



**HAL**  
open science

## Impact des véhicules électrifiés sur le dimensionnement du réseau HTA

Thomas Gaonac'H, Martin Hennebel, Ibrahim Mohand Kaci, Jing Dai,  
Jean-Claude Vannier

► **To cite this version:**

Thomas Gaonac'H, Martin Hennebel, Ibrahim Mohand Kaci, Jing Dai, Jean-Claude Vannier. Impact des véhicules électrifiés sur le dimensionnement du réseau HTA. 1er Symposium de Génie Électrique (SGE 2014), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065243

**HAL Id: hal-01065243**

**<https://hal.science/hal-01065243v1>**

Submitted on 18 Sep 2014

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

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

# Impact des véhicules électrifiés sur le dimensionnement du réseau HTA

Thomas GAONAC'H<sup>(a)</sup>, Martin HENNEBEL<sup>(a)</sup>, Ibrahim MOHAND-KACI<sup>(b)</sup>, Jean-Claude VANNIER<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> SUPÉLEC, E3S - Département Énergie, 3 rue Joliot Curie 91190 Gif-sur-Yvette, FRANCE

<sup>(b)</sup> RENAULT S.A., Technocentre, 1 avenue du golf 78288 Guyancourt, FRANCE

**RESUME** – Le développement annoncé des Véhicules Electriques et des Véhicules Hybrides Rechargeables va augmenter la consommation électrique, notamment dans le secteur résidentiel, ainsi que les pertes dans les lignes. Cette augmentation doit être prise en compte dans le dimensionnement de la section des conducteurs. En effet, un Gestionnaire de Réseau de Distribution dimensionne celle-ci en cherchant l'optimum économique entre le coût du matériau conducteur et le coût des pertes par effet Joule capitalisées sur la durée de vie de la ligne. Dans cette contribution, nous estimons ce nouvel optimum et le surcoût engendrés par la pénétration de véhicules électrifiés pour une ligne HTA. Nous montrons que ce surcoût peut être réduit en choisissant des profils de recharge adaptés. Enfin une étude de la sensibilité du résultat aux paramètres montre que parmi ceux-ci, le choix du taux d'actualisation des pertes futures est pondérant.

**MOTS-CLES** – Réseau de distribution, dimensionnement, Règle de Kelvin, Véhicule Electrique, Véhicule Hybride Rechargeable, ligne HTA,

## 1. Introduction

Depuis quelques années, des modèles de Véhicules Electriques (VE) ainsi que de Véhicules Hybrides Rechargeables (VHR) sont disponibles à la vente. Certaines études, telles que [1], prévoient un bel avenir pour ceux-ci. Néanmoins, la charge de leurs batteries augmente la puissance soutirée du réseau électrique, ce qui a un impact notamment sur le réseau de distribution. Ainsi, dans [2], les conséquences de recharges non coordonnées sont évaluées sur un réseau IEEE 34 bus et une minimisation des pertes par effet Joule sous contrainte de tension est effectuée. La Référence [3] propose une stratégie de contrôle optimal afin de minimiser les pertes sur un réseau, tandis que [4] traite de l'investissement nécessaire pour intégrer les VE et VHR.

Parmi ces investissements, nous nous intéressons au dimensionnement de la section de conducteur des câbles et lignes électriques. Celui-ci se fait en respectant des contraintes techniques et économiques. En effet, le choix de la section résulte d'un compromis entre le coût du métal conducteur et le coût des pertes par effet Joule capitalisées sur la durée de vie du conducteur. Afin d'évaluer l'impact de l'électrification du parc automobile sur ce dimensionnement, nous présentons dans un premier temps l'optimisation technico-économique des conducteurs aériens HTA, puis nous y intégrons les VE et VHR dans l'évolution de la consommation. Ensuite, nous étudions la sensibilité de ce dimensionnement à plusieurs facteurs : taux d'électrification du parc automobile, coût de l'électricité, profil de recharge, taux d'actualisation, coût du métal, etc.

