
Exploitation de la capacité de stockage de véhicule électrique dans la gestion optimale du flux énergétique de bâtiments : Contribution à la convergence transport/ habitation

Ardavan Dargahi¹, Frédéric Wurtz¹, Stéphane Ploix²

¹G2Elab : Laboratoire de recherche en génie électrique de Grenoble,

²G-SCOP : Laboratoire des sciences pour la conception, l'optimisation et la production de Grenoble

RÉSUMÉ. Cette publication traite d'une démarche d'optimisation des flux énergétiques dans les systèmes bâtiments auxquels sont reliés des véhicules électriques. Un problème d'optimisation de la consommation d'énergie est formulé en Programmation Linéaire en Nombre Entier (PLNE) pour le système considéré. Cette formulation est appliquée à différents scénarios combinant bâtiments et véhicules électriques.

MOTS-CLÉS : Bâtiments, Véhicules électriques, V2H, Convergence, Gestion d'énergie

1. Introduction

Tant à l'échelle mondiale que nationale, le secteur transport ainsi que celui du bâtiment constituent les deux secteurs de pollution et de consommation d'énergie les plus importants. En 2009, ces deux secteurs d'activité ont respectivement représenté 31% et 43% de la consommation d'énergie primaire en France [COM 2010]. Par ailleurs, alors que le niveau de rejets de CO₂ chute dans tous les autres secteurs d'activité, celui-ci n'a pas cessé de croître dans la construction et le transport routier [CIT 2010] depuis 1990.

Ce constat révèle que la question du logement et du déplacement sont indissociables dans une lutte plus efficace contre la pollution et le changement climatique. Il va donc falloir envisager le problème dans son intégralité et aller vers de nouvelles approches globales axées sur la synergie entre le bâtiment et véhicule électrique (VE). Dans cet esprit de nouvelles solutions très prometteuses ont déjà commencé à émerger à l'horizon. La vision V2H en est une des plus

connue. Elle a vu le jour au début des années 2000 comme une extension du concept V2G. Ce dernier est décrit en détail dans [KEM 2005].

La technologie V2H conçoit la voiture électrique comme une source accessoire d'énergie pour maintenir une alimentation électrique stable dans les habitations. Les auteurs de [KEM 2000] prétendent que les véhicules personnels ne sont en moyenne engagés que 4% de temps en une journée pour le transport. Donc le reste du temps les VE stationnés peuvent devenir des unités de stockage immobiles qui peuvent être exploités selon les besoins de l'habitat. Pourtant l'association bâtiment/véhicule affiche l'image d'un système énergétique très complexe dont la fiabilité et la performance économique sont conditionnées par un pilotage correct et intelligent des ressources qu'ils intègrent.

Le travail qui va être présenté dans ce document vise la gestion de flux énergétique dans un système V2H. Il applique les techniques d'optimisation à un cas d'utilisation pour faire ressortir une stratégie de pilotage permettant aux usagers de moduler leur production et consommation dans les prochaines heures afin de rendre le système plus viable économiquement. L'objectif recherché est alors de détecter le point de fonctionnement optimal du système pour réduire au minimum la facture électrique des exploitants de systèmes V2H domestiques sur une journée cible.

A cet égard la suite de cet article s'organise de la manière suivante. La section prochaine donne un aperçu global sur la structure d'une application V2H et explique le rôle de ses composants. La section 3 décrit la méthodologie (approche par optimisation) appliquée en vue de parvenir aux objectifs prédéfinis. Le cas d'étude, faisant l'objet de la démarche de la gestion optimale, sera présenté et les résultats d'optimisation seront fournis en section 4 ; et finalement la dernière section conclut cet article.

2. Description du système et considérations énergétique

La **figure 1** schématise l'architecture typique d'une application V2H. Elle combine une multitude de moyens de production d'énergie (panneaux solaire, voiture, réseau) pour maintenir une alimentation stable dans l'habitat. On notera que la gestion de ces ressources rassemblées proches du lieu de consommation dans cette configuration pourrait déclinier le coût de transmission d'électricité et les pertes d'énergie qui s'en suivent.

Une frontière implicite en pointillée sur le schéma sépare les moyens de production d'énergie des charges consommatrices; la position particulière du véhicule est révélatrice de la double fonction fournisseur/consommateur d'énergie que l'option V2H lui procure. Les flèches en couleurs indiquent le sens de la circulation des flux d'énergie entre les différents composants du système. Le fonctionnement de chacun de ces composants de base va être discuté dans la suite.

