mean waiting time for an EV in the LP queue
$E(Lq_L)$	The mean LP queue length

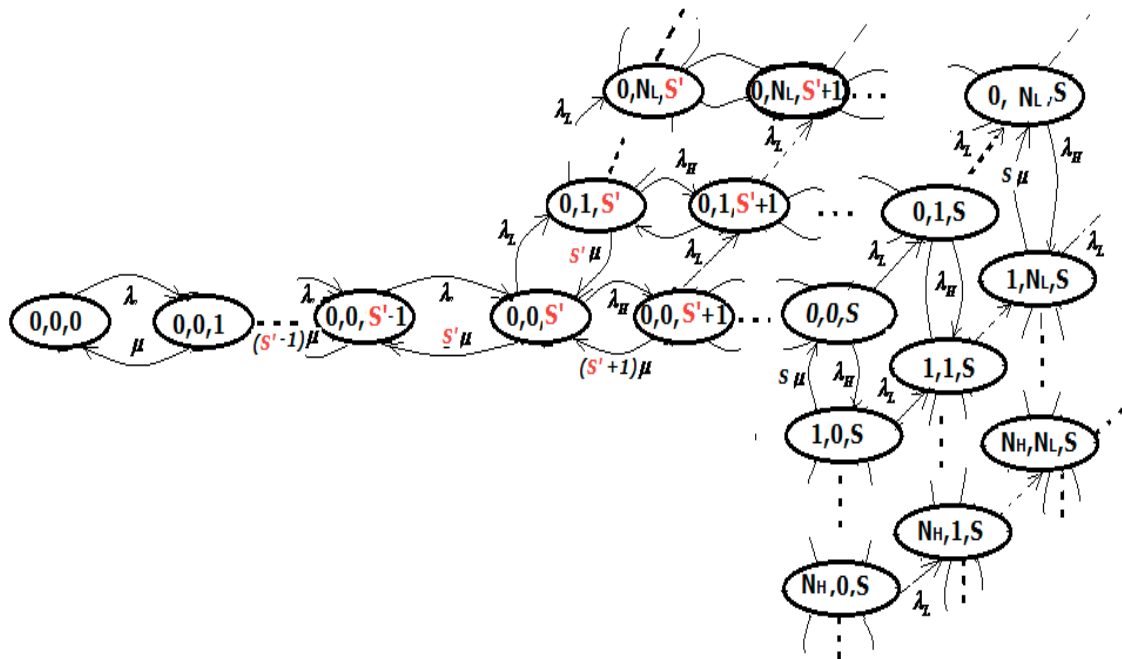


Figure 4. 9-The state transition diagram for one EVPSS

We define the steady-state probabilities

$$\pi(N_H, N_L, n) = \begin{cases} \Pr[ N_H \text{ HP EVs waiting,} \\ N_L \text{ LP EVs waiting,} \\ n \text{ plug-in sockets busy} ] \\ \text{where } (N_H \geq 0, N_L \geq 0, 0 \leq n \leq S), \\ \text{and} \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4.18)$$

and

$$\pi(0,0,0) = \pi_0^c \quad (4.19)$$

The steady-state equations for our model are given by:

$$\begin{aligned} (\lambda + n\mu)\pi(0,0,n) &= \lambda\pi(0,0,n-1) + \\ (n+1)\mu\pi(0,0,n+1) \quad (\text{where } 0 \leq n \leq S'-1) \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} (\lambda + S'\mu)\pi(0,0,S') &= \lambda\pi(0,0,S'-1) + \\ (S'+1)\mu\pi(0,0,S'+1) + S'\mu\pi(0,1,S') \end{aligned} \quad (4.21)$$

for  $(N_L > 0)$ :

$$\begin{aligned} (\lambda + S'\mu)\pi(0, N_L, S') &= \lambda_L\pi(0, N_L - 1, S') + \\ (S'+1)\mu\pi(0, N_L, S'+1) + S'\mu\pi(0, N_L + 1, S') \end{aligned} \quad (4.22)$$

if  $(S'+1 \leq n \leq S-1)$ :

$$\begin{aligned} (\lambda + n\mu)\pi(0, N_L, n) &= \lambda_H\pi(0, N_L, n-1) + \\ \lambda_L\pi(0, N_L - 1, n) + (n+1)\mu\pi(0, N_L, n+1) \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} (\lambda + S\mu)\pi(0, N_L, S) &= \lambda_H\pi(0, N_L, S-1) + \\ \lambda_L\pi(0, N_L - 1, S) + S\mu\pi(1, N_L, S) \end{aligned} \quad (4.24)$$

for ( $N_H > 0$ ):

$$\begin{aligned}
 (\lambda + S\mu)\pi(N_H, N_L, S) &= \lambda_H \pi(N_H - 1, N_L, S) + \\
 &\lambda_L \pi(N_H, N_L - 1, S) + S\mu\pi(N_H + 1, N_L, S)
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

The solution of equation (4.20) is

$$\pi(0, 0, n) = \frac{\rho^n}{n!} \pi_0^c \quad \text{for } 0 \leq n \leq S' \tag{4.26}$$

To solve (4.21)-(4.25) we define the generating function [57], [58], [59], [60] over the LP queue

$$\pi^*(N_H, z, n) = \sum_{N_L=0}^{\infty} z^{N_L} \pi(N_H, N_L, n) \tag{4.27}$$

We define also

$$\begin{aligned}
 \pi_n^c &= \sum_{N_H=0}^{\infty} \sum_{N_L=0}^{\infty} \pi(N_H, N_L, n) \\
 &= \sum_{N_H=0}^{\infty} [ \pi^*(N_H, z, n) ]_{z=1} \\
 &= \begin{cases} [ \pi^*(0, z, n) ]_{z=1} & \text{if } S' \leq n \leq S-1 \\ [ \pi^*(0, z, S)(1-x_0)^{-1} ]_{z=1} & \text{if } n = S \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Where  $x_0$  is the root satisfying  $|x_0| < 1$ , ( $|z| \leq 1$ ) of the following equation

$$Sx^2 - \{\rho_L(1-z) + \rho_H + S\}x + \rho_H = 0. \tag{4.29}$$

As presented in [58], [59] and [61] and using a discrete transform technique, we have

$$\pi_n^c = \begin{cases} \pi_0^c \rho^n / n!, & 0 \leq n \leq S'-1 \\ \pi_0^c (\rho^{S'} \rho_H^{n-S'} / n!) S' / (S' - \rho_L T(S', S)) & S' \leq n \leq S-1 \\ \pi_0^c (\rho^{S'} \rho_H^{n-S'} / S!) [S' / (S' - \rho_L T(S', S))] S / (S - \rho_H), & n = S \end{cases} \tag{4.30}$$

where

$$\pi_0^c = \left\{ \sum_{i=0}^{S'-1} \rho^i / i! + (\rho^{S'} / (S'-1)!) T(S', S) / [S' - \rho_L T(S', S)] \right\}^{-1}$$

and

$$T(k, S) = \rho_H^{-k} k! \left[ \sum_{i=k}^{S-1} \rho_H^{-i} / i! + (\rho_H^S / S!) S / (S - \rho_H) \right]$$

The mean waiting time for an EV in the HP queue ( $E(W_H)$ ) and the mean HP queue length ( $E(Lq_H)$ ) are exactly as for the M/M/S queue, except for the change in  $\pi_S^c$ , the probability of the wait being nonzero. Thus

$$\Pr(W_H > t) = \pi_S^c \cdot \exp(-(S\mu - \lambda_H)t) \quad (4.31)$$

The mean waiting time for an EV in the LP queue ( $E(W_L)$ ) is given by

$$E(W_L) = \mu^{-1} \pi_0^c (\rho / \rho_H)^{S'} S'^2 [S' - \rho_L T(S', S)]^{-2} \times \left[ \sum_{k=S'}^{S-1} (\rho_H^k / k!) (T(k, S))^2 / k + \rho_H^S / S! S^2 / (S - \rho_H)^3 \right] \quad (4.32)$$

The mean length of the LP queue is given by

$$E(Lq_L) = \lambda_L E(W_L) \quad (4.33)$$

The Eq. (4.18) to (4.33) detail the model illustrated in figure 4.7, 4.8 and 4.9 which are presented for one EVPSS. For our Multi-server cut-off priority model presented in figure 4.10 we adopt the same idea used in the section 6 to allow a good saving of computation effort. We use a form of block matrix notation to highlight the waiting time and the cut-off threshold vectors for all EVPSS in our multi-EVPSS model which are given by:

$$\text{Vect}_{-W_L} = [E(W_L)_{i=1..m}] \quad (4.34)$$

$$\text{Vect}_{-W_H} = [E(W_H)_{i=1..m}] \quad (4.35)$$

$$\text{Vect}_{-CutOff} = [S'_{i=1..m}] \quad (4.36)$$

By the waiting time vectors given by Eq. (4.34) and (4.35), our model manages the charging process for all EVs. Indeed, for each EV requesting the charging service, the smart grid selects the EVPSS which has the reduced average waiting time. The smart grid also controls the congestion of each EVPSS with the dynamic update of the cut-off threshold given by Eq. (4.36) to promote or not more HP EVs in one EVPSS compared to the other. Indeed, after

receiving the first message from an EV requesting the charging service, the smart grid calculates the waiting time for each EVPSS and selects the best one for the EV according to its mobility scenario and its priority level and its price threshold fixed by each EVSS in the beginning. After any EV response, the smart grid operates a dynamic cut-off priority threshold parameter update for all EVPSSs to balance the number of EV between all EVPSS and to decrease the EVPSS congestion. This action improves the regulation and grid stabilization.

We adopt for our cut-off priority model the following algorithm which takes account of the EV priority level and the price politics doted in each charging period. Additionally, the algorithm takes into consideration the mobility model presented in section 4.7, by using the initial SoC and initial position of each EV, and updates EVPSS state (HP queue length, LP queue length, cut-off vector) after each EV satisfaction.

---

**Algorithm . *Advanced BA- EVPSS algorithm***

---

**Input:** current EV position, EV SoC,  $\pi_0^c$ , priority level, charging rate, EVPSS number, EVPSS position, average EV speed, plug-in socket number, TOUP model, initial cut-off vector

**Output:** @ EVPSS /\* selected station \*/

New cut-off vector

---

1. EV sends to the smart grid its profile (priority, max price, position and SoC)  
/\* EV profile \*/

2. Smart grid calculate  $T_{i=1..m}^{EV}$

3. If priority is high (HP),

4. Then calculate  $Vect - W_H = [E(W_H)_{i=1..m}]$

5. Select EVPSS according  $\min(E(W_H) + T_{i=1..m}^{EV})$

6. If priority is low (LP),

7. Then calculate  $Vect - W_L = [E(W_L)_{i=1..m}]$

8. Select EVPSS according

$\min(E(W_L) + T_{i=1..m}^{EV})$  & minimum price

9. Smart grid sends @ of the suitable EVPSS to EV
  10. Update cut-off vector /\*smart grid update 'S' for each EVPSS\*/
  11. EVPSS send its state (LP/HP queue length).
- 

## 4.9 Fairness and complexity analysis

In our EV charging system we aim at a fair scheduling of EVs based on the arrival of requests for service to the smart grid, and on the priority of the requesting EVs. The fair scheduling of EVs charging in EVPSS is performed according to the priority disciplines. The FCFS method is adopted, where the EVs arriving with the same priority are treated in the order of arrival.

From the description of our two algorithms, the BA-EVPSS and Advanced BA-EVPSS, we can see that the complexity is in the order of  $O(n)$ .

Figure 4.11 illustrates a schematic view of information flow patterns between the smart grid and EVs by considering the Advanced BA-EVPSS algorithm. Indeed, added to the position and SoC of EV, we suppose that each EV communicates the priority level and price constraints information to the smart grid before the plug-in phase.

## 4.10 Performance evaluation

In this section, simulation results and discussions are presented to highlight the performance of our two EV charging algorithms. We used MATLAB to perform the simulations.

The EVs arrival (to the city) flow variation is modeled by Poisson distribution. We assume that all EVPSS are equipped by a level 3 plug-in which is the most rapid EV charger. After the end of the overall charging time duration, all vehicles should be satisfied. The parameters for our EVs charging process are generated as follows:

- The EV number is 1000;
- The 1% of EV SoC is a sufficient value to arrive to a nearest EVPSS
- The EVPSS number is 20;
- The number of socket plug-in in each EVPSS is a random value between 1 and 10 ;
- The EV SoC maximal is 7 kW;

- The charging rate in each EVPSS is 20 kW/h and the maximal time for EV to be full charged is 20 min;

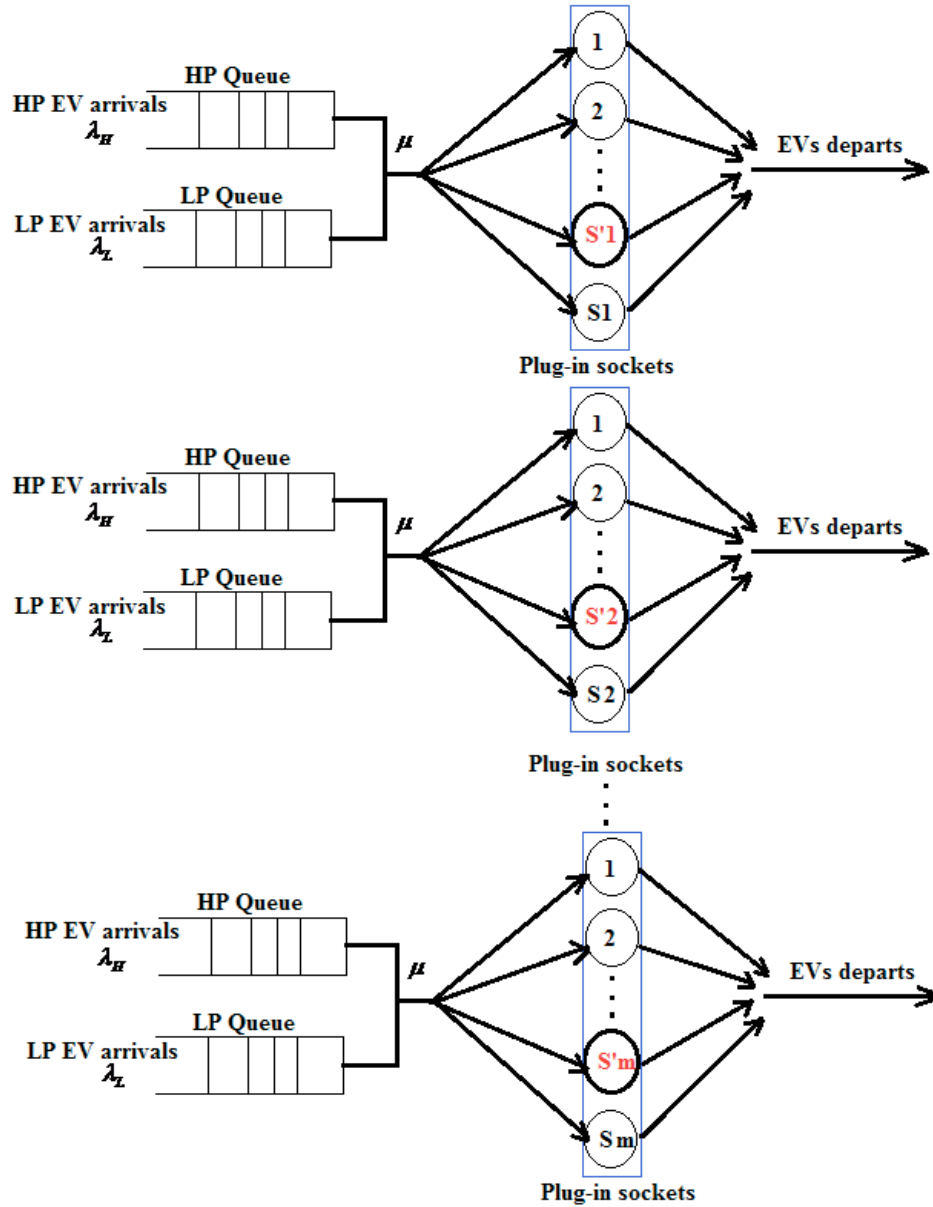


Figure 4.10- The multi-server cut-off priority queues model. The initial EV SoC is a uniform distribution between 1% and 90%;  $\lambda = \lambda_H = \lambda_L = 1/3$  ; arrival intensity

- $\mu = \mu_H = \mu_L = 1/50$  ; service intensity

For mobility modeling, we considered a scenario of 4 roads allow access to part of a town having an area of 4 km x 4 km where the EVPSSs are placed randomly. All vehicles are travelling with speeds which cannot exceed 50 km/h.



