

# **Modélisation technique et financière des installations photovoltaïques équipées de bornes de recharge et de batteries de stockage, pour une utilisation en autoconsommation**

Ing. L. Mavaro –  
Ing. S. Copay –  
Ir. P. Gabriel  
HELMo Gramme – Liège

## **1. Introduction**

Le mémoire à l'origine de cet article vise l'obtention du grade de Master en Sciences de l'Ingénieur Industriel, avec une spécialisation en Génie Energétique Durable. Il se concentre sur l'étude technique et financière des installations de production photovoltaïque, équipées de bornes de recharge pour les véhicules électriques et d'une batterie de stockage, en vue d'une utilisation en autoconsommation. Cette initiative découle de la volonté des citoyens résidentiels et industriels de promouvoir les énergies propres et d'atteindre l'indépendance vis-à-vis d'autres pays.

Dans le contexte actuel de réduction de l'utilisation des énergies fossiles, par souci de manque d'approvisionnement et de l'essor des voitures électriques, une augmentation significative de la consommation d'électricité à l'échelle nationale et mondiale est envisagée. Cependant, le réseau électrique actuel pourrait ne pas être en mesure de répondre à cette croissance imminente.

Gouvernements, entreprises et citoyens s'engagent de plus en plus dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la promotion des énergies renouvelables, avec l'objectif de neutralité carbone fixé par l'Union Européenne d'ici 2050 [1]. L'énergie solaire photovoltaïque est considérée comme l'une des solutions les plus accessibles et efficaces pour atteindre ces objectifs.

Dans ce contexte, le développement d'un logiciel permettant la modélisation d'installations photovoltaïques équipées de bornes de recharge et de batteries pour l'autoconsommation semble pertinent, dans le but de proposer des installations intelligemment dimensionnées, accompagnées d'une vérification technique et financière.

Une description de ce logiciel sera abordée ainsi que la description d'un cas d'étude.

## 2. Le logiciel développé

Pour le développement de ce programme, c'est Excel qui a été utilisé, plus particulièrement la création de macros et d'une routine de calculs dans le langage utilisé par la Suite Office : *Visual Basic for Application* (VBA). Excel a été employé pour une raison très simple : le programme devait pouvoir être utilisé sur n'importe quel ordinateur, sans installation supplémentaire, tout en restant relativement simple à utiliser par des commerciaux qui devront effectuer des démonstrations devant leurs clients.

### 2.1 Outil de dimensionnement d'une installation photovoltaïque avec intégration de batteries et bornes de recharge

La mobilité étant en pleine transition, le nombre de personnes abandonnant leur véhicule thermique pour un véhicule électrique est en augmentation constante, voire exponentielle. Ceci se traduit par une demande de disponibilité de bornes de recharge suivant la même tendance. Cela constitue donc une charge additionnelle sur le réseau électrique national, qui n'est initialement pas prévue pour une transition aussi brutale. Le réseau pourrait donc être mis en péril.

L'outil développé permet, sur base d'un certain nombre d'hypothèses (développées ci-après), de modéliser une installation complète, embarquant une production locale, une solution de stockage et de recharge, dans le but de vérifier sa pertinence technique et financière.

Ce logiciel reste centré sur le milieu industriel pour lequel la transition vers des véhicules électriques sera plus brutale que dans le domaine résidentiel.

#### *La méthodologie adoptée*

Dans le but de créer un outil permettant de visualiser au mieux ce genre d'installation, il est nécessaire de créer un modèle.

Sur la Figure 1, est représenté le modèle sur lequel est basé la création de l'outil de dimensionnement.