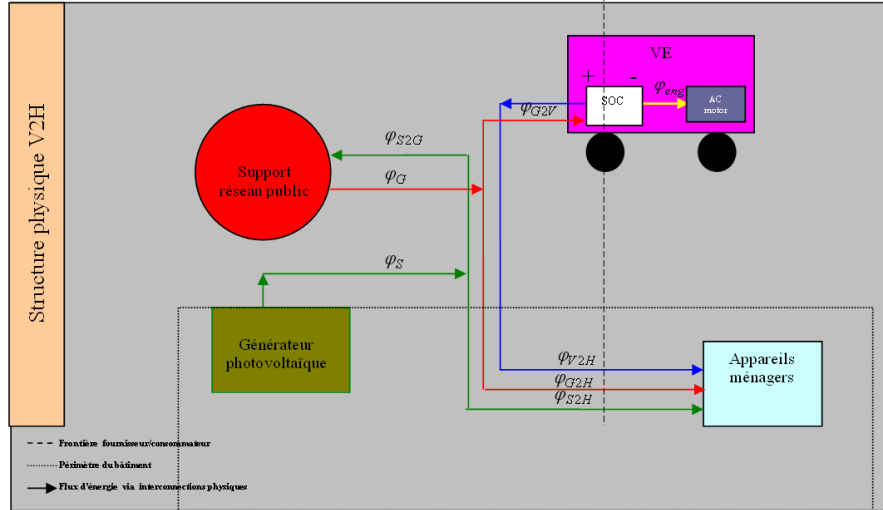


Figure 1. Structure globale d'une application V2H et le circuit de flux d'énergie

2.1 Générateur solaire Photovoltaïque

Il permet aux ménages de satisfaire une partie de leur besoin en énergie sans le moindre impact sur l'environnement depuis une source propre issue des rayons du soleil.

Le V2H offre un précieux moyen de gérer la production épisodique d'énergies renouvelables. La production solaire récupérable peut être stockée et mise à disposition en cas d'un épisode de mauvais temps ou d'une panne de courant pour compenser la carence d'électricité du secteur. En plus Les politiques incitatives adoptée dans certains pays du monde pour encourager une production décentralisée de l'électricité renouvelable permettent aux propriétaires des systèmes solaires de générer un petit revenu à travers la revente et/ou l'autoconsommation de leur production locale.

Comme la **figure 1** le montre, le flux d'énergie issue des panneaux solaire (φ_S) est ingurgitée soit par l'habitation (φ_{S2H}) soit par le véhicule électrique (φ_{S2V}) et puis, le cas échéant, l'excédent peut être puisé sur le réseau public (φ_{S2G}). La relation de bilan ci-dessus permet de vérifier l'équilibre entre la production et la consommation de l'électricité PV à chaque instant.

$$\varphi_S(t) = \varphi_{S2V}(t) + \varphi_{S2H}(t) + \varphi_{S2G}(t) \quad [1]$$

t introduit le fait que la journée a été discrétisée en des périodes de temps $t \in \{1, \dots, 24\}$, avec $\Delta t = 1h$.

2.2. Charges électriques

Le mot « bâtiment » est toujours associé à la consommation d'énergie. Les équipements de service placés dans un bâtiment, de grands systèmes de chauffage et de refroidissement à des petits électroménagers, ont tous besoin de l'énergie électrique pour créer un cadre de vie confortable. Ce besoin est pris en charge par les ressources énergétiques qui sont mises en place dans le bâtiment. La relation [2] est l'expression mathématique de ceci.

$$\varphi_{load}(t) = \varphi_{G2H}(t) + \varphi_{S2H}(t) + \varphi_{V2H}(t) \quad [2]$$

Donc une façon simple pour modéliser les charges induites par la consommation des appareils électriques (φ_{load}) est de construire le profil de la demande en électricité des habitants en fonction de temps à l'aide d'une courbe.

2.3. Support du réseau électrique

Le réseau électrique au sens large englobe l'ensemble de l'infrastructure nécessaire à l'acheminement de l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs finaux. Ici, ce terme désigne la ligne base tension à laquelle les bâtiments sont reliés. A la différence des énergies renouvelables qui ont un caractère intermittent, le réseau public peut être considéré comme une source d'énergie qui est théoriquement toujours disponible.

Les lignes de transmission sont essentiellement dimensionnées pour véhiculer une quantité déterminée d'électricité. De ce fait pour assurer la stabilité du réseau, en France comme dans beaucoup d'autres endroits, la puissance soutirée au réseau par les abonnés ne doit jamais excéder un quota (niveau conventionnel) contracté avec le fournisseur électrique dit la puissance d'abonnement ($\varphi_{subscribeOut}$). En conséquence, le flux d'énergie provenant du réseau de distribution (φ_G) doit vérifier la condition suivante à chaque période de temps t (t étant typiquement discrétisé par pas de 1 heure sur une journée).

$$0 \leq \varphi_G(t) \leq \varphi_{subscribeOut} \quad [3]$$

Considérant l'injection d'énergie solaire dans le réseau, la contrainte de raccordement peut être réécrite pour le flux inverse allant de l'installation solaire vers la ligne électrique (φ_{S2G}) avec ($\varphi_{subscribeIn}$) désignant la puissance maximale d'injection d'énergie permise dans le réseau.

$$0 \leq \varphi_{S2G} \leq \varphi_{subscribeIn} \quad [4]$$

Par ailleurs, étant donnée le double usage de l'électricité du réseau dans une configuration V2H à la fois pour subvenir aux besoins des charges ménagères et ravitailler le véhicule électrique, nous ajoutons la contrainte d'égalité suivante :

$$\varphi_G(t) = \varphi_{G2V}(t) + \varphi_{G2H}(t) \quad [5]$$

2.4. Voiture électrique et notion de missions

Le véhicule électrique peut approvisionner sa batterie en énergie du réseau en période creuse et ensuite déstocker la quantité d'énergie accumulée sur demande des habitants pour faire tourner les appareils ménagers. Cette action permet de soulager le réseau électrique pendant les pics de consommation où ce dernier peut faire face à une demande croissante des clients et ainsi devoir faire appel aux centrales thermiques produisant une électricité au contenu carbone élevé.