Two sets of simulations were performed. First we ran simulations without considering vehicles priority, and second we performed simulations considering two priority levels for EVs.

For the first set of simulations, figure 4.12 shows an example scenario of the initial average EV SoC of a simulation, which takes a random value between 1% and 90%. Depending on the initial SoC value and the EV position, the smart grid selects the suitable EVPSS. We assume that an EV always consumes the energy with its maximum power limit until its performance threshold is satisfied. The simulations were run 50 times and the average values for each EV were taken.

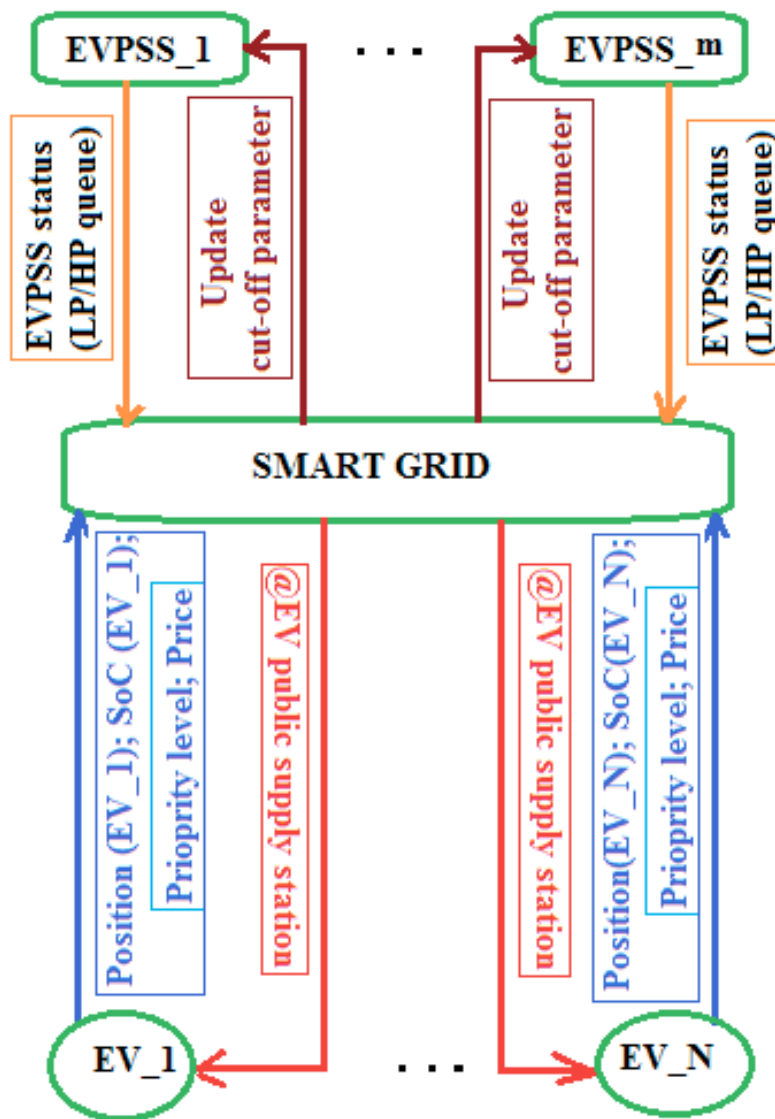
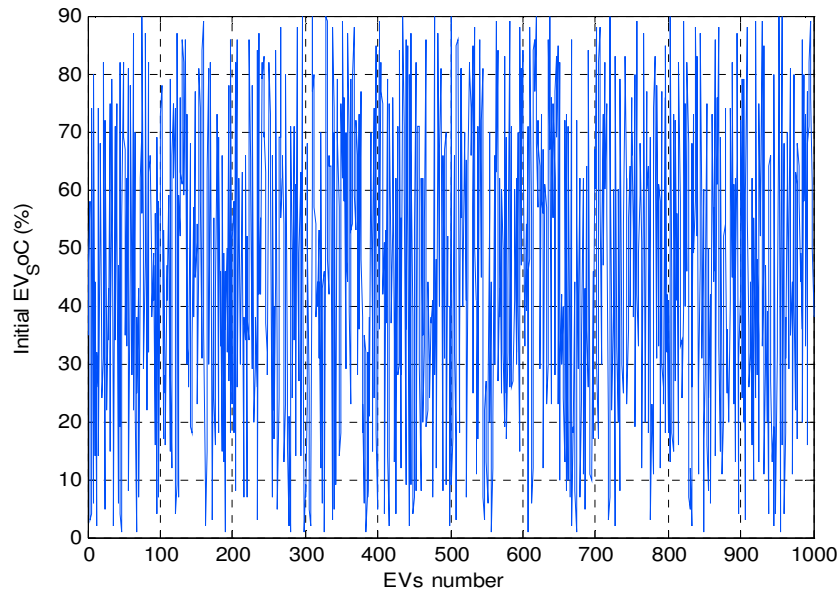
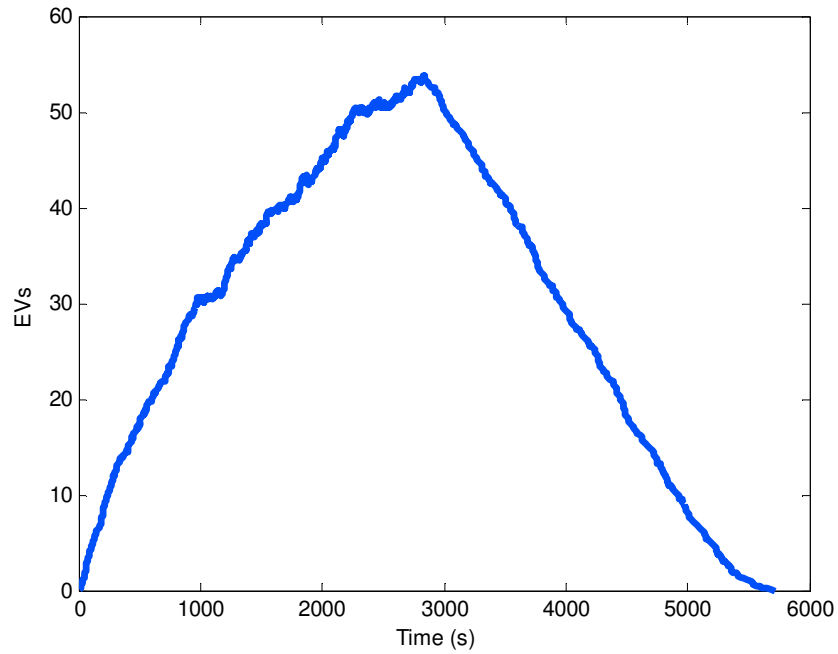


Figure 4. 11- Schematic view of information flow patterns between the smart grid and EVs and EVPSS by considering the advanced BA-EVPSS algorithm



**Figure 4.12- Initial EV State of Charge (One simulation for 1000 EVs)**



**Figure 4.13- Average queuing length variation**

Figure 4.13 shows the average queue length variation during the whole charging process operations for 1000 vehicles. The maximum average EVs number in the queue is under 60 EVs. It is clear that our charging process can also be seen as a form of scheduling algorithm used by the smart grid to manage grid power.

Figure 4.14 shows the average arrival time for each EV corresponding to the blue continuous curve compared to its departure time highlighted by the red dash color. We observe that the departure time is sensitive to the number of arriving EVs which are characterized by random power demand. This power demand is proportional to the load time. For each EV, the departure time depends on the charging time of all EVs which joined the same EVPSS before it. This is why the departure time becomes increasingly large.

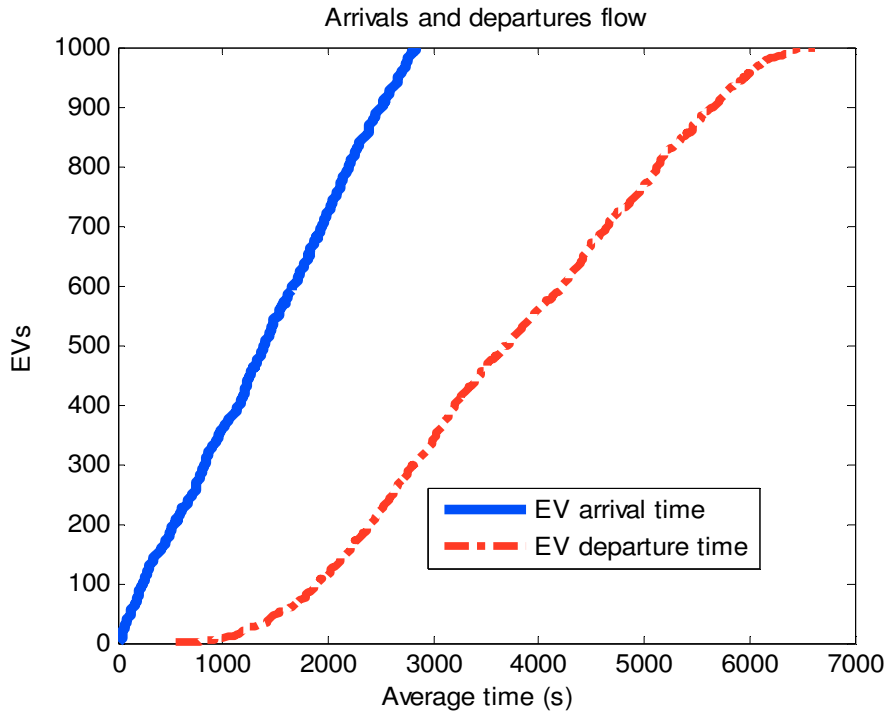


Figure 4.14- Arrivals /departures flow (simulation for 1000 EV)

Figure 4.15 shows an example scenario of the waiting time of EVs depending on the number of available plug-in socket in EVPSS. We observe that the average waiting time is sensitive to the number of plug-in sockets in each EVPSS. In addition to its non-complex time operation, it is clear that our BA-EVPSS algorithm follows inversely the number of plug-in sockets variation in order to lessen the individual waiting time for each EV. The BA-EVPSS algorithm picks up the first EVPSS which has the smallest average waiting time and communicates its information to the EV. In the scenario which is illustrated in Figure 4.15, we observe that the smart grid chooses the third EVPSS which has 10 plug-in sockets to respond to the EV demand.

In what follows, we study the charging time of the proposed BA-EVPSS algorithm compared with that of R-EVPSS. In R-EVPSS algorithm, an EVPSS is selected according to its queue length; the arriving EV is directed to the EVPSS which has the smallest EV number in its queue without taking into account the cumulative EV charging time needed by all EVs in each queue.

Figure 4.16 compares our algorithm (represented by the blue dash curve) and the R-EVPSS algorithm (highlighted by red curve). We observe that the average waiting time given by R-EVPSS algorithm is higher than the corresponding average waiting time given by BA-EVPSS.

Our BA-EVPSS is effective in managing EVs charging process according to the constraints of the requested SoC and price when EVs have the same priority. However, the priority of each EV is an important parameter to consider and the charging service may need to be pre-empted for one EV and not for another.

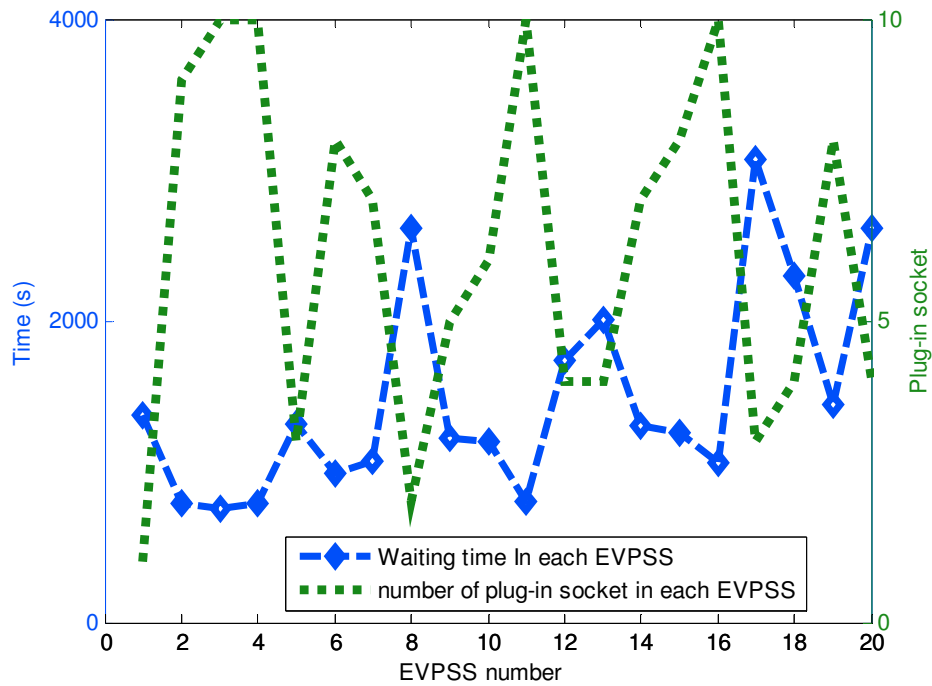


Figure 4. 15-Waiting time in each EVPSS versus plug-in socket number for one example simulation

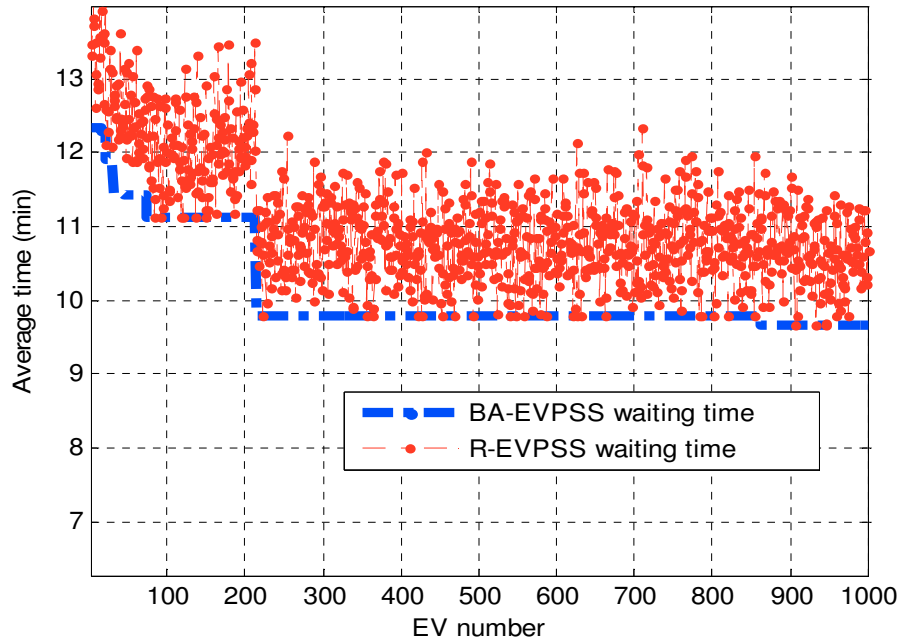


Figure 4. 16- Average Waiting time comparison between BA-EVPSS algorithm and R-EVPSS

To resolve those BA-EVPSS algorithm limits, we evaluate the performance of our Advanced BA-EVPSS algorithm which uses a multi-sever queuing model and a cut-off priority strategy using the TOUP price model. We study the efficiency of our Advanced BA-EVPSS algorithm by the SMART case algorithm, compared with the STUPID case in terms of waiting time for each EV arriving to an EVPSS. The variation of the electricity price in each EVPSS is also taken into account in our model.