## 2. Dimensionnement de la section optimale d'une ligne HTA en présence de VE et VHR

### 2.1 Dimensionnement technico-économique d'une ligne HTA

#### 2.1.1 Coût d'installation de la ligne

Le coût d'installation d'une ligne peut être décomposé en une part fixe indépendante de la section et d'une part variable qui en est dépendante :

$$C_{installation} = C_{fixe} + C_{variable} \quad (1)$$

La part variable selon la section du coût d'installation correspond au coût du métal conducteur :

$$C_{variable} = C_{cond} = M_{cond} \times p_{cond} = l_{cond} \times S_{cond} \times M_V \times p_{kg} \quad (2)$$

où  $C_{cond}$  désigne le coût du conducteur [€],  $M_{cond}$  désigne la masse du conducteur [kg],  $p_{cond}$  désigne le prix du conducteur [€/kg],  $M_V$  désigne la masse volumique du métal conducteur [kg/m<sup>3</sup>],  $S_{cond}$  est la section du câble [m<sup>2</sup>] et  $l_{cond}$  la longueur du conducteur [m]. Cette équation dépend linéairement de  $S_{cond}$ , le paramètre à optimiser.

### 2.1.2 Coût d'exploitation de la ligne

Le réseau HTA simplifié que nous étudions est représenté dans la Figure 1. Il est composé d'une charge connectée à une source de puissance au travers d'une ligne. La source de puissance assure l'alimentation de la charge. La tension est considérée constante et égale à 20 kV tout le long de la ligne.

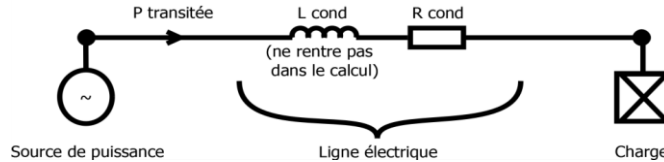


Figure 1 : Schéma électrique étudié

La part du coût d'exploitation dépendant de la section est égale au coût des pertes par effet Joule. Les autres coûts d'exploitation comme la maintenance sont inévitables et considérés en première approximation comme des coûts fixes indépendants de la section.

Le coût des pertes par effet Joule s'exprime comme l'intégrale sur le temps de  $R \cdot I^2$  multiplié par le prix de l'électricité :

$$C_{pertes} = \int_T \left( \frac{P_{charge}(t)}{\sqrt{3} \times V \times \cos(\varphi)} \right)^2 \times R_{cond} \times p_{elec}(t) \cdot dt \quad (3)$$

Où  $T$  désigne la durée de vie d'une ligne [années] prise égale à 40 ans dans cette étude (cf. [5]),  $P_{charge}$  désigne la puissance triphasée qui est consommée par la charge à l'instant  $t$  [W],  $V$  désigne la tension nominale entre phases sur le conducteur, supposée constante [V],  $\cos(\varphi)$  désigne le facteur de puissance de la charge, et  $p_{elec}$  est le prix de l'électricité basé sur les prix de marché EPEX SPOT day-ahead en 2012.

Comme le coût des pertes est considéré sur une durée longue, nous prenons en compte l'actualisation de la valeur des pertes futures. De même, l'augmentation du prix de l'électricité, l'augmentation de la consommation électrique, et enfin la charge supplémentaire apportée par les VE et VHR sont prises en compte. L'expression de la résistance,  $R = \rho \times l / S$ , permet de faire apparaître la section.

$$C_{pertes} = \int_T \frac{(1+b)^{t/t_a} \left( (P_{charge}(t) + P_{VE}(t)) \times (1+c)^{t/t_a} \right)^2}{(1+a)^{t/t_a} \sqrt{3} \times V \times \cos(\varphi)} \times \rho \times \frac{l_{cond}}{S_{cond}} \times p_{elec}(t) \cdot dt \quad (4)$$

où  $\rho$  désigne la résistivité du conducteur [ $\Omega \cdot m$ ],  $l_{cond}$  la longueur [m],  $S_{cond}$  la section [m<sup>2</sup>],  $b$  le taux d'augmentation annuel du prix de l'électricité [%] égal ici à 3 % [6],  $P_{VE}$  représente la puissance nécessaire à la recharge des véhicules électrifiés [W],  $a$  le taux annuel d'actualisation [%] ici pris égal à 8% par an [5], et  $c$  le taux annuel d'augmentation de la consommation électrique hors VE [%] pris ici à 0,7 % par an.  $t_a$  permet de prendre en compte le fait que l'actualisation et les augmentations des prix se font une fois par an [s].