Pourtant, la participation de la voiture à l'alimentation du bâtiment ne doit à aucun prix pénaliser sa fonction primaire principale qui est le transport des individus de manière la plus écologique possible. Pour être en mesure de réaliser les déplacements quotidiens prévus, les automobilistes doivent fixer des limites de décharge de batterie pour se rassurer d'avoir une réserve suffisante d'énergie au moment de départ.

Soit m le nombre de missions attribuées à une voiture électrique, le besoin énergétique de la voiture pour effectuer le trajet i ($\forall i \in \{1, \dots, m\}$) correspond au produit de son efficacité énergétique (η_{veh}) et la distance à parcourir (D_i) en km.

$$E_i = \eta_{veh} \cdot D_i \quad [6]$$

L'efficacité énergétique moyenne des véhicules électriques est rapportée autour de 2.5 miles /kWh quasiment équivalent à 0.25 kWh/km dans [KEM 2005].

Sur la route, l'énergie accumulée dans la batterie est utilisée par le moteur pour assurer la propulsion et ainsi faire baisser le niveau de charge de la batterie. La décharge occasionnée par la conduite (φ_{eng}) dans chaque période de temps t se définit par le ratio suivant :

$$\varphi_{eng}(t) = \sum_{i=1}^m \frac{E_i \cdot d_i(t)}{T_i} \quad [7]$$

Où (T_i) représente le temps total du voyage i en heure et ($d_i(t)$) est la durée partielle du voyage i dans l'intervalle de temps t et se calcule de la manière suivante :

$$\begin{cases} d'_i(t) = \text{Min}(Strt_i + T_i, (t+1)) - \text{Max}(Strt_i, t) \\ d_i(t) = \text{Max}(d'_i(t), 0) \end{cases} \quad [8]$$

Avec ($Strt_i$) le temps de départ en mission i et (d'_i) une variable intermédiaire indispensable au calcul de la durée partielle. Etant impossible d'avoir une durée négative, $d_i(t)$ prendre la valeur maximale entre $d'_i(t)$ et zéro de manière à être positive si la voiture est conduite en temps t dans le cadre de la mission m , sinon nul.

Pour les exploitants de systèmes V2H, il est fondamental de se tenir régulièrement informés du contenu résiduel d'énergie de la batterie appelé état de charge (SOC sous l'acronyme anglais). Si cette information n'est pas disponible, ils sont incapables d'avoir une bonne approximation de la disponibilité de voitures pour le service V2H et de la portée du trajet permis par l'autonomie restant du VE. Une version simplifiée de la méthode inventée par [DO 2002] a été adoptée dans ce travail pour estimer l'état de charge de la batterie sans tenir compte de certains phénomènes physiques comme l'auto-décharge et l'effet de vieillissement. Elle se récapitule dans l'équation [9] qui révèle le lien entre l'état de la batterie et le flux énergétique qui la traverse dans chaque période de temps.

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \eta_b \cdot \varphi_{bIn}(t) - \varphi_{bOut}(t) \quad [9]$$

(η_b) signifie le rendement de la batterie et (φ_{bIn}) et (φ_{bOut}) désignent respectivement les flux d'énergie entrant et sortant de la batterie en kW. Il ressort de la **figure 1** que :

$$\varphi_{bIn}(t) = \varphi_{G2V}(t) + \varphi_{S2V}(t) \quad [10]$$

$$\varphi_{bOut}(t) = \varphi_{V2H}(t) + \varphi_{eng}(t) \quad [11]$$

En raison de la perte d'énergie due à l'échauffement de batterie pendant la décharge, il y a toujours un léger écart entre le montant d'énergie sous-tiré de la batterie et l'énergie effectivement disponible. La contrainte d'égalité [11] permet de modéliser cela :

$$\varphi_{bOut}(t) = \frac{\varphi_{V2H}(t)}{\eta_b} + \frac{\varphi_{eng}(t)}{\eta_b} \quad [11]$$

En principe, la durée de vie et l'efficacité d'une batterie dépendent étroitement du mode de chargement et de déchargement qu'elle subit. Surcharger ou au contraire trop décharger une batterie donne lieu à des dommages irréversibles et raccourcit sa durée de vie utile. Ainsi, pour les protéger et prolonger leur cycle de

vie, les accumulateurs de véhicule doivent toujours fonctionner dans une plage de fonctionnement bornée par des niveaux de stockage minimaux et maximaux.