In the STUPID case, an EVPSS is selected by a LP EV according to its path and queue length and price level; in fact, the arriving EV is directed to the nearest EPVSS which has the smallest EV number in its queue with the cheapest power price. For a HP EV an EVPSS is chosen according to its path and queue length only. For any EV level priority (HP and LP), the STUPID algorithm is running not only without taking into account the cumulative EV charging time needed by all EVs in each high and low priority queue, but also without taking into consideration the dynamic update of the cut-off parameter.

As presented in figure 4.17, we define the time to plug-in for any EV as the sum of the waiting time in the EVPS queue, the time to join the EVPSS, and the grid response time. We assume that the time taken between the EV request and the time of the grid response should

not exceed 0.2s for any EV. We also assume that the cut-off parameter update for any EVPSS is done after any EV response and will take 0.1s.

Figure 4.18 shows an example scenario of the selected EVPSS for each arriving EV. The outcome of the Advanced BA-EVPSS algorithm corresponds to the blue dash curve, the green points highlights the priority level designed by the value one (1) for low (L) and two (2) for high (H) which are fixed for each EV before the plug-in phase (i.e. while the EVs are on road side).

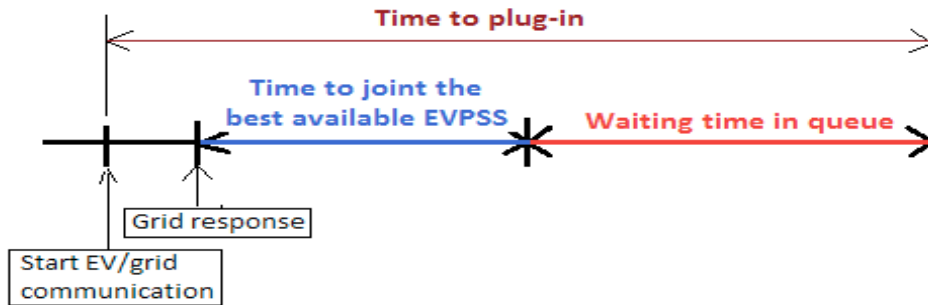


Figure 4.17- The time to plug-in diagram for any EV

We observe that for each EVs demand, the smart grid selects, using our Advanced BA-EVPSS algorithm, the best EVPSS according to the constraints of price, priority level, EV position and EV SoC.

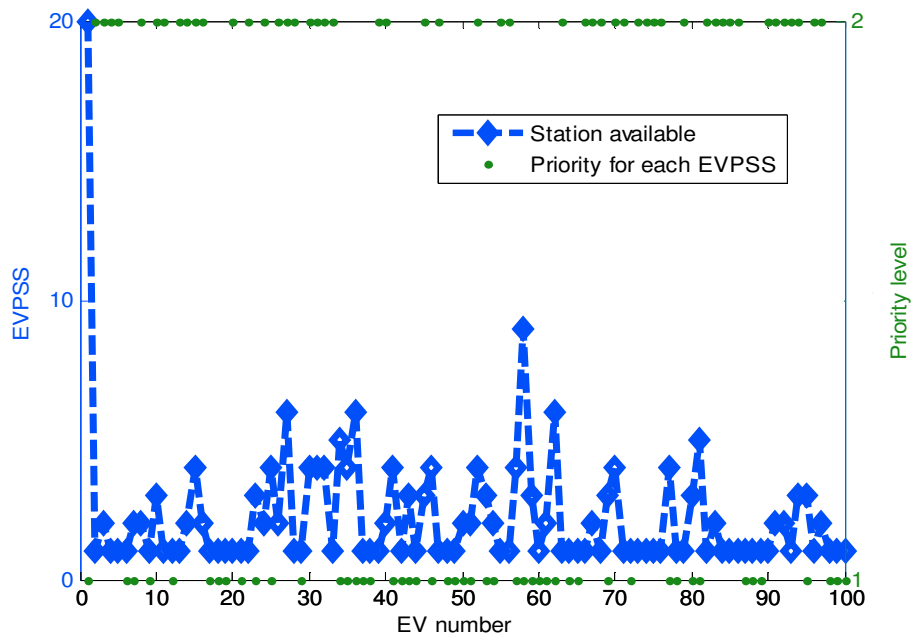
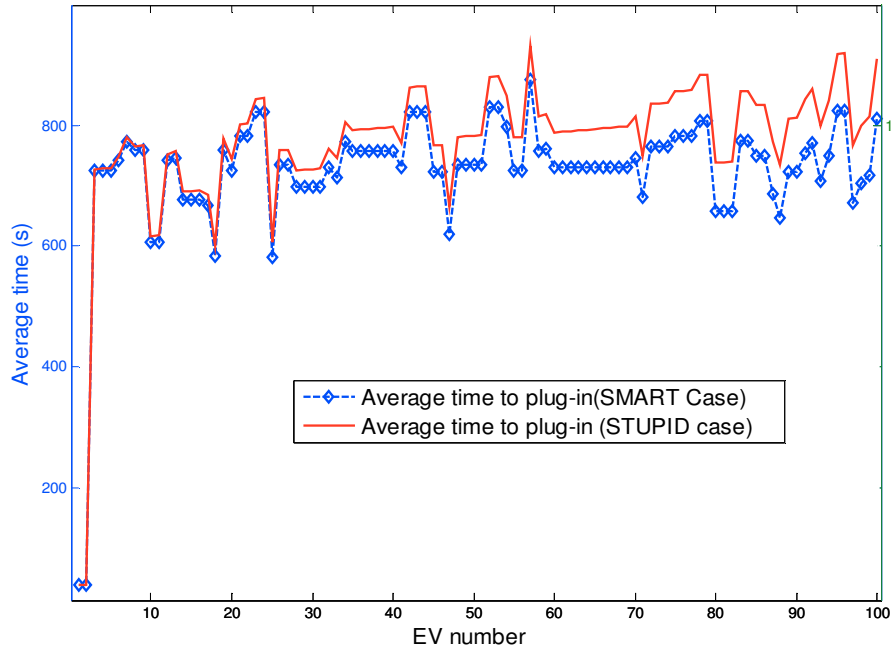


Figure 4.18- Selected EVPSS for each arrival EV

In what follows, we study the charging time of the Advanced BA-EVPSS algorithm corresponding to the SMART case is compared with the STUPID one.



**Figure 4. 19- The time to plug-in under SMART and STUPID cases for 100 arrival EVs**

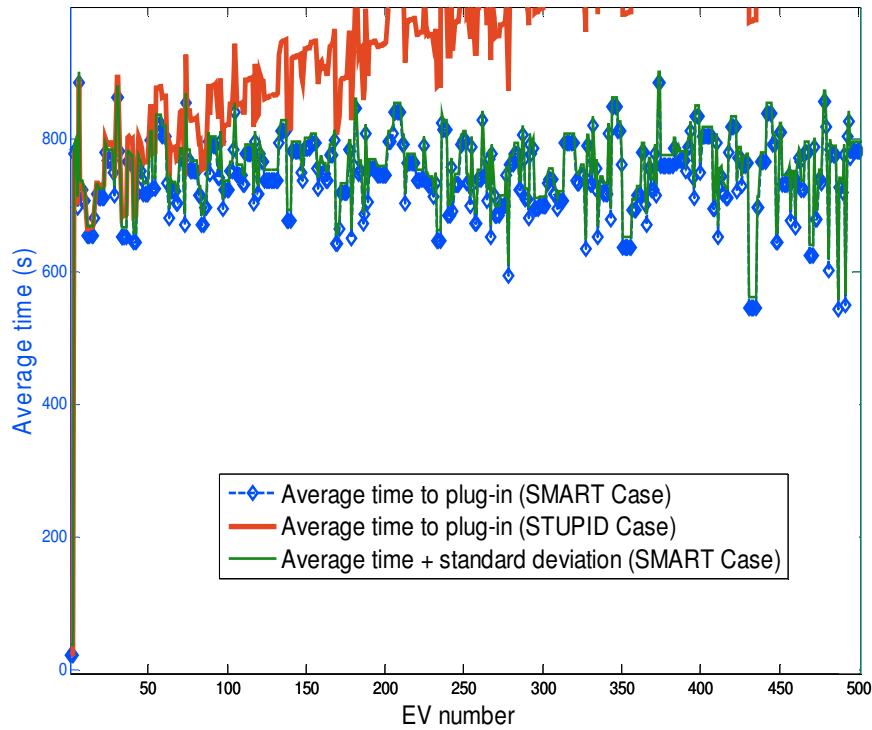
Figure 4.19 shows the average time to plug-in simulated for 100 EVs using the Advanced BA-EVPSS algorithm described by SMART case compared to the STUPID case. We observe that in the SMART case, the EV relatively takes less time to plug-in than in the STUPID one, especially when the number of EVs is relatively high. This confirms that with the use of the Advanced BA-EVPSS algorithm, the grid manages the EVs charging process in an efficient manner in terms of time to plug-in, and satisfies EVs according to their profile description communicated while on the road.

We observe the same results compared to the figure 4.19 when considering 500 EVs as shown in figure 4.20.

**Table 4. 3 - Time to plug-in comparison between STUPID and SMART cases**

	STUPID case	SMART case	Saving rates (%)
<b>First range[1 100] EVs</b>	800	730	8.75
<b>Second range[101 300] EVs</b>	955	725	24.08

<b>Third range [301 500] EVs</b>	1000	710	29
----------------------------------	------	-----	----



**Figure 4. 20-** The time to plug-in under SMART and STUPID case for arrival EVs (500EVs)

Table 4.3 presents the observation results obtained from figure 4.19 and 4.20, which illustrate the performance comparison between the SMART case where we use the Advanced BA-EVPSS algorithm to manage the charging process and the STUPID one, in terms of time to plug-in variation. As shown in table 4.3, it is clear that the Advanced BA-EVPSS algorithm reduces the waiting time for the charging process of 1000 EVs with a saving rate of more than 8 %, 24% and 29 % respectively for the three ranges of EVs; [1 100], [101 300] and [301 500]. Moreover, the saving time to plug-in reduction is growing up from 8.75 to 29% when the EV number reaches 500. This result proves the effectiveness of our Advanced BA-EVPSS mainly for a high EV number. Conclusion

Dans ce chapitre, on s’est intéressé au problème de recharge des VEs dans des stations de recharge publiques où les VEs, depuis qu’ils sont encore en route, communiquent au préalable leurs profils de charges initiales à la grille intelligente. On a proposé deux algorithmes basés sur la théorie des chaînes de Markov et des files d’attente. Ces algorithmes



permettent de diriger les VEs aux stations de recharge de manière à minimiser le prix d'électricité et le temps d'attente pour achever le chargement. Pour le premier algorithme, qui est nommé BA-EVPSS, deux objectifs sont pris en compte : (1) satisfaire les demandes en puissance des VEs, et (2) optimiser le temps de recharge pour chaque VE. Le deuxième algorithme intitulé Advanced BA-EVPSS, est basé sur un modèle de file d'attente avec une stratégie de priorité de coupure « cut-off priority » et sur une politique de prix d'électricité variable. L'algorithme Advanced BA-EVPSS est proposé pour assurer deux objectifs principaux : (1) gérer le processus de recharge des VEs de manière à satisfaire les demandes des VEs en terme de prix d'électricité et de temps d'attente pour se brancher, (2) contrôler la congestion pour chaque station de recharge publique par la mise à jour dynamique du seuil de priorité de coupure. Une évaluation par simulations a été réalisée en considérant les caractéristiques réelles des VEs et celles des stations publiques de recharge (borne de recharge type 3). Les résultats montrent que les algorithmes de recharge des VEs proposés permettent de gérer les demandes des VEs en considérant les profils des VEs communiqués à la grille avant leur branchement au secteur d'électricité. En outre, ces deux algorithmes peuvent être vus comme étant des modèles d'ordonnancement de recharge des VEs et peuvent aussi améliorer la stabilité de la grille par la réduction du temps d'attente pour chaque VE et de la congestion pour chaque station de recharge publique. L'algorithme Advanced BA-EVPSS permet à la grille intelligente d'aplatir la courbe de consommation pour chaque station de recharge publique tout en optimisant le coût de recharge des VEs. Il permet aussi d'améliorer la stabilité de la grille par la mise à jour du vecteur de priorité de coupure après chaque satisfaction d'un VE. L'implémentation des algorithmes de recharge des VEs proposés requière un niveau de complexité de calcul faible.

Comme perspectives de ce travail, nous allons introduire des contraintes supplémentaires (par exemple, plusieurs niveaux de priorité pour les véhicules électriques) dans les algorithmes proposés. Nous prévoyons également travailler sur les techniques de gestion de la charge avec des modèles d'ordonnancement du processus de recharge et de décharge des VEs pour gérer les périodes de pointe où le prix de l'électricité et la demande sont plus élevés.

Dans le chapitre qui suit, toujours loin des résidences, on va étudier un nouveau type d'interactions entre les VEs en mouvement et la grille loin des borne de recharge. En effet, on proposera un schéma de communication entre les VEs et la grille basé sur les standards de communication VANET et LTE.

## CHAPITRE 5

# CHANNEL ACCESS MODEL FOR EV CHARGING SERVICE

### 5.1 Résumé

Ce travail est en cours de soumission dans la revue IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Il s'intitule « Channel Access Model for EV Charging Service ».

Dans cette contribution, on aborde une approche d'interaction entre les VEs mobiles et la grille intelligente. En effet, pour maximiser les avantages de l'utilisation de véhicules électriques, des besoins de contrôle régulier et optimisé pour la recharge des VEs doivent être fournis par la grille intelligente. Pour cela, un échange d'information en temps réel et une large connectivité doivent être maintenus entre la grille intelligente et les VEs. Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau modèle d'accès au canal pour négocier un service de recharge des VEs à travers les réseaux de communications véhiculaires (VANET). Tout d'abord, nous présentons un protocole de rechargement des VEs avec la liaison montante et celle descendante ainsi que les formats de trames correspondants lors de l'interaction entre un VE et la grille. Deuxièmement, nous présentons un modèle d'accès probabiliste au canal pour des VEs en besoin de recharge. Ce modèle, qui est basé sur les chaînes de Markov, est conçu pour analyser la diffusion multi-hop de demande de service de recharge par les VEs via le réseau VANET. Nous proposons également un algorithme de sélection de la fenêtre de contention (FC) pour promouvoir la connexion rapide pour les VEs ayant une haute priorité au service de recharge. Les résultats des simulations ont prouvé l'efficacité de l'approche proposée tout en satisfaisant les contraintes définies.

### 5.2 Abstract

EVs pose a great challenge for smart grid by their impacts on power grid stability especially for high EV penetration. To maximize the benefits of using EVs regulated and optimized charging control needs to be provided by smart grid. To make with this idea, real-time information has to be exchanged and large area connectivity has to be maintained between

smart grid and EVs. In this paper, we propose a new channel access model for EV charging service scheme for large EV number through Vehicular Ad-hoc Networks (VANET) communications. First, we present an EV charging protocol with the uplink and the downlink EV charging service frame format. Second, we present a probabilistic channel access model for EV charging service based on Markov chain to analyse the dynamics of multi-hop EV charging service demand dissemination over VANETs. We propose also an algorithm for selecting the contention window (CW) to promote fast connection for EV with high priority to EV charging service. The simulation results have proved the effectiveness of the proposed approach and evaluated its performance while satisfying the defined constraints.

Keywords -EV, LTE, VANET, CW, back-off counter, smart grid, V2G.