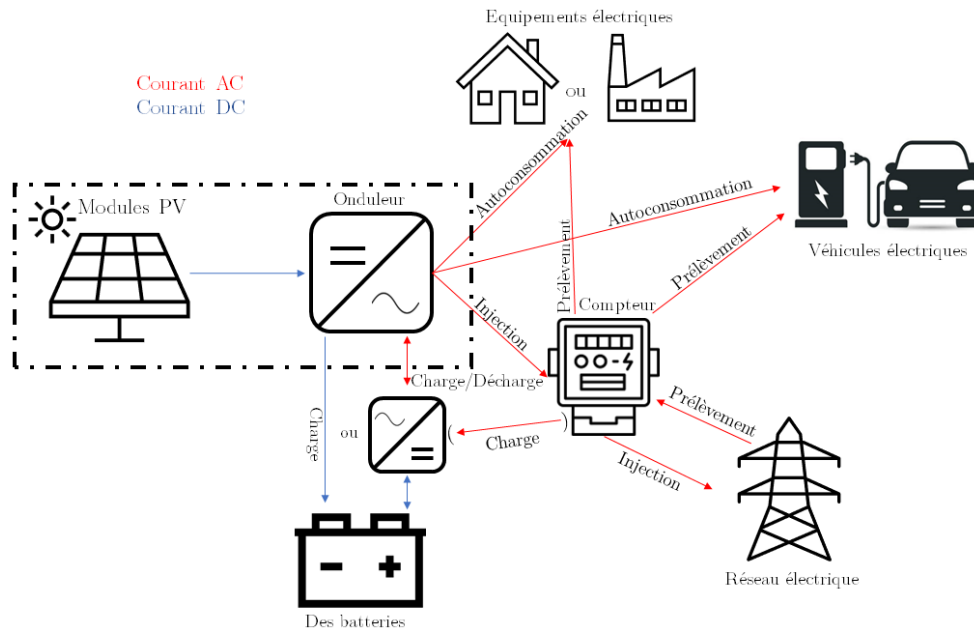


Figure 1 - Modèle créé

Les parties production, consommation, stockage et réseau sont représentées sur ce modèle.

La partie centrale du schéma concerne l'implantation PV.

Une fois la production et la consommation déterminées, plusieurs cas de figure sont possibles :

- Une partie de l'énergie peut directement être consommée par les appareils électriques de l'installation existante ou directement servir à charger le(s) véhicule(s) électrique(s) (*autoconsommation*) ;
- Si une batterie est présente et que l'énergie produite par l'installation photovoltaïque n'est pas entièrement consommée par l'installation existante ou par les voitures, il est possible de la stocker dans la batterie (*autoconsommation par stockage*) ;
- Dans le cas où il n'y a pas assez de consommation et que la batterie est pleine, l'énergie excédentaire est renvoyée sur le réseau (*injection*) ;
- Si la consommation est trop importante pour être couverte par l'installation solaire ou l'énergie stockée dans la batterie, l'énergie manquante va provenir du réseau (*prélèvement*) ;

- Vu que le prix de l'énergie est différent le jour et la nuit, il est éventuellement possible de recharger la batterie à partir du réseau, dans le but de l'utiliser la journée et donc, de payer moins cher (*prélèvement pour stockage*).

Sur base de ce schéma, il est possible d'en retirer cette équation :

$$\begin{array}{c}
 \text{Prélèvement - Injection} = \text{Consommation} + \text{Voiture(s)} + (\text{Recharge} - \text{Décharge}) - \text{PV} \quad (1)
 \end{array}$$

Toutes ces variables sont exprimées en kWh (énergie consommée pour le quart d'heure étudié).

### ***Les fonctionnalités du logiciel développé***

Tous les éléments présentés sur la Figure 1 sont intégrés dans le logiciel développé, dans le but de réaliser une routine de calculs parcourant chaque quart d'heure d'une année afin de quantifier les performances du site.

#### *Informations du client*

Sur base des données reçues, il est possible de générer un profil de consommation spécifique ou d'en importer un parmi les profils prédéfinis ou par un relevé fourni par le client.

#### *Installation photovoltaïque*

Une installation photovoltaïque est constituée de panneaux photovoltaïques et d'onduleur(s).

Les panneaux photovoltaïques transforment, par effet photovoltaïque, l'énergie que possède les photons, présents dans les rayons du soleil, en énergie électrique. Cette énergie électrique se présente sous forme de courant continu. Pour être utilisée, cette énergie doit être convertie en courant alternatif. C'est là qu'intervient la nécessité d'ajouter un onduleur.

La quantité d'énergie produite va dépendre de différents facteurs tel que l'orientation des panneaux, leur inclinaison, la température ambiante, la température de la cellule...

Pour configurer une installation photovoltaïque, il est possible d'encoder les différentes puissances installées selon les orientations et inclinaison, l'irradiance moyenne annuelle du site concerné ainsi que la puissance de l'onduleur.