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad [12]$$

Où (SOC_{\max}) est le plus haut niveau admissible de charge que la batterie peut contenir. Dans ce document il est supposé d'être de 90% de la capacité nominal (C_b) annoncée dans le **tableau 2**. De même, (SOC_{\min}) signifie le minimum d'énergie qu'elle doit préserver pour éviter la décharge profonde. SOC_{\min} peut être calculé à l'aide de l'équation [13] comme une proportion de la capacité de batterie suivant la profondeur de décharge (DOD) autorisée.

$$SOC_{\min} = C_b \cdot (1 - DOD) \quad [13]$$

Une autre considération à faire pour éviter d'affaiblir la capacité du système de stockage à retenir la charge, est la maîtrise total du processus charge/décharge à travers le temps. Dans ce but, la capacité maximale de charge et de décharge est déterminée comme suite :

$$\varphi_{bIn_max} = \frac{SOC_{\max} r_{ch}}{\Delta t} \quad [14]$$

$$\varphi_{bOut_max} = \frac{SOC_{\max} r_{dch}}{\Delta t} \quad [15]$$

Contrairement à la consommation du moteur (φ_{eng}) qui survient uniquement lors de la conduite, pour recharger sa batterie ou livrer la puissance V2H, la voiture électrique a besoin d'être obligatoirement à l'arrêt et connectée au bâtiment. La volume horaire d'énergie rajoutée prélevée est donc ajustée en vérifiant les conditionnes suivantes :

$$0 \leq \varphi_{bIn}(t) \leq \varphi_{bIn_max} \cdot (1 - d(t)) \quad [16]$$

$$0 \leq \varphi_{bOut}(t) \leq \varphi_{bOut_max} \quad [17]$$

$$0 \leq \varphi_{V2H}(t) \leq \varphi_{bOut_max} \cdot (1 - d(t)) \quad [18]$$

3. Méthodologie : formulation et résolution sous forme d'un problème d'optimisation

Pour améliorer la performance économique d'une structure V2H la consommation ainsi que l'approvisionnement d'énergie doivent être optimisées en tenant compte de deux objectifs : d'une part la satisfaction totale des besoins électriques des usagers, aussi bien à l'intérieur de l'habitation que pendant la

circulation dans la voiture électrique, et d'autre part la minimisation du coût de facturation.

Trouver une stratégie optimale pour gestions d un système bâtiment relié au véhicule électrique peut être formulé comme un problème d'optimisation en *PLNE* (Programmation Linéaire en Nombre Entier). On utilise pour cela le cadre de modélisation développé dans la section précédente. L'algorithme PLNE offre un cadre général pour traiter les cas d'optimisation où les variables sont discrètes ou continues et peuvent être soumises à un ensemble de contraintes d'égalité ou d'inégalité linéaire, certaines d'entre elles peuvent prendre des valeurs entières [PIN 1995]. Selon [CLA 2010] le problème élaboré prend la forme générale

$$\begin{aligned} & \text{Maximiser } f(x), \\ & \text{sousmis à: } Ax \leq b, \\ & A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ & bi \leq x \leq bs \end{aligned}$$

suivante :

A est la matrice de coefficient et x représente le vecteur des variables de décision du problème qui sont à régler par l'algorithme d'optimisation. Il s'agit de :

- (φ_G) : le volume horaire des flux d'énergie traversant les composant du système: puissance consommée du réseau électrique
- (SOC) : état de charge de la batterie
- (φ_{bin}) : flux de chargement et de déchargement de la batterie
- (φ_{S2V}) : part consommée de la production solaire pour recharger la voiture électrique
- (φ_{S2H}) : part de la production solaire utilisée pour alimenter le bâtiment
- (φ_{S2G}) : le surplus de production solaire exporté dans le réseau électrique

Chaque vecteur de variable x est cerné (comprise) par une borne inférieure (bi) et une borne supérieure (bs). A , b , A_{eq} , B_{eq} représente les équations des contraintes d'égalité et d'inégalités s'imposant à x qui ont été préalablement décrites dans la section 2.

Et enfin, $f(x)$ est le vecteur de la fonction objectif qui peut être écrit sous la forme d'un bilan de flux financier visant à minimiser le coût d'exploitation d'un système V2H. Cela revient à maximiser le bénéfice acquis par la revente et/ou l'autoconsommation de la production locale d'énergie renouvelable. Donc ici $f(x)$ devient la fonction Gain suivante :

$$\text{Maximize: Gain} \sum_{t=0}^{t=23} ([\varphi_{S2G}(t) \cdot C_{resale}(t) + (\varphi_{S2V}(t) + \varphi_{S2H}(t)) \cdot C_{premium}] - \varphi_G(t) \cdot C_{purchase}(t)) \quad [19]$$

Les termes placés entre les crochets traduisent le revenu réalisé par la revente et l'autoconsommation de l'électricité PV avec (C_{resale}) le prix de revente et ($C_{premium}$) la prime d'autoconsommation. Les deux derniers termes renvoient à la dépense provoquée par l'achat de l'électricité du réseau. ($C_{purchase}$) est le tarif d'achat de l'électricité. Ces différents coûts, accompagnés des grandeurs physiques suivants constituent les principales entrées de notre problème dont la valeur reste constante au cours du processus d'optimisation :

- (φ_s) : production de centrale solaire photovoltaïque sur la journée.
- (φ_{load}) : profil de consommation électrique du bâtiment
- (φ_{eng}) : profil de consommation électrique du VE
- ($\varphi_{subscribOut}$) : niveau maximal de souscription réseau
- ($\varphi_{subscribIn}$) : maximum de surplus Pv injectable sur réseau
- (C_b) : capacité nominale de la batterie électrique
- (SOC_{max}) : maximum de charge admissible dans la batterie
- (SOC_{min}) : minimum de charge admissible dans la batterie

Le problème d'optimisation établi a été implémenté dans l'environnement de JAVA et ensuite solutionnée par le solveur GLPK¹. Celui-ci est un outil d'optimisation spécialement conçu pour les problèmes linéaires (PL) et PLNE.