### 5.3 Introduction

In the next few years, Electrical Vehicles (EVs) will be more popular, and will be a new diversion in the automobile industry and public transport, not by the zero emission and low noise level only but also by the great impact on the future electricity distribution systems. In fact, the load introduced by EVs charging operations will be one of the most important challenging issues for demand response systems in the smart grid. Indeed, the efficient energy management for EVs and electric vehicle public supply station (EVPSS) will become central to achieving efficient operations of the smart grid. Moreover, the smart grid is required to enable the penetration of intermittent generation sources, enable adaptive electricity price [21, 34, 36], be self healing, optimize assets [20, 37], enable high penetration of EVs and enable the EV grid stability participation. In addition to counting and pricing in smart grid, real-time control over smart grid infrastructure and energy usage promise one of the largest potentials in load management and energy saving [8, 25, 38].

For an EV, finding a vacant EVPSS to plug-in, especially in peak hours, is always a time consuming and frustrating to the drivers when the charging service is seen by the smart grid as a tread-off between consumer satisfaction and grid stability.

For this end, it is necessary to design EV-Smart grid (EV/SG) communication architectures taking into account both the time constraint and the reliability which is expressed as a level of customer's satisfaction without stressing the grid. This EV/SG communication architecture will be based on real-time information, such as EV and EVPSS status, which have to be exchanged with smart grid. Added to customer's satisfaction and grid stability, same other

parameters have to be considered in EV/SG communication system such as the instantaneous EV number needing the EV charging/discharging service with different EV priority level.

In this work, we propose a new specific frame format, based on SAE J2735 standard, for EV charging service. Then, we propose a channel access model for EV charging service based on Markov chain.

**Our contributions are:** 1) To the best of our knowledge, we are the first to consider the EV charging service based on VANET and LTE networks; 2) We propose a specific format, based on SAE J2735 standard, for EV charge scheduling service; 3) We develop system architecture for EVs communication supporting EV with DSRC and LTE capabilities; 4) we develop a probabilistic channel access model for EV charging service based on Markov chain to analyze the dynamics of multi-hop EV charging service demand dissemination over VANETS; 5) we propose an algorithm called adaptive CW to improve the possibility for EV to have a successful connection for the EV charging service. We prioritize the channel access for EV with high priority (HP) and use the EV priority level parameter to dynamically regulate the CW size; 6) we perform simulations in NS-2.34 and Matlab to evaluate our access model for EV charging service within the defined constraints.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 presents a brief review of WAVE/DSRC and LTE standards. In Section 3, we present the proposed system architecture for EVs communication which is based on a communication protocol between EV and the RSU with the uplink and the downlink EV charge scheduling frame format and the exchange data diagram. Section 4 describe our access model for EV charging service based on Markov chain to analyze the dynamics of multi-hop EV charging service demand dissemination over VANETS. The simulation results are presented in Section 5, and the conclusions are drawn in Section 6.

## 5.4 Overview of VANET and LTE

Our proposed smart EV charging service is based on VANET and LTE. In the following, we present briefly the DSRC/WAVE and the LTE characteristics.

The Dedicated Short Range Communication band (DSRC from 5.850 to 5.925 GHz) is a band used for short to medium range communication in vehicular networks (WAVE) [62]. This band includes safety and privates services. DSRC provides a high data rate for mobile nodes and a latency time under 100ms. As presented in Fig.1, the DSRC is formed by seven (7) sub bands: one in the middle which is the control channel (CCH) and six (6) service channels (SCHs). In WAVE, there are two types of nodes: onboard unit (OBU) located in vehicles and

roadside units (RSU) which are located on the road side as a service providers relaying or distributing the information. Similar to OSI model, the WAVE model is presented as a layered architecture composed by IEEE 802.11p [62], IEEE 1609.4 [63], IEEE1609.3 [64], IEEE 1609.2 [65], IEEE1609.1 [66].

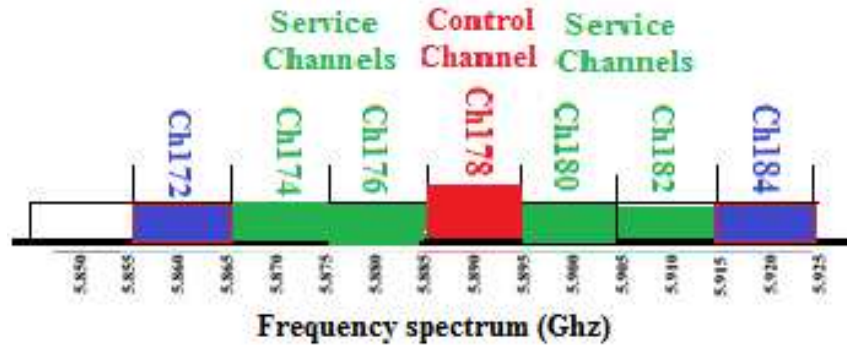


Figure 5. 1-DSRC Frequency Spectrum and channel allocation

Technical references [67, 68, 69] present the 3GPP Long-Term Evolution (LTE) technology as an attractive solution for mobile broadband services. Indeed the LTE uses Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) for the downlink and Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) for uplink, in combination with new antenna technologies such as MIMO.

As presented in table 5.1, the LTE promises a downlink data rate of 100 Mbit/s and an uplink data rate of 50 Mbps over a 20MHz bandwidth. In addition to its simplicity and reduced deployment cost, the LTE cell can support at least 200 users in 5MHz band, and 400 users in other bands. Moreover, the LTE latency time is very small and does not require more than 10 ms. The LTE supports a scalable and a flexible bandwidth from 1.4 MHz to 20 Mhz. The LTE also supports both modes of FDD (Frequency Division Duplex) and TDD (Time Division Duplex). For the mobility characteristics, LTE performance is optimized with a speed lower than 15km/h. LTE supports speeds of 120 to 350 km / h (or 500 km / h, depending on the frequency band used). All these characteristics make the large scale communication technology LTE, favorable for V2G interaction design. We present in the next part our proposed EV charging service.

Table 5. 1- Mobile technologies data rate ranges comparaison

	<b>3G</b>	<b>WiMax</b>	<b>HSPA+</b>	<b>LTE</b>
<b>Peak rate</b>	3Mbps	128 Mbps	168 Mbps	300Mbps
<b>Downlink rate</b>	0.5-1.5 Mbps	2-6 Mbps	1-10Mbps	10-100 Mbps
<b>Uplink rate</b>	0.2-0.5Mbps	1-2Mbps	0.5-4.5Mbps	5-50Mbps

### 5.5 Communication protocol system EV / RSU

In this section, we consider the system presented in Fig.2 where some roadsides are given out of the town highlighted by the circle, from each one derives a possible downtown way (input);  $N$  EVs and  $m$  EVPSSs are sharing the road infrastructure area. We suppose that each EV is equipped by an OBU to be linked to nearest RSU. This RSU is equipped by two communication interfaces VANET and LTE. We assume that these two communication technologies are able to linking EVs, smart grid (regional manager) and all EVPSSs. We suppose that all EVs can communicate via VANET their positions, EV state of charge (EV SoC), and priority level to the nearest RSU. All RSUs are connected via LTE to smart grid.

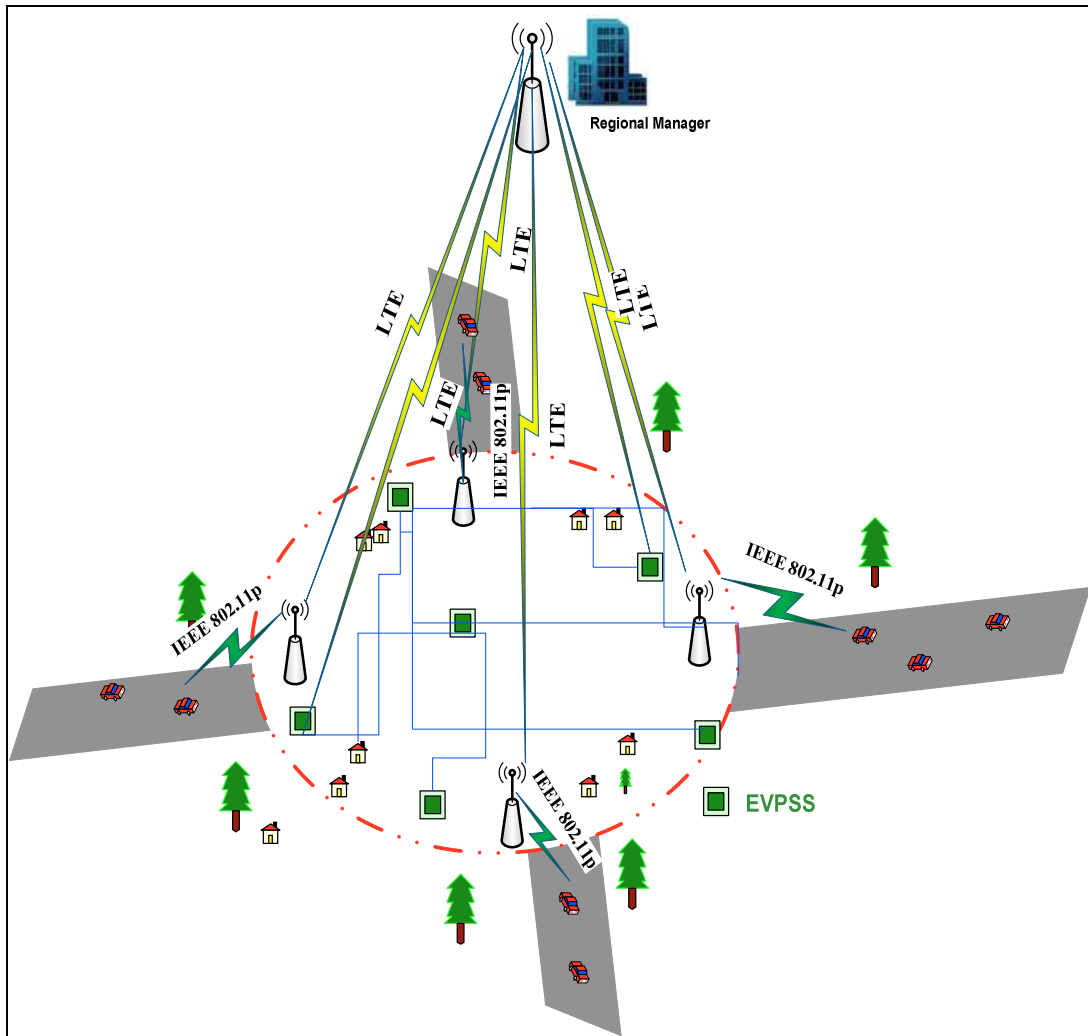


Figure 5. 2- System overview

Our smart EV charging service aims at exploiting the free plug-in in each EVPSS to monitor the whole EV charging system and provides, according to its initial status, an effective guidance for EV searching supply station.

We focused on IEEE802.11p V2I interaction between EVs and RSU, as illustrated in figure 5.3. In the beginning, the RSU broadcast, over CCH, the EV charge scheduling service description (num SCH, Selling Price, Purchase Price).The message format, exchanged between RSU and EV, is described in the following.

There are two message types: the first one is the advertisement message sent by RSU, in the CCH channel, describing the electric charging service offered by the smart grid. The description of this message is follows: num SCH, Selling Price and Purchase Price. The second one is the response of any EV interested in electric charging discharging service.

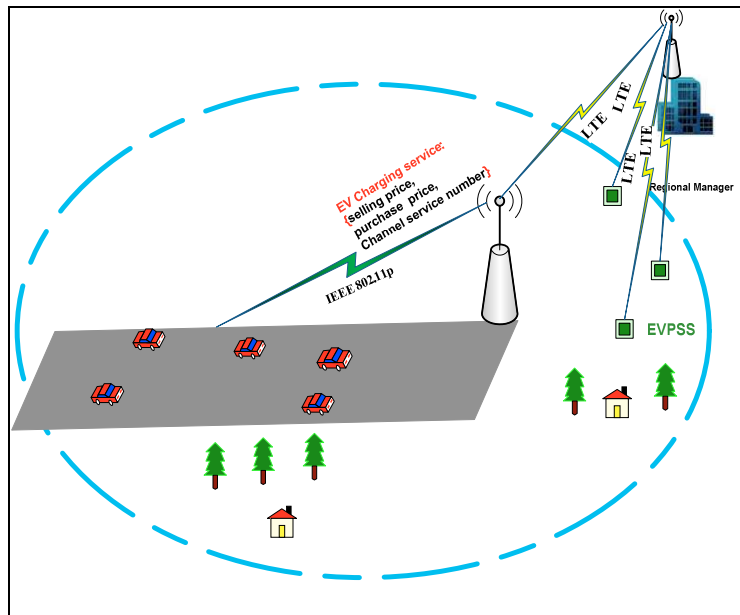


Figure 5. 3-Interaction V2I between EVs and RSU

The EV interested in sale or purchase of electricity will respond by sending its status (position, SoC, priority).

Based on SAE J2735 Message Set Dictionary standard [70] which specifies a set message formats that support a variety of vehicle application, we propose a frame format to enclose the EV charging data.

### 5.5.1 Downlink EV charge scheduling Frame format (from RSU to OBU)

Based on the three (3) important parameters describing the EV charging service offered by smart grid (i.e., electricity price information proposed by smart grid for selling and purchasing, and SCH number), we propose the downlink EV charging service data frame format illustrated in figure 5.4. Table 5.2 gives details of our proposed downlink EV charging service frame format.

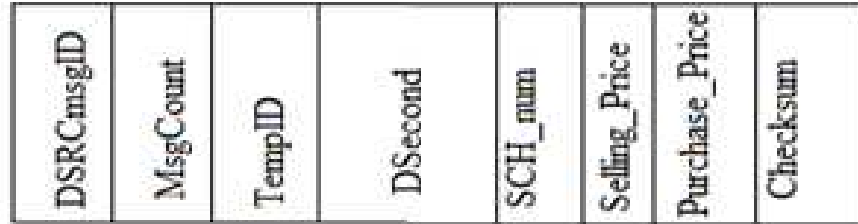


Figure 5. 4- Downlink EV charge scheduling service data frame format

The proposed frame is composed of nine (8) fields presented in their order of appearance as illustrated in the table 5.2. The total frame length is 16 bytes.

Table 5. 2-Downlink EV charge scheduling service frame description

Fields	Length Fields	Description
DSRC msgID	1	determines the type of the current message
MsgCount	1	Sequential number incremented at each successive transmission by a given vehicle. It is primarily used in packet error statistics
TempID	4	as a temporary ID, this field is set a random constant for a period of time, and is changed occasionally for privacy reasons
DSecond	2	clock signal for messages time stamping
SCH_num	2	Channel service number
Selling_Price	1	is mainly a value of selling unit electric price
Purchase_Price	1	is mainly a value of purchase unit electric price
Checksum	4	checksum parity for error detection

### 5.5.2 Uplink EV charge scheduling frame format (from OBU to RSU)

For the uplink exchange between EV and RSU, we use two important parameters: the individual EV status and the electricity price information proposed by smart grid. These two parameters are exchanged, between EV and smart grid, via RSU before the plug-in phase, i.e.,



while the EVs are on road side. In our protocol, each EVPSS communicates its status to smart grid. We propose the uplink frame format in figure 5.5.

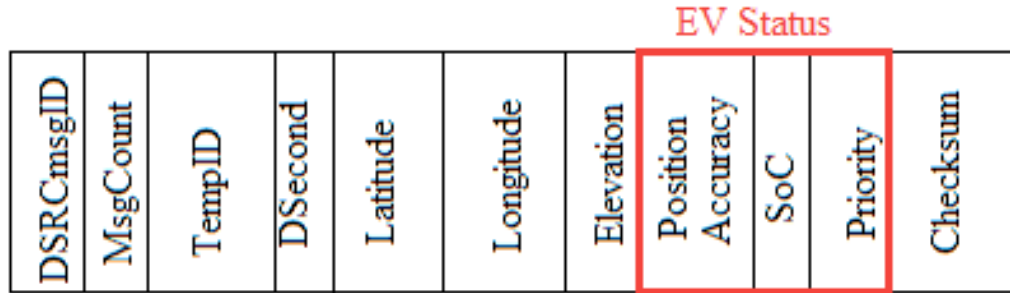


Figure 5. 5-Uplink EV charge scheduling service data frame format

The proposed frame is composed of eleven (11) fields presented in their order of appearance as illustrated in the table 5.3. The total frame length is 28 bytes. The three fields, highlighted by red color in figure 5.5, describe the EV status.