### 2.1.3 Choix de la section optimale du conducteur

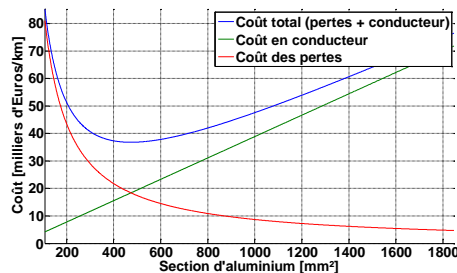


Figure 2 : Les différents coûts en fonction de la section

En annulant la somme des dérivées des équations (2) et (4) par rapport à  $S_{cond}$ , on déduit la section optimale :

$$S_{cond} = \sqrt{\frac{\int \frac{(1+b)^{t/t_a}}{(1+a)^{t/t_a}} \left( \frac{P_{charge}(t) \times (1+c)^{t/t_a} + P_{VE}(t)}{\sqrt{3} \times V \times \cos(\varphi)} \right)^2 \times \rho \times p_{elec}(t) \cdot dt}{M_V \times p_{cond}}} \quad (5)$$

Sur la Figure 2 sont tracés le coût en conducteur et le coût des pertes en fonction de la section. Le coût total, égal à la somme des deux autres coûts, présente un minimum au niveau de la section optimale.

## 2.2 Modélisation de la charge des véhicules

### 2.2.1 Courbe de charge journalière

La Figure 3 montre la courbe de charge journalière choisie pour le calcul et l'impact sur celle-ci de 1 000 VE et VHR dans le cas d'un taux d'électrification du parc automobile de 50 %. Le profil de recharge utilisé est une combinaison des quatre profils de la Figure 4.

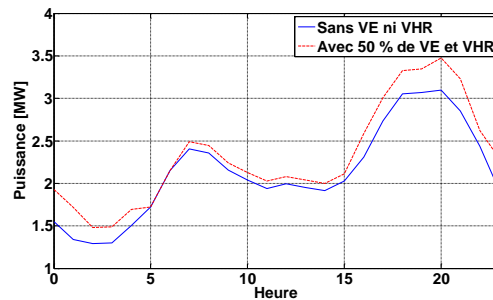


Figure 3 : Courbe de charge résidentielle et impact des VE et VHR

### 2.2.2 Impact du taux d'électrification

L'impact du taux de pénétration des VE et VHR est évalué dans cette section. Pour cela, les prévisions du gouvernement français annoncées dans [1] sont reprises et présentées dans le Tableau 1. La consommation électrique des véhicules a été prise égale à 5,48 kWh par véhicule par jour, ce chiffre correspondant à celui de 4 TWh annuels pour 2 millions de véhicules annoncé par la CRE [7] pour 2025.

Tableau 1 : Electrification du parc automobile, scenario du gouvernement français.

Année	2015	2020	2025	2050
Taux d'électrification	1,5%	10 %	15 %	50 %

## 2.3 Résultats obtenus

### 2.3.1 Cas Général

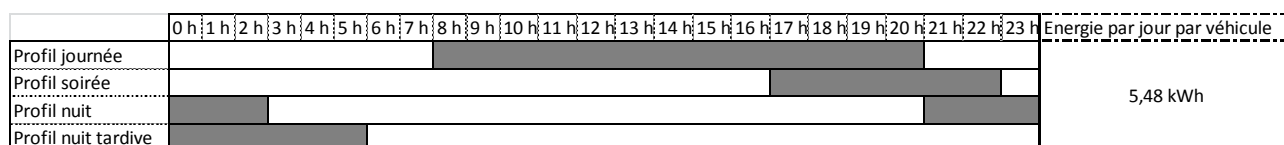
Le Tableau 2 présente les résultats pour ces 4 scénarios. Dans ce calcul, la section optimale sans VE ni VHR est de 453 mm<sup>2</sup>. Qui est supérieure à la section maximale de 140 mm<sup>2</sup> utilisée par les gestionnaires de réseau de distribution [5]. Cette différence peut s'expliquer par les hypothèses de calcul utilisées, comme la durée de vie de 40 ans, le taux d'actualisation de 8 %, le taux d'augmentation du prix de l'électricité de 3 %. La densité maximale de courant, de 0,56 A/mm<sup>2</sup>, est proche des densités généralement constatée entre 1 et 0,6 A/mm<sup>2</sup> [8]. Dans le cas du scénario avec 50 % d'électrification en 2050, le surcoût à l'installation en conducteur dû au VE et VHR est de 5.5 %.