4. Cas d'étude

4.1 Description de la structure de l'ensemble bâtiment et véhicule

Le cas qui a fait le sujet de notre étude est une mise en application théorique du système d'alimentation électrique V2H. Elle combine un système bâtiment doté des capteurs solaire et une voiture électrique.

Le bâtiment est supposé être situé dans l' agglomération Grenobloise et dédié aux activités du secteur tertiaire. Son orientation idéale nord-sud en plus d'un nombre suffisant de jours ensoleillés dans la région crée des conditions favorables à l' exploitation de l'énergie apportée par la lumière du soleil. A cet effet un

¹<http://www.gnu.org/software/glpk/>

champ photovoltaïque composé de 25 panneaux est disposé sur une superficie d'à

Caractéristique	Symbole	Valeur	Unité
Puissance typique	V	29.6	V
Intensité typique	I	7.8	A
Tension en circuit ouvert	V_{oc}	36.8	V
Courant de court-circuit	I_{sc}	8.34	A
normal operating cell temperature	$NOCT$	45	°C
Coefficient de température en court-circuit	α_{Isc}	0.065%	/°C
Coefficient de température en circuit ouvert	β_{Voc}	-0.34%	/°C

peu près 40 m² sur la face sud de la toiture. Les modules solaires sélectionnés pour

Tableau 1. Fiche technique de capteurs photovoltaïque PW2300 de Photowatt

Caractéristique	Symbole	Valeur	Unité
Technologie	-	Lithium-ion	-
Capacité nominale	C_b	24	kWh
Coefficient de charge	r_{ch}	0.3	-
Coefficient de décharge	r_{dch}	0.3	-
Rendement	η_b	95%	-
Profondeur de décharge	DOD	90%	-
Cycle de vie		160,000	km

Tableau 2. Spécifications de la batterie de Nissan Leaf

cette étude sont du modèle PW2300 de chez Photowatt². Ils affichent les spécifications techniques recensées dans le **tableau 1**. Une Nissan Leaf à moteur électrique est mise en disposition pour assurer les déplacements quotidiens des habitants sur une distance courte et moyenne. Elle dispose d'une batterie d'accumulateur de 24kWh dont les caractéristiques sont fournies dans le **tableau 2**.

4.2 Certaines données d'entrées prises en compte

La procédure d'optimisation a été exécutée pour le 10 Février 2012 sélectionné comme la journée d'optimisation de référence. L'objectif étant de déterminer la meilleure stratégie de pilotage possible sur une base horaire (à une échelle horaire, à l'échelle d'heure), la journée a été discrétisée en des périodes de temps $t \in \{1, \dots, 24\}$, où $\Delta t = 1$ H.

La prévision demande d'électricité des habitants, pour cette journée, est profilée dans la page suivante (**figure 2**) en se basant sur les relevés réelles réalisés dans un bâtiment installé à INES (*Institut National de l'Energie Solaire*).

La **figure 3** montre la courbe des tarifs d'achat de l'électricité résidentielle pour la date correspondante qui ont été extraits du site -web EPEX³. Ce dernier est

² Site web officiel du fabricant Photowatt : <http://www.photowatt.com/fr/>

³ Plus d'information sur <http://www.epexspot.com>

la bourse des marchés de l'électricité européen qui propose des prix de gros variant dans le temps pour les transactions du jour pour le lendemain (J-1). Si les prix présumés sont pour l'instant loin de la réalité pour le consommateur final, le choix de cette hypothèse nous permet de se projeter dans l'avenir où l'ouverture