Table 5. 3-Uplink EV Status data frame description

Fields	Length Fields	Description
DSRC msgID	1	determines the type of the current message
MsgCount	1	Sequential number incremented at each successive transmission by a given vehicle. It is primarily used in packet error statistics
TempID	4	as a temporary ID, this field is set a random constant for a period of time, and is changed occasionally for privacy reasons
DSecond	2	clock signal for messages time stamping
Latitude	4	Geographic latitude of vehicle.
Longitude	4	Geographic longitude of vehicle
Elevation	2	Elevation compared to the sea level
Position-Accuracy	4	used to convey how precise the latitude and longitude values are to evaluate the location information accuracy.
SoC	1	is mainly a value of EV State of Charge
Priority	1	EV priority level for charging service
Checksum	4	checksum parity for error detection

The EV charge scheduling data frame is encapsulated in an IEEE802.11p frame inducing an overhead of 32 bytes as shown in figure 5.6.

FC	DUR	Address1	Address2	Address3	SEQ	QoS	Body   Frame   Data	FCS
2	4	6	6	6	2	2	0 ... 2304+	4

Figure 5. 6- IEEE802.11a data frame format

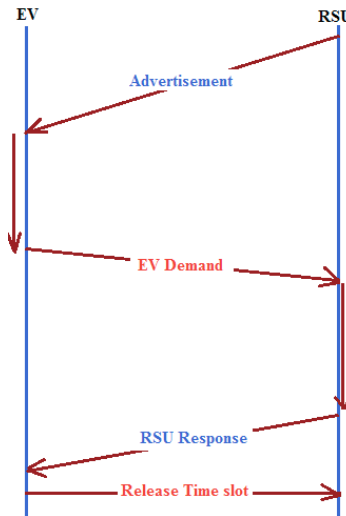


Figure 5. 7- Exchange data diagram between RSU and EV

The exchange data protocol between the RSU and EV presented in figure 5.7 is composed essentially by four messages:

1. Advertisement: RSU broadcast the EV charging service over CCH. It is described by four parameters: the selling electricity price, the purchase electricity price and the channel service number reserved for EVs which are interesting on EV charging service.
2. EV Demand: this message represents the response to the RSU advertisement. Each EV sends to the RSU its EV status: EV position accuracy, EV SoC and EV priority.
3. RSU Response: after receiving and treating the EVs demand, the RSU returns for each EV the adequate EVPSS to plug-in for selling or purchasing electricity.
4. Release Time Slot: this message indicates the end of EV charging interaction

## 5.6 Channel access model for EV charging service

In VANET broadcast transmission context, some references [71, 72] use the dynamic CW adaptation technique to enhance the performance of V2V and V2I communication. Indeed, this technique is based on the network congestion level. It uses the network local state to

estimate the collision rate threshold which is used for CW adapting. In our work, for the EV charging service, the CW size fluctuates according to the EV priority level and we prioritize the channel access for EV with high priority. We use the EV priority level parameter to dynamically regulate the CW size.

We suppose the following scenario; all RSUs are equipped by two communication interfaces VANET and LTE. We suppose that those two communication technologies are able to linking EVs, smart grid and all EVPSSs (see figure 5.2, figure 5.3 and figure 5.8). All vehicles are assumed to be equipped with a GPS device and they are considered to be moving along the highway in one direction (unidirectionally). We consider that the RSU periodically sends the beacon messages to announce EV charging services. According to the EV position (see figure 5.8), two cases may occur. First, if the EV is within the RSU transmission range, then the EV can connect to the RSU and exchange information related to EV charging service. Second, if the EV is out of the RSU transmission range or there is no RSU, a multi-hop communication through other EVs will be used to communicate with the nearest RSU to request the charging service announcing.

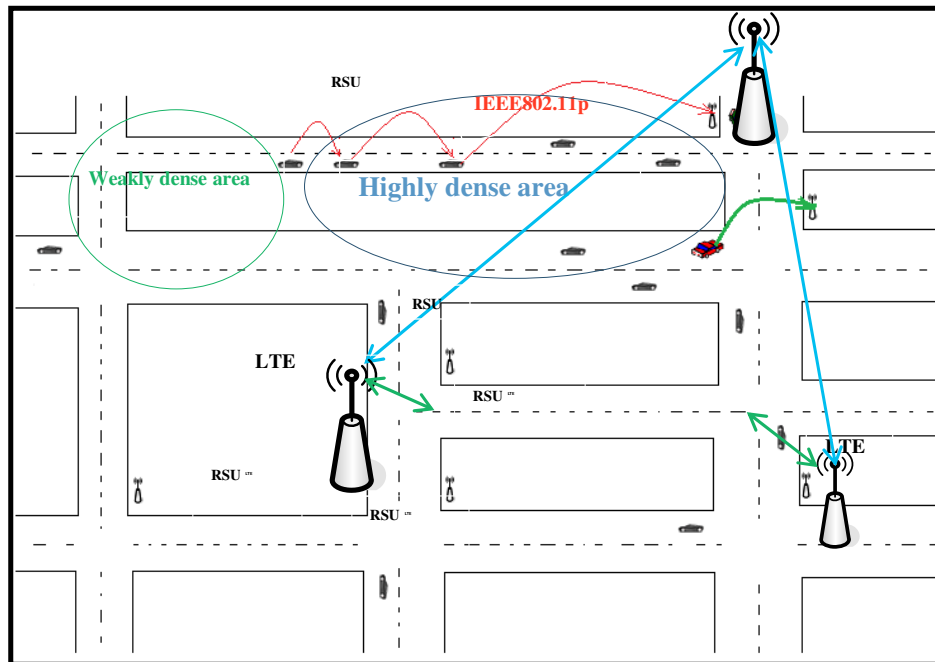


Figure 5. 8- Interaction model between RSU and EV

Table 5. 4-Notation for our model

Notation	Description
$CW$	The constant contention window
$n$	The number of EVs neighboring
$\pi_n$	The steady-state probabilities
$p_{col}$	The probability that a packet transmission encounters collision
$p_{succ}$	The probability to have a successful connexion
$\rho_n$	The probability that there is no transmission
$m$	The maximum back-off stage
$k,l$	Integer value
$P_s$	The probability that exactly one EV accesses the channel, conditioned on the fact that at least one EV had access
CW [AC]	Contention window associated with access categories (AC0, AC1, AC2, AC3)

In this paper, we focused on this second case. Indeed, in order to establish a connection with the RSU for EV charging service, the EV keeps actively scanning for beacons on CCH. Once a beacon (i.e., message describing the charging/discharging service) sent by RSU is detected by an EV, and if this EV is interested in the charging service, it sends an EV charging request frame through a multi-hop path.

We are interested in the channel access issue. We present in the following a back-off counter model, based on Markov chain, related to each EV interested on charging service. We consider that the distributed coordination function adopts an exponential back-off. This back-off is a uniform distribution integer between 0 and  $CW-1$  where  $CW$  is the contention window. We assume that an EV has always data to send describing roadside traffic or other, the channel conditions are assumed to be ideal among all EVs neighboring [71, 72, 73].

Figure 5.9 shows the system considered to represent the back-off counter process for an EV interested in charging service. The input data is the beaconing frame describing the EV charging service, where the output data is the EV success connection status.

The computation of the back-off counter is achieved as follows:

1. Select a uniform distribution integer within  $[0, CW]$ ,
2. Multiply the chosen integer by time slot at the physical layer,
3. If the channel is free, then the back-off is decremented,

4. When the back-off reaches zero, the transmission is achieved.

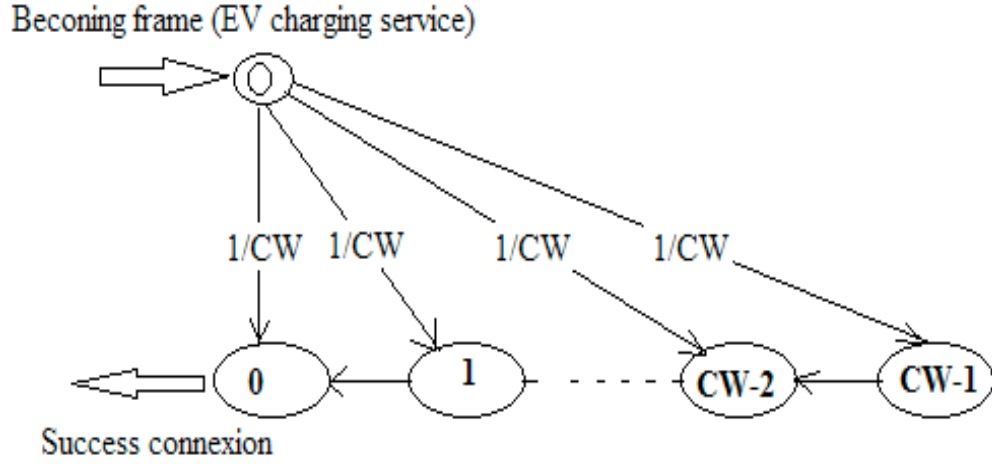


Figure 5. 9- Back-off counter Markov chain model

According to the figure 5.9, the transition probability function with time-homogenous Markov chain is defined as:

$$p(l, l + k) = p_{ij}(0, k) \equiv p_{ij}^{(k)}, \quad \forall l \quad (5.1)$$

where  $k$  and  $l$  are integer values. The transition matrix is defined as:

$$P = [p_{ij}] \quad (5.2)$$

Considering the equations and the state transition diagram given above, the correspondent transition matrix is

$$P = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{1}{CW}\right) & -\frac{1}{CW} & -\frac{1}{CW} & \dots & -\frac{1}{CW} \\ -1 & 1 & 0 & & 0 \\ 0 & -1 & 1 & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

The stationary condition related to our Markov chain model is given by:

$$\bar{\pi} * P = \bar{0} \quad (5.4)$$

where  $\bar{\pi} = [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{CW-1}]$  is the vector of stationary distribution.  $CW-1$  is the state number. Our model is completely characterized by given the transition matrix  $P$  and the initial condition  $\pi_0$ .

To solve this Markov chain, we have to solve the balance equations given by eq. (5.4) in each state and use the total probability to solve the initial condition  $\pi_0$ . The eq. (5.4) can be rewritten as:

$$\begin{cases} (1 - \frac{1}{CW})\pi_0 - \pi_1 = 0 \\ (-\frac{1}{CW})\pi_0 + \pi_1 - \pi_2 = 0 \\ (-\frac{1}{CW})\pi_0 + \pi_2 - \pi_3 = 0 \\ \cdot \\ (-\frac{1}{CW})\pi_0 + \pi_{k-1} - \pi_k = 0. \end{cases} \quad (5.5)$$

The total probability condition is:

$$\sum_{k=0}^{CW-1} \pi_k = 1 \quad (5.6)$$

The  $\pi_k$  and  $\pi_0$  expressions can be easily derived by simplifying eq. (5.5) as:

$$\pi_k = \frac{CW-k}{CW} \pi_0 \quad \text{and} \quad \pi_0 = \frac{2}{CW+1} \quad (5.7)$$

The probability to have a successful connection in a randomly chosen slot time is:

$$P_{succ} = \pi_0 = \frac{2}{CW+1} \quad (5.8)$$

The probability that there is no transmission in a given slot time (collision or idle condition) is given by:

$$\begin{aligned} \rho_n &= (1 - P_{succ})^n \\ &= (1 - \pi_0)^n \\ &= \left(1 - \frac{2}{CW+1}\right)^n \end{aligned} \quad (5.9)$$

where  $n$  is the number of EVs neighboring.

The probability of collision is given by:

$$\begin{aligned}
 p_{col} &= 1 - \rho_n \\
 &= 1 - (1 - p_{succ})^n \\
 &= 1 - (1 - \pi_0)^n \\
 &= 1 - \left(1 - \frac{2}{CW + 1}\right)^n
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

Let  $P_s$  be the probability that exactly one EV accesses the channel, conditioned on the fact that at least one EV had access, given there are  $n$  EVs,

$$P_s = \frac{n p_{succ}(1 - p_{succ})^{n-1}}{1 - (1 - p_{succ})^n} \tag{5.11}$$

By increasing  $P_s$  or decreasing its denominator which is given by  $p_{col}$  in eq (5.10), we can achieve higher throughput. This can be obtained if the value of  $(1 - p_{succ})$  increases which implies that  $p_{succ}$  needs to be small. As seen in eq.(5.8), if we increase the value of CW, we can obtain smaller  $p_{succ}$ .

The probability of collision, given by eq (5.10), decreases when CW increases and this effect is more predominant for higher values of  $n$ .

We express  $TH$  the normalised system throughput as:

$$TH = \frac{\rho_{col} P_s E \left[ \text{payload in } T_{slot} \right]}{(1 - \rho_{col}) D_{emp} + \rho_{col} P_s T_{bs} + \rho_{col} (1 - P_s) T_{bc}} \tag{5.12}$$

the expression (5.12) can be written as

$$TH = \frac{T_{st} P_s}{T_{bs} P_s + T_{bc} (1 - P_s) + D_{emp} \cdot \frac{\rho_n}{1 - \rho_n}} \tag{5.13}$$

where

- $T_{st} = E \left[ \text{payload in } T_{slot} \right]$  is the average time used during a successful transmission.
- $T_{bs}$  is the average time the channel is sensed busy because of a successful transmission.
- $T_{bc}$  is the average time the channel is sensed busy because of a collision.
- $D_{emp}$  is the duration of an empty slot time.

$TH$  can be rewritten as:

$$TH = \frac{T_{st}}{T_{bs} - T_{bc} + \underbrace{\frac{T_{bc}}{P_s} + D_{emp} \cdot \frac{\rho_n}{P_s(1-\rho_n)}}_{(1/I)}} \quad (5.14)$$

Maximizing the quantity  $TH$  returns to maximize the quantity  $(I)$  (see eq.(14)).

$$\begin{aligned} \text{Max}(I) &= \text{Max} \left\{ \frac{1}{\frac{T_{bc}}{P_s} + D_{emp} \cdot \frac{\rho_n}{P_s(1-\rho_n)}} \right\} \\ &= \text{Max} \left\{ \frac{n p_{succ} (1-p_{succ})^{n-1}}{T_{bc}^* + (1-p_{succ})^n (T_{bc}^* - 1)} \right\} \end{aligned} \quad (5.15)$$

where  $T_{bc}^* = T_{bc}/D_{emp}$ ,

where  $T_{bc}$  is the average time the channel is sensed busy because of a collision and  $D_{emp}$  is the duration of an empty slot time.

To solve eq.(5.15) we have to solve the following equation:

$$\frac{\partial(I)}{\partial(p_{succ})} = 0 \quad (5.16)$$

This last equation is equivalent to

$$(1-p_{succ})^n - T_{bc}^* \left\{ n p_{succ} - [1 - (1-p_{succ})^n] \right\} = 0 \quad (5.17)$$

The quantity  $(1-p_{succ})^n$  can be written as a development limited with order 2 when  $(1-p_{succ}) \approx 1$  and we have:

$$(1-p_{succ})^n \approx 1 - n p_{succ} + \frac{n(n-1)}{2} p_{succ}^2 \quad (5.18)$$

The solution to equations (5.15) and (5.16) is:

$$p_{succ} = \frac{\sqrt{[n + 2(n-1)(T_{bc}^* - 1)]} \sqrt{n-1}}{(n-1)(T_{bc}^* - 1)} \approx \frac{1}{n} \sqrt{\frac{2}{T_{bc}^*}} \quad (5.19)$$

Considering eq. (5.8) we have



$$CW_{opt} = n\sqrt{2T_{bc}^*} - 1 \quad (5.20)$$

The eq. (5.20) gives us the desired optimum CW value which maximizes throughput.