Tableau 2 : Résultats pour différents taux d'électrification du parc en 2050 (ligne triphasée en aluminium).

	Cas témoin (ni VE ni VHR)	En 2050 : 12.5 % VE + VHR	25% en 2050	37.5 % en 2050	50 % en 2050 (gouv fr)
Section optimale [mm <sup>2</sup> ]	453	459	466	472	478
Coût en conducteur [€/km]	17 259	17 490	17 726	17 966	18 211
Surcoût	0%	1,3%	2,7%	4,1%	5,5%

### 2.3.2 Impact du profil de recharge

Les différents profils de recharge testés sont présentés sur la Figure 4. Ces profils ne correspondent pas à des situations ou des à mesures réelles mais simulent des comportements typiques d'utilisateurs : recharge en journée, au retour du travail, et en heures creuses de nuit.



**Figure 4 : Les différents profils de recharge, les barres grisées correspondent aux heures de recharge**

Le Tableau 3 présente l'impact de l'heure choisie pour recharger les véhicules électrifiés. Le surcoût varie de 3,5 % pour le comportement le plus favorable (la recharge durant la nuit) à 8,3 % pour le comportement le plus défavorable (recharge en soirée). L'heure de recharge est donc bien un poste important d'économie ou de surcoût. Les profils journée et nuit induisent quant à eux des surcoûts de 6 % chacun.

**Tableau 3 : Impact du profil de recharge sur le surcoût (cas 50 % de pénétration en 2050)**

	Cas témoin (ni VE ni VHR)	100 % Profil journée	100 % Profil soirée	100 % Profil nuit	100 % Profil nuit tardive
Surcoût par rapport au cas sans VE ni VHR	0 %	6,2 %	8,3 %	6 %	3,5 %

## 2.4 Etude des sensibilités

Après avoir constaté dans la section 2.3 que la section calculée est plus grande que les sections généralement utilisée par ERDF une étude de sensibilité a été effectuée pour extraire les paramètres prépondérants dans le choix de section optimale. Les résultats sont présentés dans le **Erreur ! Référence non valide pour un signet.** Il apparaît que, en valeur absolue, le taux d'actualisation est le paramètre le plus sensible. L'actualisation étant une notion qui représente la valeur actuelle de profits futurs, les incertitudes sur l'avenir conditionnent le résultat du dimensionnement. Les deux autres paramètres qui influent le plus sont le prix du conducteur et le prix de l'électricité, ces deux paramètres ayant la même sensibilité sur le résultat.

**Tableau 4. Variation du coût en conducteur suite à la variation d'un paramètre**

Paramètre	Actualisation	Coût du conducteur	Coût de l'électricité	Electrification du parc
Paramètre + 10 %	- 5,2 %	+ 4,7 %	+ 4,7 %	+ 0,5 %

## 3. Conclusion

L'impact de la présence de VE et de VHR sur le dimensionnement de câbles de distribution HTA a été évalué. Si le scénario prévoyant 50 % de véhicules électrifiés en 2050 se précise, l'impact des VE sur le dimensionnement ne sera pas négligeable. Cependant, cet impact peut être atténué en agissant sur le profil de recharge. Il apparaît de l'étude des sensibilités que le taux d'actualisation est le paramètre le plus sensible. Dans la suite de cette étude on pourra évaluer l'impact de la production décentralisée en présence de VE et VHR sur le dimensionnement des conducteurs.

## 4. Références

- [1] L. NEGRE, « Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules décarbonés, » 2011.
- [2] K. CLEMENT NYNS, E. HAESSEN et J. DRIESEN, « The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid, » Elsevier - Electric Power Systems Research, 2010.
- [3] S. DEILAMI, A. MASOUM, P. MOSES et M. MASOUM, « 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, 2011.
- [4] L. PIELTAIN FERNANDEZ, « Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks » IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, pp. 206 - 213, 2010.
- [5] ERDF, « Principes d'étude et règles techniques pour le raccordement au réseau public de distribution géré par ERDF d'une installation de consommation en HTA, » 2010.
- [6] CRE, « Observatoire des marchés de l'électricité et du gaz », 3ième trimestre 2012.
- [7] Smart grids - CRE, Septembre 2011. [En ligne]. <http://www.smartgrids-cre.fr>. [Accès le 25 Novembre 2013].
- [8] A. CHANAL, « Lignes aériennes - Présentation et calcul des lignes, » Techniques de l'ingénieur, 2000.