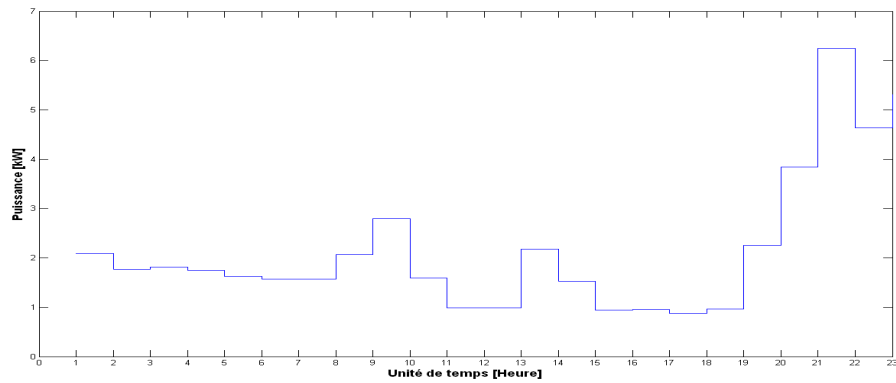


Figure 2. Demande de l'électricité du bâtiment de minuit à minuit

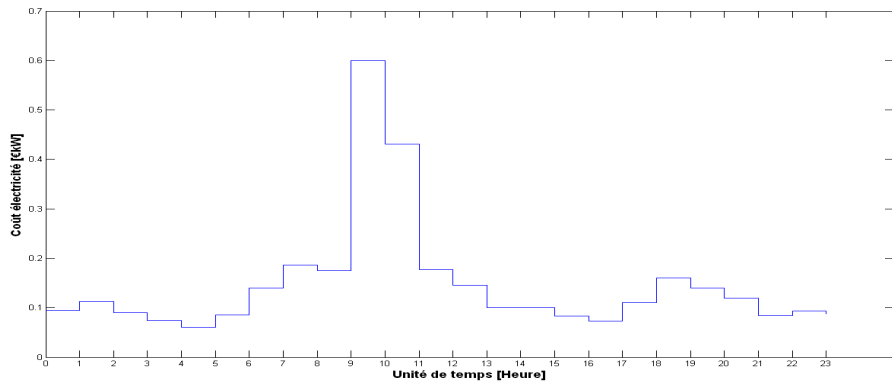


Figure 3. Evolution de tarifs de l'électricité sur le marché EPEX au 10 février 2012

du marché énergétique à la concurrence renforce la probabilité que les prix des marchés de spot s'imposent aux consommateurs finaux. Ce choix est d'autant plus intéressant qu'un tel mode de tarification dynamique encouragerait de plus en plus le recours à des capacités de stockage stationnaire de l'énergie quand l'électricité coûte chère.

La prédiction de la production d'électricité PV du bâtiment au cours de la journée d'optimisation (**figure 4**) s'est fait en appliquant un modèle mathématique proposé et validé dans [CLA 2010].

Pour paramétrer le modèle, en plus des spécifications techniques des capteurs solaires fournis dans le **tableau 1**, il y a eu également eu besoin des données météorologiques en occurrence le gisement solaire disponible et l'évolution de température ambiante du 10 février 2012 dans la région grenobloise. La courbe de

la température ambiante a été extraite du site web *Meteociel*⁴ et celle l'irradiation

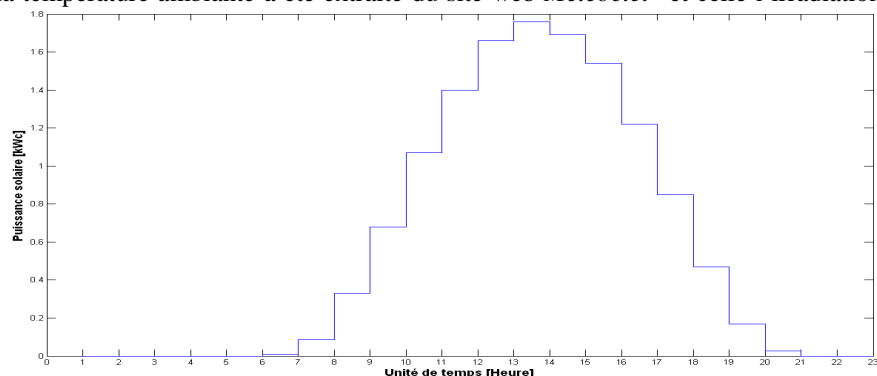


Figure 4. Séquence de production prévue de l'électricité solaire durant la journée d'optimisation

solaire a été construite à la base de l'irradiation moyenne journalière estimée par le simulateur *CALSOL*⁵ pour une orientation du plan sud à Grenoble.

4.3 Scénarios considérés

Le **tableau 3** synthétise l'ensemble des scénarios qui ont été étudiés dans ce travail de recherche. Les deux premiers scénarios vont de paire pour décortiquer l'impact de l'intégration de voitures électrique sur l'économie des ménages.

- Le premier considère le cas du bâtiment présenté en amont sans interconnexion avec la voiture électrique. Il est le cas le plus simple susceptible de servir de point de référence.
- Le second introduit le système de stockage embarqué de la voiture électrique dans le circuit énergétique en ayant une stratégie de gestion minimale, et non optimale : le principe est que, si la demande du bâtiment dépasse la puissance du réseau, on peut puiser dans la batterie électrique. La production Pv au domicile alimente en priorité les appareils électrodomestiques. Le VE sera la destination secondaire et en dernier lieu la surproduction sera renvoyée sur le réseau public.
- le troisième scénario correspond à la mise en oeuvre de la démarche de gestion optimale de flux d'énergie présentée dans cet article.

Dans le premier scénario où le réseau de distribution d'électricité devient pratiquement la seule source d'alimentation en absence de l'énergie solaire pendant la période d'obscurité, la puissance d'abonnement doit être fixée à 7 kW

⁴ Site météorologiques : <http://www.meteociel.fr>

⁵ Logiciel à vocation pédagogique développé par INES Education afin d'effectuer des évaluations simplifiées d'installations solaire : <http://ines.solaire.free.fr/gisesol.php>

pour surmonter le pic observé à partir de 19h sur la courbe affichée dans la **figure 1**. Or en raison de l'accès à l'unité de stockage de la voiture dans les deux autres

Numéro de scénarios	1	2	3
Voiture électrique	Non	Oui	Oui
Pilotage des flux énergétiques	Non	Minimal	Optimal
Puissance d'abonnement	7 kW	3 kW	3 kW
Profil des déplacements quotidiens	Non	10h30-12h30 / 20 km 15h-17h / 18 km	10h30-12h30 / 20 km 15h-17h / 18 km

Tableau 3. Récapitulatif des scénarios analysés

cas, cette puissance d'abonnement peut être diminuée à 3 kW. Ceci permet ainsi d'éviter de payer inutilement un abonnement plus cher, sous réserve que la voiture soit en permanence branchée à l'immeuble pendant les heures de forte demande. C'est pourquoi, les voyages (Profil des déplacements quotidiens) spécifiés dans le **tableau 3** sont organisés de manière à ce que le système de stockage mobile d'énergie soit accessible aux habitants quand la consommation de l'électricité s'accroît significativement au soir. La **figure 5** expose le profil de décharge demandée à la batterie par la voiture pour accomplir les déplacements prévus.