In the following, we present the algorithm adaptive CW which calculates  $CW_{opt}$  and assign it to high priority EV.

---

**Algorithm . Adaptive CW**

---

**Input:** EV priority level,

Beacon message describing EV charging service

**Output:** Adaptive CW[ACs],  $CW_{opt}$  /\* selected CW \*/

---

1. **For each** time and for each EV **do**,
  2. **If** collision
  3. **If** EV priority is low **then**
  4. Maintain CW[ACs]
  5. **Else If** EV priority is high **then**
  6. Calculate  $n$  the number of neighbouring EVs,
  7. Calculate  $T_{bc}^*$ , /\* According to network condition\*/
  8. Calculate  $CW_{opt}$  according to eq.(8, 20)
  9. **If**  $CW < CW_{opt}$  **then**
  10. **Increase** the corresponding CW[AC] /\* CW [AC] will doubled\*/
  11. **Else If**  $CW \geq CW_{opt}$  **then**
  12. **Maintain** the corresponding CW[ACs]
  13. **End If**
  14. **End If**
  15. **End if**
- 

The algorithm, “Adaptive CW” should be run by individual vehicles periodically to update CW [AC] values occur according to the EV priority level and the network condition (e.g., congestion, collision, etc.). In addition to the EV priority level, which is an essential

parameter for our adaptive CW algorithm, each EV needs to estimate the network conditions ( $n$ , and  $T_{bc}^*$ ) to calculate  $CW_{opt}$  by analysing the received sequence numbers at MAC layer [74, 75].

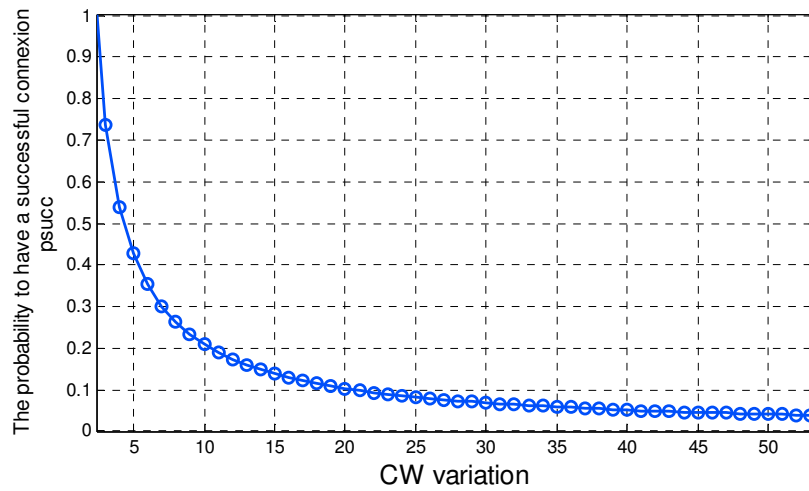
## 5.7 Simulations Results

In this section, we evaluate the performance of our proposed channel access model, using NS-2.34 and MATLAB. First, we evaluate some performance metrics such as the probability to have a successful connexion in a randomly chosen slot time, the probability of collision and the probability that exactly one EV accesses the channel, conditioned on the fact that at least one EV had access. Second, we study the efficiency of our access model for EV charging service compared with the IEEE802.11p standard technique in terms of percentage of successful EV connexions in a context of multi-hop network.

Table 5.5 summarizes the simulations parameters.

**Table 5. 5-Simulation parameters**

<b>Parameter</b>	<b>IEEE 802.11p</b>
Carrier Frequency [GHz]	5.9
Bandwidth [MHz]	10
OFDM Guard Time [ $\mu s$ ]	1.6
CWmin	3,7,15
CWmax	1023
Tslot [ $\mu s$ ]	13
Tsifs [ $\mu s$ ]	32
Multi-hop	3 hops max
Transmission range	2*300m
Vehicle density ( $Vd$ )	10 to 100 EV on 1000m of road
EV speed	10m/s,15m/s,20m/s,
Data rate	6Mbps
Messaging frequency	10 Msg/s, 20 Msg/s and 30Msg/s
Packet size	200 bytes
Propagation model	Nakagami with $m=2$
Power limit	CCH: 44.8dBm/SCH: 33bBm
Access scheme	EDCA (supported by NS-2.34)



**Figure 5.10-Probability to have successful connection**

Figure 5.10 shows the probability to have a successful connexion (i.e.,  $p_{succ}$ ) in a randomly chosen slot time versus CW variation. We observe that  $p_{succ}$  decreases when CW increases. This means that increasing the CW value improves the probability that the channel will be busy when the EV back-off counters do not reach zero yet. Indeed, when the channel is idle, an EV competes with others for channel access by starting independently its back-off timer CW; when CW becomes high, the corresponding EV gets less chance to access to channel.

Figure 5.11 shows the probability of a collision (i.e.,  $\rho_{col}$ ) versus CW variation with three (3) EV neighboring number ( $n_{EV}=30, 50, 100$ ). It is clear that the  $\rho_{col}$  is sensitive to both CW and  $n_{EV}$ ; and  $\rho_{col}$  decreases when CW increases and this effect is more pre dominant for higher values of  $n_{EV}$ .

Figure 5.12 shows the probability that exactly one EV accesses to the channel (i.e.,  $P_s$ ), conditioned on the fact that at least one EV had access versus CW variation. We observe that  $P_s$  increases when CW increases and follows inversely the  $n_{EV}$  variation. It is clear that the  $P_s$  variation converges to 0.97, 0.9 and 0.78 value for  $n_{EV}$  equal to 30, 50 and 100 respectively.

Figure 5.13 and figure 5.14 show the normalized system throughput versus CW variation with three (3) scenarios of EV neighboring number ( $n_{EV}=30, 50, 100$ ). We observe two different phases for throughput variation; firstly when CW increases, the throughput increases faster before its maximum point; the throughput follows inversely the  $n_{EV}$  variation. Secondly, the throughput decreases slower after its maximum value; this effect is more pre dominant for higher values of  $n_{EV}$ . From the two figures 5.13 and 5.14, we observe that the maximum

throughput is reached by selecting the optimum CW. It is clear in fig.14 that the optimum CW relative to each scenario are  $CW_{opt1}=5$ ,  $CW_{opt2}=13$  and  $CW_{opt3}=27$ .

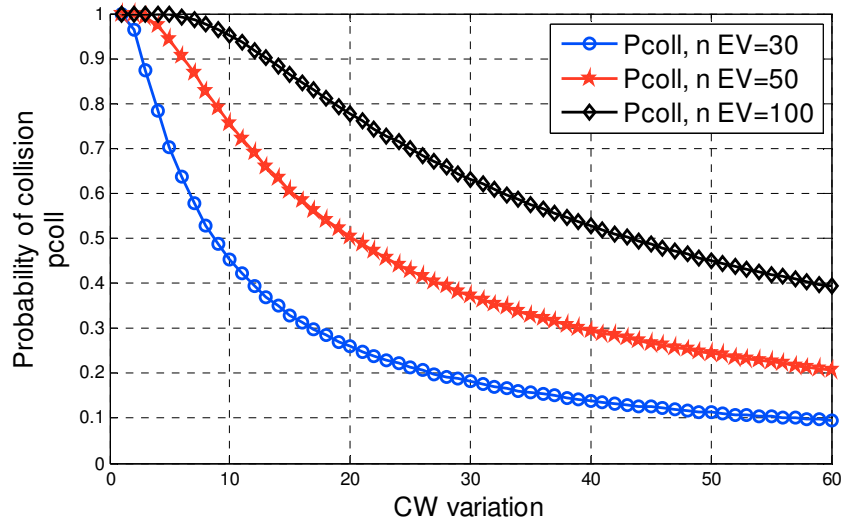


Figure 5. 11-Probability of collision

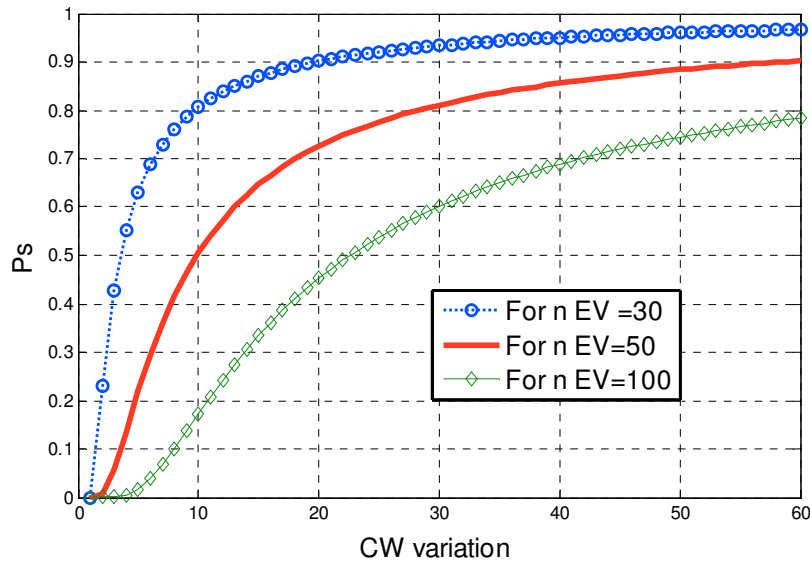


Figure 5. 12-The probability that exactly one EV accesses the channel, conditioned on the fact that at least one EV had access

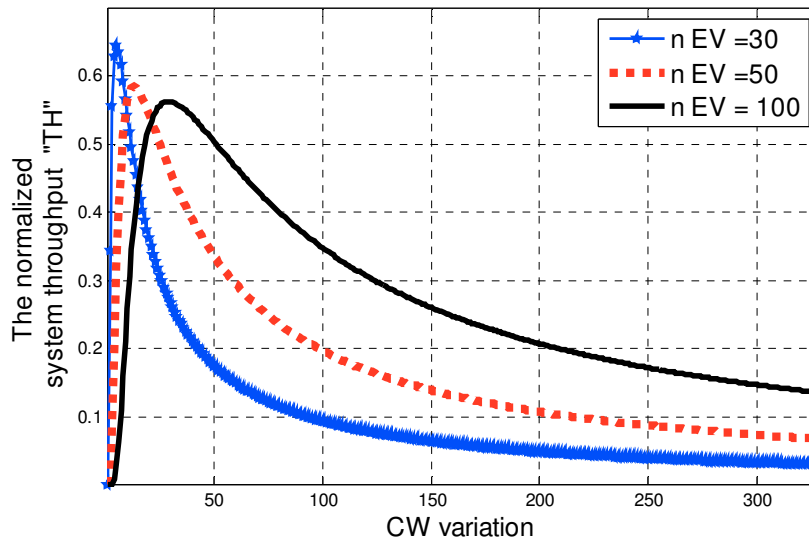


Figure 5.13- The normalized system throughput

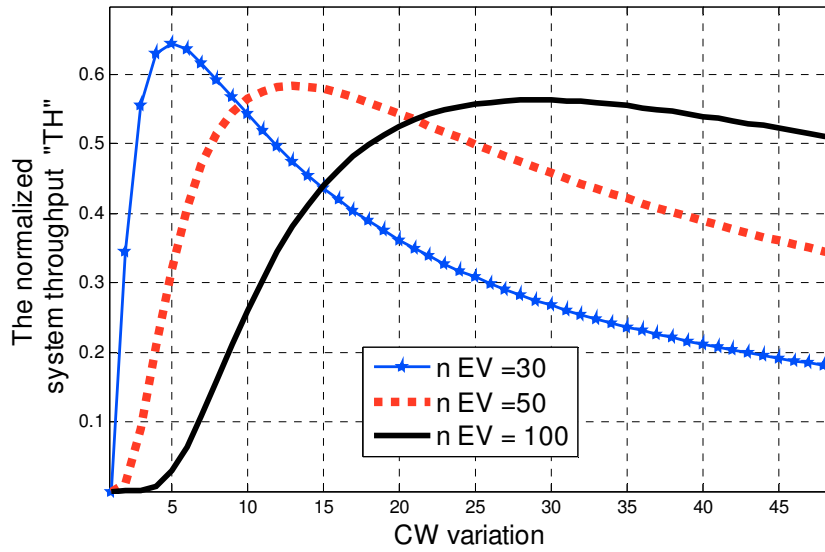


Figure 5.14-The normalized system throughput maximum value

Table 5. 6-Percentage of success EV connection for EV charging service comparison between Standard IEEE802.11p and Adaptive CW

	IEEE802.11p standard	Our algorithm: Adaptive CW	Saving rates (%)
Time in[0 149]	93	95	2.1
Time in[150 600]	79	55	30.3

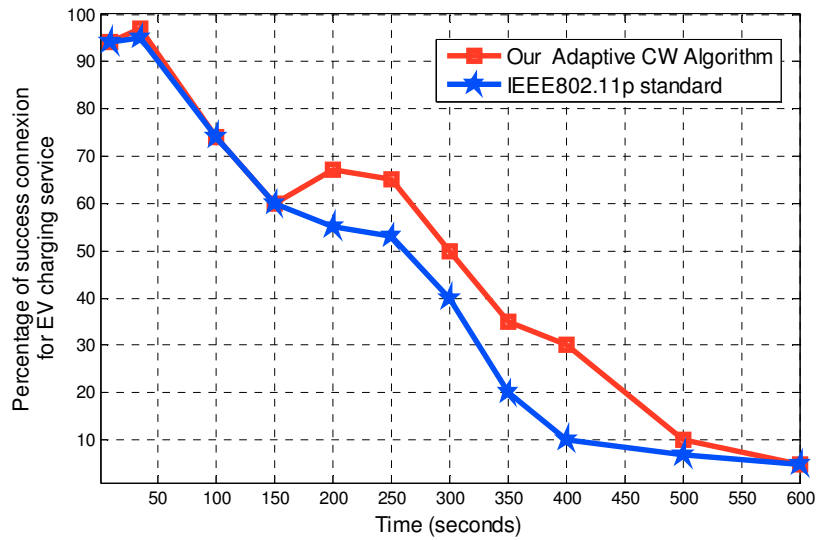


Figure 5. 15- Percentage of successful EV connection for EV charging service in dense scenarios (100 EVs)

Now, we study the efficiency of our adaptive CW algorithm compared with the standard IEEE802.11p one in terms of the percentage of successful connexion for EV charging service.

As shown in figure 5.15, there is an improvement in the percentage of successful connexion ensured by our proposed algorithm; the latter allows more EV charging service access per second with fewer losses. This means that, considering the total number of EV charging demands that should be received; the proposed adaptive algorithm is more successful than the standard IEEE802.11p.

Table 5.6 presents the observation results obtained from figure 5.15, which illustrates the performance comparison between our adaptive CW algorithm and the standard IEEE802.11p one. Indeed, our adaptive approach increases the percentage of success EV connection for EV charging service with a saving rate of more than 2.1 % and 30.3%, respectively, for the two ranges of time [0 149] and [150 600]. This result proves the effectiveness of our adaptive CW algorithm mainly for a high EV number with different EV charging priority level.

## 5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé au problème d'accès au service de recharge des VEs. En effet, depuis qu'ils sont en route et avant la phase de branchement au secteur d'électricité, les VEs qui ont besoin de recharger leurs batteries, communiquent au préalable avec la grille intelligente pour connaître la meilleure station de recharge publique disponible. Tout d'abord, on a présenté un protocole d'interaction entre la grille intelligente et les VEs ainsi que les formats de trames de la liaison montante et celle descendante. Deuxièmement, on a

proposé un modèle probabiliste d'accès au service de recharge des VE basé sur une modélisation du compteur d'accès au canal « back-off » par les chaînes de Markov. En effet, selon la priorité de VE et sa position, notre algorithme adaptatif CW permet de promouvoir l'accès à un VE de haut niveau de priorité par rapport à celui ayant un niveau de priorité faible. Ce mécanisme maximise le débit système en augmentant la probabilité d'accès au canal. Les résultats des simulations pour des scénarios réalistes des VEs, montrent que notre algorithme gère le processus d'accès au service de recharge des VEs d'une manière efficace.