4.4 Résultats obtenus

Afin de montrer l'efficacité de l'approche, nous allons montrer les résultats pour les 3 scénarios qui viennent d'être définis pour la journée du 10 février 2012.

La **tableau 4** détaillé les principaux résultats obtenus sur les 3 scénarios considérés précédemment. Par ailleurs les **figures 6** et **7** nous donnent respectivement l'allure de la consommation sur le réseau et l'état de charge de la batterie pour les 3 scénarios. On peut constater que :

1° La **figure 7** fait apparaître que l'intégration de stockage mobil dans les scénarios 2 et 3 conduit au lissage du profil de demande pendant la soirée ; permettant ainsi de souscrire à un abonnement moins onéreux. En outre, la disponibilité de l'unité de stockage mobile dans ces deux cas augmente le volume d'énergie solaire consommée sur place plutôt que de revendre ce qui apporta ainsi plus de revenu aux utilisateurs en raison du montant plus élevée de la prime d'autoconsommation en comparaison avec le prix de revente (0.15 € contre 0.12 €).

2° Le scénarios utilisant l'optimisation, permet de réduire la consommation et le coût de la facture car on voit que :

Dans le **tableau 4**, l'intégralité de la consommation d'énergie du réseau, dans le scénario 2, augmente comparé aux deux autres (passant de l'ordre de 50 kWh à 60 kWh). Pour autant l'écart semble trop faible pour expliquer à lui seul le

doublément du coût de la facture. En effet, cette différence découle surtout de la tendance à charger délibérément la batterie au maximum possible sans stratégie

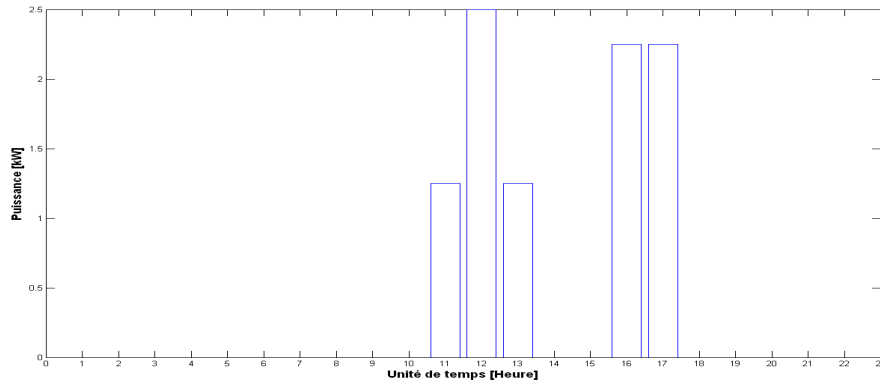


Figure 5. Consommation de l'énergie par la voiture électrique (φ_{eng}) durant la journée étudiée

	Intitulé	Taux (en kWh)	Montant (en euros)
Scénario 1	Consommation réseau	53,24	5,50
	Prime autoconsommation	10,56	-1,58
	Revente solaire	2,4	-0,29
	Net à payer		3,63
Scénario 2	Consommation réseau	60	9,17
	Prime autoconsommation	11,03	-1,63
	Revente Solaire	1,93	-0,23
	Net à payer		7,31
Scénario 3	Consommation réseau	50,71	5,46
	Prime autoconsommation	12,66	-1,74
	Revente Solaire	1,34	-0,16
	Net à payer		3,40

Tableau 4. Consommation et facture électrique obtenues sur les 3 scénarios étudiés pour la journée du 10 février 2012

optimale et ainsi sans tenir compte de la variation du prix de l'électricité dans le temps (**figure 2**). Cela en fait, dans ce deuxième cas, multiplie le nombre d'appel au réseau aux heures où le kWh d'énergie coûte chère. Le niveau plus élevé du contenu de la batterie sur la courbe bleue, visible dans la **figure 7**, est révélateur de la recharge démesurée de la voiture avec ce scénario 2 typique d'un pilotage mal maîtrisé.