Comme perspectives de ce travail, on va s'intéresser à la sécurisation des transactions liées à la facturation pour la recharge et la décharge des VEs ainsi que le profil en ligne des VEs.

## CHAPITRE 6

### Conclusion générale

#### 6.1 Conclusions

Les réseaux d'électricité gèrent le flux de puissance de côté du consommateur et du côté des ressources d'énergie au moyen d'infrastructures matérielles, comme celles de stockage, de comptage ou de communication et des infrastructures immatérielles comme les modèles et les techniques de gestion de la puissance ainsi que des algorithmes de régulation et de stabilité du systèmes de réseaux d'électricité. La nouveauté dans ce domaine vient avec la pénétration massive des VE dans le marché qui demande une énorme puissance pour leur recharge. Cela peut induire un fort impact sur les réseaux d'électricité en général. Par contre, les batteries de ces VE représentent une capacité de stockage disponible et importante recherchée par la grille intelligente pour réaliser l'équilibre entre le flux de consommation et celui de production d'énergie électrique. Cela nécessite de nouvelles infrastructures adaptées aux autonomies limitées des VE pour leurs déploiements selon les situations de stationnement, d'utilisation et leurs chargements en puissance.

Ce projet de recherche vise à la conception de modèles et protocoles pour la gestion du processus de recharge/décharge des VE. Les caractéristiques de lieux et de temps de recharge en plus des contraintes matérielles et techniques, comme les supports d'interaction avec la grille intelligente ou les contraintes liées à sa stabilité, constituent la base de travail de ce projet.

Comme premier objectif, on s'est intéressé à introduire de nouveaux schémas d'interaction VE/grille intelligente suivant des protocoles et algorithmes d'ordonnancement. Ces schémas modélisent le processus de recharge et de décharge des VE, ainsi que le transfert de données numériques entre la grille et les VE, lorsque ces derniers sont branchés aux réseaux électriques via des bornes dans des lieux résidentielles. Pour des contraintes liées à la satisfaction des demandes des VE et à la stabilité de la grille, une technique de gestion de la charge pour permettre le contrôle des coûts de l'énergie au fil du temps et d'ajuster la charge des VE à domicile a été proposée. Cette technique permet à la grille de traiter, négocier et échanger des données avec les VE et d'améliorer leur niveau de satisfaction envers le service de recharge/décharge. On a conçu des protocoles d'ordonnancement et de communication,



---

basés sur les chaînes de Markov et les files d'attente, pour optimiser le processus de chargement des VE dans des stations de recharge publiques (des temps de réponse plus courts, et des coûts moins élevés pour la recharge des VEs) tout en améliorant le niveau de stabilité de la grille.

On a proposé également des modèles de communication entre la grille et les véhicules électriques prenant en compte les contraintes temporelles et de fiabilité exprimées sous forme de niveau de satisfaction des clients sans stresser la grille. En effet, pour maximiser les avantages de l'utilisation de véhicules électriques, des besoins de contrôle régulier et optimisé pour la recharge des VEs sont nécessaires. Pour cela, on s'est intéressé à la connectivité et l'échange d'information en temps réel entre la grille intelligente et les VEs. Un nouveau modèle d'accès au canal pour négocier un service de recharge des VEs à travers les réseaux de communications véhiculaires (VANETs), a été proposé. En plus, un protocole d'interaction entre la grille intelligente et les VEs avec sa voie montante et celle descendante ainsi que les formats de trames correspondantes a été présenté.

## 6.2 Limites

Pour la première partie dans laquelle nous avons proposé des modèles d'ordonnement pour la recharge et la décharge des VEs dans un milieu résidentiel ; deux limitations principales peuvent être soulevées : la première concerne le manque de branchement et de débranchement dynamique des VEs aux bornes de recharge résidentielles durant toute la période de la nuit.

La deuxième limitation concerne le manque d'un système de coopération inter-régions pour balancer la charge d'une région à une autre qui est peut être plus dense en nombre de VEs branchés aux résidences, dans le but de réduire les pics de demande.

La deuxième partie qui concerne les modèles d'interaction et les schémas de communications sans fils entre les VEs et la grille intelligente loin des bornes de recharge, on souligne le manque d'une stratégie unifiée pour faire communiquer les VEs avec la grille d'une manière permanente et de partout : à la résidence et avant branchement au secteur, dans l'autoroute, au centre ville etc.. , dans le but d'améliorer la stabilité de la grille le plus possible et satisfaire affinement les demandes de charge en électricité des VEs.

### 6.3 Perspectives

Comme perspectives de ce travail, pour la première partie où on a traité des modèles d'ordonnancement pour la recharge et la décharge des VEs, nous allons introduire des contraintes supplémentaires (par exemple, plusieurs niveaux de priorité pour les véhicules électriques) dans les algorithmes proposés pour affiner le niveau de satisfaction des demandes des VEs et pour améliorer aussi la stabilité de la grille. Des modèles V2G et G2V itératifs et adaptables aux instants de branchement des VEs et décentralisés peuvent aussi être une bonne piste pour étendre ce travail.

En ce qui concerne la deuxième partie qui s'intéresse aux communications sans fils entre les VEs et la grille intelligente, dans le but d'intégrer les VEs dans le système des villes intelligentes comme étant un consommateur actif d'énergie électrique, qui deviendra par la suite un consomm'acteur, on va se focaliser sur la sécurisation des transactions liées à la facturation pour la recharge et la décharge des VEs. Le portail client VE en ligne peut être aussi une perspective importante, en effet un espace client sera proposé pour des questions de transparence et de sécurité afin de suivre par exemple la facture en ligne ou pour des mises à jour du profile propriétaire du véhicule électrique.

# ANNEXE – Standards et caractéristiques liées au VE

conductive charging system - compatibility of different modes und cases							
CPL	mode	situation / power*	vehicle inlet / connector	cable and wall / infrastructure	CPL	architecture for mode	
no control pilot signal	1	domestic 1-phase 3.7kW up to 16A	none /	resistive coding via Power Indicator national plug and socket systems	no control pilot provided by wall equipment	<b>power contacts</b> 1 DC-/power AC 1 4/5 2 DC-/power AC 2 4/5 3 power AC 3 5 4 mains 1 1-3 5 mains 2 1-3 6 mains 3 1-3 7 mains 4 1-3 8 GND / EARTH 1-5  <b>signal pins</b> 9 Control Pilot 2-5 10 DATA+ 4-5 11 DATA- 4-5 12 DATA GND 4-5 13 Power Indic. 1 1 14 Power Indic. 2 1  <b>only mains AC</b>  1-3  <b>mains AC and high power DC</b>  1-4  <b>mains AC and high power AC</b>  1-3, 5	
		IEC 309-2 up to 16A	1-phase 3.7kW 3-phase 11kW	IEC 309-2 plug and socket system			
	control pilot according SAE 1772	2	unspecific up to 32A	1-phase 7.4kW 3-phase 22kW			in-cable protection device provides control pilot unspecific outlets (IEC 309-2 32A devices included)
		3	dedicated up to 32A	1-phase 7.4kW 3-phase 22kW			case B up to 32A AC, DC or / and high power AC charging station
90% duty cycle	4	DC up to 400A		mains AC DC quick charging high power AC	control pilot provided		
	U.C.	high power AC up to 250A					

\* maximum power at IEC recommended standard voltage 230V/400V file: IEC1ABL1SCH application: PROTEL for WINDOWS 2.2 date: 15-04-98 drawn by Arno & Axel

Figure A. 1- Les standards IEC 61851-1 [76]

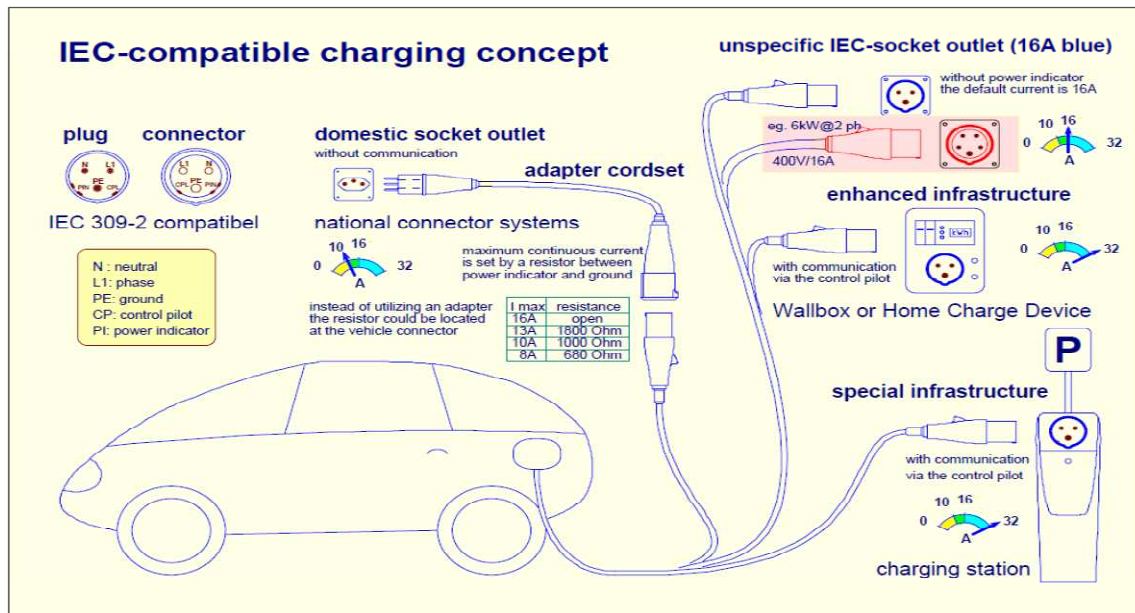


Figure A. 2- Les concepts de chargement compatible aux standards IEC [76]

Table A. 1-Liste de normes utilisées pour le mesurage de l'électricité en Amérique du Nord [77]

Norme	Titre	État	TC/SC/WG
<b>S-EG-05</b>	Norme visant l'approbation des appareils de mesure de l'électricité et du gaz commandés par logiciel	Publiée en 2012 <b>Priorité</b>	Groupe de travail de Mesures Canada
<b>S-EG-06</b>	Norme sur les consignateurs d'événements pour les appareils de mesure de l'électricité et du gaz	Publiée en 2012 <b>Priorité</b>	Groupe de travail de Mesures Canada
<b>ANSI C12.18</b>	Protocol Specification for ANSI Type 2 Optical Port [identique à IEEE 1701]	V2.0 publiée en 2006 <b>Priorité</b>	ASC12 SC17 WG4*
<b>ANSI C12.19</b>	Utility Industry End Device Data Tables [identique à IEEE 1377]	V2.0 publiée en 2008 <b>Priorité</b>	ASC12 SC17 WG2*
<b>ANSI C12.21</b>	Protocol Specification for Telephone Modem Communication [identique à IEEE 1702]	V2.0 publiée en 2006	ASC12 SC17 WG4*
<b>ANSI C12.22</b>	Protocol Specification For Interfacing to Data Communication Networks [identique à IEEE 1703]	V1.0 publiée en 2008 <b>Priorité</b>	ASC12 SC17 WG2*
<b>IEEE 1377</b>	Standard for Utility Industry Metering Communication Protocol Application Layer (End Device Data Tables) [identique à ANSI C12.19]	V2.1 approuvée par vote en 2010 <b>Priorité</b>	IEEE SCC31 P1377 WG*
<b>IEEE 1701</b>	Standard for Optical Port Communication Protocol to Complement the Utility Industry End Device Data Tables [identique à ANSI C12.18]	V2.0 publiée en 2010 <b>Priorité</b>	IEEE SCC31 P1701/P1702 WG*
<b>IEEE 1702</b>	Standard for Telephone Modem Communication Protocol to Complement the Utility Industry End Device Data Tables	V2.0 publiée en 2010	IEEE SCC31 P1701/P1702 WG*
<b>IEEE 1703</b>	Standard for Local Area Network/Wide Area Network (LAN/WAN) Node Communication Protocol to Complement the Utility Industry End Device Data Tables [identique à ANSI C12.22]	V1.0 publiée en 2012 <b>Priorité</b>	IEEE SCC31 P1703 WG*

Norme	Titre	État	TC/SC/WG
XML-2008	Extensible Mark-up Language (XML) Recommendation (Fifth Edition) [utilisée dans ANSI C12.19 et IEEE 1377 pour le langage d'échange de données d'entreprise, la gestion de la configuration et le langage de définition de table]	V1.0 publiée en 2008	W3C
XHTML	XHTML™ 1.0 The Extensible HyperText Markup Language (Second Edition) [utilisée dans ANSI C12.19 et IEEE 1377 pour la documentation de gestion de la configuration du langage de modèle de table]	E2.0 publiée en 2002	W3C
ISO/IEC 62056-62	Electricity metering – Data exchange for meter reading, tariff and load control – Interface classes. OBIS/COSEM [comprend les modèles (tables) de données ANSI C12.19 et IEEE 1377]	Publiée en 2006	CEI/TC13
<b>ISO/IEC 15955 X.237 bis</b>	Technologies de l'information – Interconnexion des systèmes ouverts – Protocole en mode sans connexion pour l'élément de service de contrôle d'association des objets de service d'application [définit le format de message utilisé dans les normes ANSI C12.22 et IEEE 1703]	Publiée en 1999 <b>Priorité</b>	ITU X
ISO/IEC 10035-1, X.237 / Amendment 1	Technologies de l'information – Interconnexion de systèmes ouverts (OSI) – Élément de service de contrôle d'association : Spécification du protocole	Publiée en 1995	ITU X
ISO/IEC 8824-1 / ITU-T X.680	Technologies de l'information – Notation de syntaxe abstraite numéro un (ASN.1) : Spécification de la notation de base [définit les notations de syntaxe abstraite utilisée dans les normes ANSI C12.22 et IEEE 1703]	Publiée en 1995	ITU-X
<b>ISO/IEC 8825 / ITU-T X.690</b>	Technologies de l'information – Règles de codage ASN.1: Spécification des règles de codage de base (BER), des règles de codage canoniques (CER) et des règles de codage distinctives (DER) [définit les règles de codage de la charge utile utilisées dans les normes ANSI C12.22 et IEEE 1703]	Publiée en 2003 <b>Priorité</b>	ITU-X
<b>RFC 6142</b>	ANSI C12.22, IEEE 1703, and MC12.22 Transport Over IP	Publiée en 2011 <b>Priorité</b>	IETF
<b>Lignes directrices de l'AEIC sur l'interopérabilité</b>	Smart Grid/AEIC AMI Interoperability Standard Guidelines for ANSI C12.19 / IEEE 1377 / MC12.19 End Device Communications and Supporting Enterprise Devices, Network and related accessories	V2.0 publiée en 2010 <b>Priorité</b>	AEIC/AMTI, et NIST/SGIP PAP5/ Groupe de travail de Mesures Canada
FIPS PUB 180-2	Secure Hash Signature Standard (SHS) FIPS PUB 180-2) [utilisée dans les normes ANSI C12.19 / IEEE 1377 pour la fonction de condensé des signateurs]	Publiée en 2002	NIST