En revanche, la rationalisation de l'opération de recharge par optimisation dans le dernier scénario, moduler, le niveau d'énergie de la batterie aux besoins réels des utilisateurs tout en essayant de réduire, voire d'annuler dans le mesure du

possible le puisage d'énergie électrique sur le réseau. La forme décroissante de l'état de charge de la batterie entre 7h et 10h pour le scénario 3 (courbe rouge en -

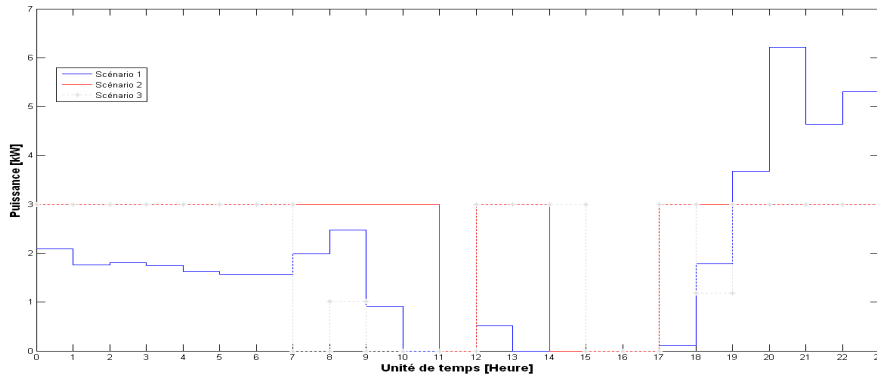


Figure 6. Courbe de consommation (ϕ_G) sur le réseau pour les 3 scénarios sur 24 heures pour la journée du 10 février 2012

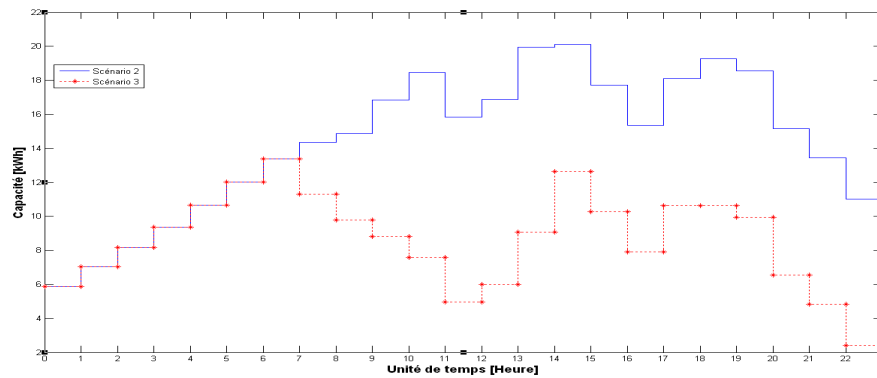


Figure 7. Courbe de l'état de charge de la batterie (SOC) sur le réseau pour les 3 scénarios sur 24 heures pour la journée du 10 février 2012

-pointillé) témoigne de la participation plus active de la voiture électrique dans le dispositif V2H en cas d'une gestion plus intelligente.

5. Conclusion et perspective

De manière générale, l'utilisation du véhicule électrique dans un contexte V2H entraîne un surcoût de consommation d'électricité sur le réseau résultant de la recharge de la batterie. Pourtant, nous avons démontré que les voitures électriques branchées à des bâtiments et dotés d'une gestion correcte et optimale peuvent devenir un précieux capital car source d'une double économie : d'une part elles permettent de souscrire à un abonnement d'électricité plus économique et d'autre part elles permettent de réduire la consommation, ou au moins la facture en permettant une gestion optimale lissant la consommation aux heures chères,

maximisant cette même consommation aux heures creuses et en utilisant au maximum la production solaire, tout cela étant possible grâce au stockage.

On conclura en disant que nous sommes loin, dans ce papier, d'avoir montré toute l'étendue de l'approche présentée. Dans des travaux à venir nous allons ainsi étendre l'optimisation pour l'application V2H à une échelle plus grande avec, par exemple, plusieurs sites répartis au niveau d'une ville. Une autre piste intéressante à explorer sera la possibilité d'améliorer davantage le gain du système en relaxant certaines contraintes comme le début figé dans le temps des missions (voyages) ou bien encore en décalant certaines charges électriques reportables temporellement (cf. le chauffage, les machines à laver, ...).

5. Bibliographie

- [COM 2010] Commissariat Général au Développement Durable, *Repères: Chiffres clés de l'énergie Édition 2010*, octobre 2010, Service de l'observation et des statistiques.
- [CIT 2010] CITEPA, *Bilan des émissions de gaz à effet de serre de la France en 2008*, février 2010, Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables.
- [KEM 2005] Kempton W., and Tomic' J., «*Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue*», Journal of Power Sources, vol.144,n°1,2005, p.268-279;
- [KEM 2000] Kempton W., Kubo T., «*Electric-drive vehicles for peak power in Japan*», Energy Policy, vol. 28, n° 1, 2000, p. 9-18;
- [DO 2002] Do Yang Jung, Baek Haeng Lee, Sun Wook Kim, «*Development of battery management system for nickel-metal hybride batteries in electric vehicle applications*», Journal of Power Sources, vol.109, n° 1, p. 1-10;
- [PIN 1995] Pinto J. , Grosse mann Ignacio E., *A Continuous Time Mixed Integer Linear Programming Model for Short Term Scheduling of Multistage Batch Plants*, Ind. Eng. Chem. Res, vol.34, n° ,1995, p.3037-3051.
- [CLA 2010] Clastres C., Ha Pham T.T., et al., *Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production*, Energy, vol. 35, n° 1, 2010, p. 55–64.