Norme	Titre	État	TC/SC/WG
**FIPS Pub 197	Advanced Encryption Standard (AES), Federal Information Processing 28 Standards Publication 197 [utilisée dans les normes ANSI C12.22 et IEEE 1703 pour la fonction de condensé des consignateurs]	Publiée en 2001 Lacune	NIST
**SP800-38A	Recommendation for Block Cipher Modes of Operation; Methods and Techniques [utilisée dans les normes ANSI C12.22 et IEEE 1703 pour la fonction de condensé des consignateurs]	Publiée en 2001 Lacune	NIST
**NIST SP 800-38B	Recommendation for Block Cipher Modes of Operation : The CMAC Mode for 38 Authentication [utilisée dans les normes ANSI C12.22 et IEEE 1703 pour la fonction de condensé des consignateurs]	Publiée en 2005 Lacune	NIST

\* Élaborées conjointement avec le Groupe de travail de Mesures Canada chargé du protocole de communication des données relatives aux appareils de mesure électroniques

---

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] <http://sgcanada.org/>
- [2] <http://energy.gov/oe/technology-development>
- [3] [http://www.hitachi.com/environment/showcase/solution/energy/images/img\\_smartgrid/smartgrid\\_02.jpg](http://www.hitachi.com/environment/showcase/solution/energy/images/img_smartgrid/smartgrid_02.jpg).
- [4] <http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/bin/view/SmartGrid/WebHome>.
- [5] [http://www.smartgrids-cre.fr/media/documents/CapG\\_SmartEnergyServices.pdf](http://www.smartgrids-cre.fr/media/documents/CapG_SmartEnergyServices.pdf).
- [6] Z. Fan, P. Kulkarni, S. Gormus, C. Efthymiou, G. Kalogridis, M. Sooriyabandara, Z. Zhu, S. Lambotharan, W. H. Chin, 'Smart Grid Communication : Overview of Research Challenges, Solutions, and Standardization Activities' 2011, in IEEE Communications Surveys and Tutorials.
- [7] Meade, Bill. Demand Side Management. Presentation at USEA Global Low Carbon Workshop May 2011. Available from:  
[http://www.usea.org/Programs/EUPP/globalowcarbonworkshop/Mar3/Bill\\_Meade\\_Demand\\_Side\\_Management.pdf](http://www.usea.org/Programs/EUPP/globalowcarbonworkshop/Mar3/Bill_Meade_Demand_Side_Management.pdf) [Accessed 16 May 2011]
- [8] P. Samadi, A. Mohsenian-Rad, R. Schober, V. Wong, and J. Jatskevich, "Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid," in IEEE SmartGridComm 2010, 2010, pp. 415–420.
- [9] A.H Rad, A.L Garcia, "optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments", IEEE transaction in Smart Grid vol.1 NO.2, September 2010.
- [10] S. Caron G. Kesidis, 'Distributed scheduling algorithms for smart grid' IEEE SmartGridsComm, Gaithersburg, MD, Oct. 2010.
- [11] G. T. Costanzo, J. Kheir, G. Zhu, 'Peak-load shaving in smart homes via online scheduling', IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2011, pp 1347–1352, IEEE, 2011.
- [12] T. Hubert, S. Grijalva. 'Realizing smart grid benefits requires energy optimization algorithms at residential level', Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES.
- [13] <http://www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperFR.pdf>.
- [14] [http://www.fleetbusiness.com/fleet\\_guides/2013/ford2013fleetguidefrench.pdf](http://www.fleetbusiness.com/fleet_guides/2013/ford2013fleetguidefrench.pdf).

- [15] <http://blog.addenergietechnologies.com/bornes-de-recharge/la-recharge-de-vehicules-electriques-23-un-standard-mondial/>
- [16] <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/cout.html> Caractéristique des VEs.
- [17] <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/duree-recharge.html>
- [18] <http://roulezelectrique.com/devoilement-reseau-ver-bornes-recharge-addenergie/>
- [19] Jasma Tomic and Willet Kempton. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. University of Delaware, 2007.
- [20] S.ruthe, J. Schmutzler, C.Rehtanz C. Wietfeld, `` Study on V2G Protocols against the Background of Demand Side Management `` , IBIS Issue 2011.
- [21] S. Kaebisch, A. Schmitt, M. Winter, and J. Heuer, “Interconnections and communications of electric vehicles and smart grids,” in Smart Grid Communications (Smart Grid Comm), 2010 First IEEE International Conference on, 2010, pp. 161 –166.
- [22] J.Schmutzler, C.Wielfeld, ‘Analysis of message sequences and encoding efficiency for electric vehicle to grid interconnections’, IEEE Vehicular Networking Conference 2010.
- [23] C. Lewandowski, St. Haendeler, C.Wietfeld, ‘Performance evaluation of large-scale charge point networks for electric mobility services’, ICSNC 2011
- [24] S.Deilami, A.S.Masoum, P.S.Moses, M.A.S.Msoum, ‘Real-time coordination of plug-in Electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile’ IEEE Transactions on Smart grid, vol’2,NO.3September 2011.
- [25] Q. Li ,R.Negi, ‘Distributed Scheduling in Cyber-physical Systems: The Case of Coordinated Electric Vehicle Charging’, IEEE International Workshop on Smart Grid Communications and Networks, 2011.
- [26] Z. Ma, I. Hiskens, D.Callaway, “A decentralized MPC strategy for charging large populations of plug-in electric vehicles”, International Federation of Automatic Control (IFAC), September 2011.
- [27] S.Shao, T.Zhang, M.Pipattanasomporn, “Impact of TOU Rates on distribution load shapes in Smart Grid with PHEV penetration”, Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, 19-22, Apr. 2010.



- 
- [28] P. Lopes, P. M. Rocha Almeida, "a stochastic model to simulate electric vehicles motion and quantify the energy required from the grid", 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm Sweden - August 22-26, 2011.
- [29] C.Farkas, L.Prikler, "Stochastic modeling of EV charging at charging stations", ICREPQ'12, Spain, March 2012.
- [30] S.Saranghi, P.Dutta and K.jalan, 'IT infrastructure for providing energie-as-a-service to electric vehicles', IEEE transactions on SMART Grid, Vol.3, 2, June 2012.
- [31] L.Lam, K. Ko, H.Tung, H.Tung, W.Lee, K.Tsang, L. Lai, ' Advanced Metering Infrastructure for Electric Vehicle Charging'', Smart Grid and Renewable Energy, 2011, pp. 312-323.
- [32] A. Majumder and J. Caffery J, "Power line communications," Potentials, IEEE, vol. 23, no. 4, pp. 4-8, 2004, 0278-6648.
- [33] Electric Vehicles (EV) <http://www.ieso.ca/>
- [34] Assessment of Plug-in Electric Vehicle Integration with ISO/RTO Systems, <http://www.iso-rto.org>
- [35] ISO/IEC 15118-x, Vehicle to Grid communication interface, Geneva, Switzerland.
- [36] IEC TC/SC 23 62196-x, Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets Conductive charging of electric vehicles, Geneva, Switzerland.
- [37] N. Li, L. Chen, and S. H. Low, "Optimal demand response based on utility maximization in power networks," in IEEE PESGM 2011, Detroit Michigan, USA-July 24<sup>th</sup>-28<sup>th</sup>, 2011.
- [38] P. Wang, L. Rao, X. Liu, Y. Qi, "Dynamic Power Management of Distributed Internet Data Centers in Smart Grid Environment", IEEE Globecom, Houston, Texas, USA, 5-9 December 2011.
- [39] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, "Parallel and Distributed Computation," Prentice-Hall, 1989.
- [40] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization," Cambridge University Press, 2004.
- [41] SAE Ground Vehicle Standards Status of work – PHEV +". SAE International. 2010-01. pp. 1-7. Retrieved 2010-09-03.

- 
- [42] N. Ruiz, I. Cobelo, and J. Oyarzabal, “A direct load control model for virtual power plant management,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 2, pp. 959–966, 2009.
- [43] Q. Wu, P. Wang, and L. Goel, “Direct load control (dlc) considering nodal interrupted energy assessment rate (niear) in restructured power systems,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3, pp. 1449–1456, 2010.
- [44] S. Caron and G. Kesidis, “Incentive-based energy consumption scheduling algorithms for the smart grid,” in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pp. 391–396, IEEE, 2010.
- [45] J. Lee, H.-J. Kim, G.-L. Park, and M. Kang, “Energy consumption scheduler for demand response systems in the smart grid,” *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 955–969, 2012.
- [46] D. Said, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “Advanced Scheduling Protocol for Electric Vehicle Home Charging with Time-of-Use Pricing”, *IEEE ICC 2013-Wireless Network symposium*, Budapest, 9-13 June 2013.
- [47] S. Boyd and L. Vandenberghe, “*Convex Optimization*,” Cambridge University Press, 2004.
- [48] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, “*Parallel and Distributed Computation*,” Prentice-Hall, 1989.
- [49] Soares .F, Lopes J and Almeida P, A stochastic model to simulate electric vehicles motion and quantify the energy required from the grid, *17th Power Systems Computation Conference*, Stockholm Sweden - August 22-26, 2011.
- [50] D. Lojowska, D. Kurowicka, G. Papaefthymiou, and L. Sluis, “Stochastic modeling of power demand due to EVs using copula”, *IEEE Transactions on Power System*, vol. 27, no. 4, November 2012.
- [51] R. Nelson, “*Probability, stochastic process and queueing theory*”, 1995 springer-verlag New york, ISBN 0-387-94452-4, , pp. 283–384.
- [52] H. Taylor and S. Karlin, “*An introduction to stochastic modeling*”, Academic Press 1998, Third Edition, ISBN 0-12-684887-4, pp. 95–408.
- [53] J. Norris, “*Markov Chains*”, Cambridge University Press 1997, ISBN 0-521-48181-3.

- 
- [54] Y. Xia and D.Tse, "On the Large Deviations of Resequencing Queue Size: 2-M/M/1 Case". IEEE Transactions on Information Theory, vol. 54, no. 9, September 2008. Page 4107-4118.
- [55] M. Neely, C. Rohrs and E. Modiano, "Equivalent Models for Queueing Analysis of Deterministic Service Time Tree Networks", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 51, NO. 10, PP. 3576-3584, OCT. 2005.
- [56] Qiu M, Xia T, Feng, F, Wu L and Jin G, Queueing Theory-based Path Delay Analysis of Wireless Sensor Networks, Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 11, no. 2, pp. 3-8, 2011.
- [57] Jaiswal N, "priority queues", New York, Academic Press, 1968.
- [58] C. Schaack and R. Larson, "An N server Cut-off Multi-priority queue", Operation research center, Working Paper, February 1985.
- [59] M. Bataineh, "Stochastic Loss systems: model and policies", Jordan Journal of Mathematics and Statistics (JJMS), 2008.pp.105-121.
- [60] N. Jaiswal, "Preemptive resume priority queue", Operational Research Group, Defence Science Laboratory, Delhi 6, India, 1961.
- [61] B. Li, C. Linb and S. Chanson, "Analysis of a hybrid cutoff priority scheme for multiple classes of traffic in multimedia wireless networks", J. Baltzer AG, Science Publishers, Wireless Networks 4 (1998) 279–290.
- [62] IEEE P802.11p/D3.0, "Draft Amendment to Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Amendment 7: Wireless Access in Vehicular Environment," 2007.
- [63] IEEE P1609.4, "Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Multi-Channel Operation," 2006.
- [64] IEEE Std P1609.3, "IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)-Networking Services," 2007.
- [65] IEEE P1609.2, "Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Security Services for Applications and Management Messages," 2006.

- 
- [66] IEEE P1609.1, “Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Resource Manager,” 2006.
- [67] M. Abdullah, A. Yonis, “Performance of LTE Release 8 and Release 10 in wireless communications”, International Conference on Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec),, 2012 , Page(s): 236 – 241.
- [68] Li.Wei, C. Jiadi ,L. Hang ,W. Bin ,“Performance and Analysis on LTE System under Adjacent Channel Interference of Broadcasting System”, IEEE 12th International Conference on Computer and Information Technology (CIT) , 2012 , Page(s): 290 – 294.
- [69] Y. Xu, C. Fischione “Real- time scheduling in LTE for Smart Grid”, Proceedings of the 5th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, ISCCSP 2012, Rome, Italy, 2-4 May 2012.
- [70] “SAE International, DSRC Implementation Guide. A guide to users of SAE J2735 message sets over DSRC,” Feb. 2010. Available at: <http://www.sae.org/standardsdev/dsrc/DSRCImplementationGuide.pdf>.
- [71] A.Ksentini, A.Nafaa, A.Gueroui, M.Naimi, “Determinist contention window algorithm for IEEE802.11”, IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications September 11 - 14, 2005, International Congress Center (ICC), Berlin, Germany.
- [72] E.M. Cheung, G.W. Wong, R.W. Donaldson, “Probabilistic contention window control in 802.11 WLANs”, Communications, Computers and signal Processing, IEEE Pacific Rim PACRIM, Vancouver, BC, Canada 2003.
- [73] Y.Dehti, H Benaboud,N.Mikou,”A geometric distribution for backoff time in IEEE 802.11 DCF:an analytical study”, International Journal of communication networks and information security (IJCNIS), vol.5,No.3,December 2013.
- [74] N. Balon and J. Guo, “Increasing Broadcast Reliability in Vehicular Ad Hoc Networks,” in VANET '06: Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks, Los Angeles, California, Sep. 2006, pp. 104–105.
- [75] “Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report: Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC,” Vehicle Safety Communications Consortium consisting of, BMW, DaimlerChrysler, Ford, GM, Nissan, Toyota, and VW, Mar. 2005.

- [76] CNC/CEI, les normes et la technologie des réseaux intelligent, 'Feuille de route pour la normalisation du réseau intelligent au CANADA, document de planification stratégiques', Octobre 2012.
- [77] <http://www.park-charge.ch/documents/EV-infrastructure%20project.pdf>.
- [78] D. Said, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, "Scheduling Protocol with Load Management for EV Charging", IEEE GlobCom 2014, Austin, Texas USA, 8-12 December 2014.
- [79] D. Said, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, "Multi-Priority Queuing for EVs Charging at Public Supply Stations with Price Variation", Journal Wireless Communication and Mobile Computing (WCM) 2014, Wirel. Commun. Mob. Comput. (2014), John Wiley. DOI: 10.1002/wcm.2508.
- [80] D. Said, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, "Queuing model for EVs Charging at public supply stations", Proceedings of IEEE IWCMC 2013, Cagliari, July 1st-5th, 2013, pp 65-70.

---

## LISTE DES PUBLICATIONS

1. **D. Said**, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “Scheduling Protocol with Load Management for EV Charging”, Proceedings of IEEE GLOBECOM **2014**, Texas, Austin, USA, December 8th-December 12th 2014.
2. **D. Said**, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “ Multi-Priority Queuing for EVs Charging at Public Supply Stations with Price Variation”, Journal Wireless Communication and Mobile Computing (WCM) 2014, Wirel. Commun. Mob. Comput. (**2014**), John Wiley. DOI: 10.1002/wcm.2508.
3. **D. Said**, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “Queuing model for EVs Charging at public supply stations”, Proceedings of IEEE IWCMC 2013, Cagliari, July 1st-5th, **2013**, pp 65-70.
4. **D. Said**, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “Advanced Scheduling Protocol for Electric Vehicle Home Charging with Time-of-Use Pricing”, Proceedings of IEEE ICC **2013**, Budapest, Jun 9th-Jun 13th 2013, pp 6272-6276.
5. J. Rezgui, S. Cherkaoui, **D. Said**, “A Two-Way Communication Scheme for Vehicles Charging Control in the Smart Grid”, Proceedings of IEEE IWCMC **2012**, Cyprus, Aug 27th-30th 2012, pp 883-888.
6. **D. Said**, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “Guidance Model for EV Charging Service”, submitted in IEEE ICC **2015** .
7. **D. Said**, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “Channel Access Model for EV Charging Service”, submitted in JSAC, septembre 2014
8. **D. Said**, S. Cherkaoui, L. Khoukhi, “Dynamic Scheduling Algorithm and Load Management Technique for EVs charging”, submitted in IEEE Transaction on Smart Grid, septembre 2014