Grâce à ces informations, le logiciel calculera une production estimée. Il est également possible d'importer un fichier de production (horaire ou quart horaire). Dans ce cas, le logiciel prendra en compte les données du fichier importé.

### *Unité batterie*

Dans le cas où le client souhaite l'installation d'une unité de stockage, il est possible d'en configurer une en encodant les caractéristiques de l'unité concernée. La configuration de cette unité reste assez libre. Il est préférable de privilégier les batteries Li-Ion de type LFP (Lithium Fer Phosphate) car ce sont celles qui possèdent les meilleures caractéristiques comme :

- Un nombre de cycles charge-décharge élevé ;
- Une densité de puissance constante ;
- Un fonctionnement lors de fortes températures, sans risque d'emballement ;
- Une faible nécessité d'entretien, par rapport à d'autres technologies de batteries ;
- Une indépendance d'efficacité de fonctionnement en fonction de la température.

### *Estimation des charges des véhicules*

Dans le cas où des bornes de recharge sont installées, il est nécessaire de mentionner le modèle et le type de celles-ci. Il existe deux types de bornes de recharge : les bornes AC et les bornes DC.

Les bornes AC sont les chargeurs les plus communs car elles nécessitent une puissance nettement inférieure aux chargeurs DC (3 kW à 22 kW pour un chargeur AC contre quelques dizaines à quelques centaines de kW pour un chargeur DC). Ces chargeurs délivrent, comme leur nom l'indique, un courant alternatif qui vient alimenter la batterie de la voiture via un convertisseur AC – DC embarqué.

Les bornes DC sont les bornes appelées « Super chargeur », car elles permettent de charger une voiture dans un temps record. Les bornes de ce type délivrent un courant continu qui alimente directement la batterie de la voiture. Le convertisseur AC – DC utilisé est celui interne à la borne et permet de développer une puissance nettement supérieure à celui qui se trouve dans la voiture.

Il est important de mentionner que, selon le modèle et la marque de la voiture, il ne sera pas toujours possible d'utiliser un chargeur DC, ou même un chargeur AC, à sa pleine puissance.

De plus, pour estimer les recharges des véhicules, il sera demandé d'encoder les profils des conducteurs. Dans le cadre de cet outil, la méthode utilisée consiste à demander à l'utilisateur d'encoder une période de la journée où il désire une recharge ainsi que l'autonomie en kilomètres qu'il souhaite recharger. C'est en fonction du modèle de la voiture (sa consommation, sa puissance de recharge...) et des bornes encodées que le programme calculera une consommation d'énergie.

### 3. Cas test

Pour la démonstration du fonctionnement du logiciel développé, le site de HELMo Gramme sera choisi. Le campus de l'Ourthe a une consommation de 515 MWh par an, selon un profil représenté à la Figure 2 et une semaine type à la Figure 3.

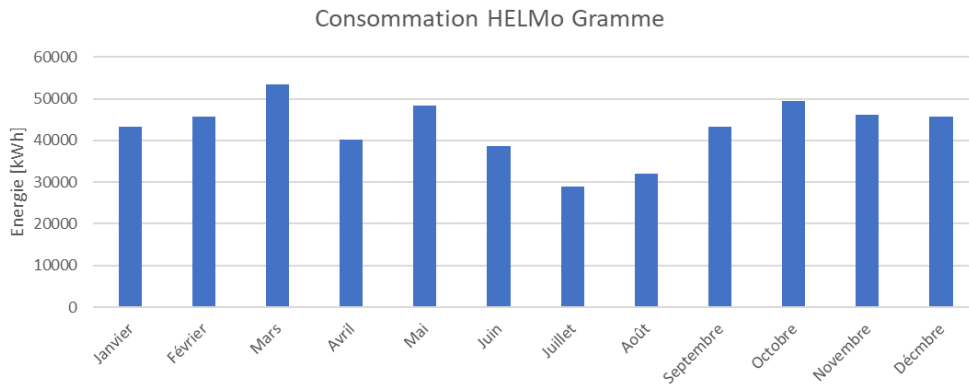


Figure 2 - Profil de consommation du campus de l'Ourthe

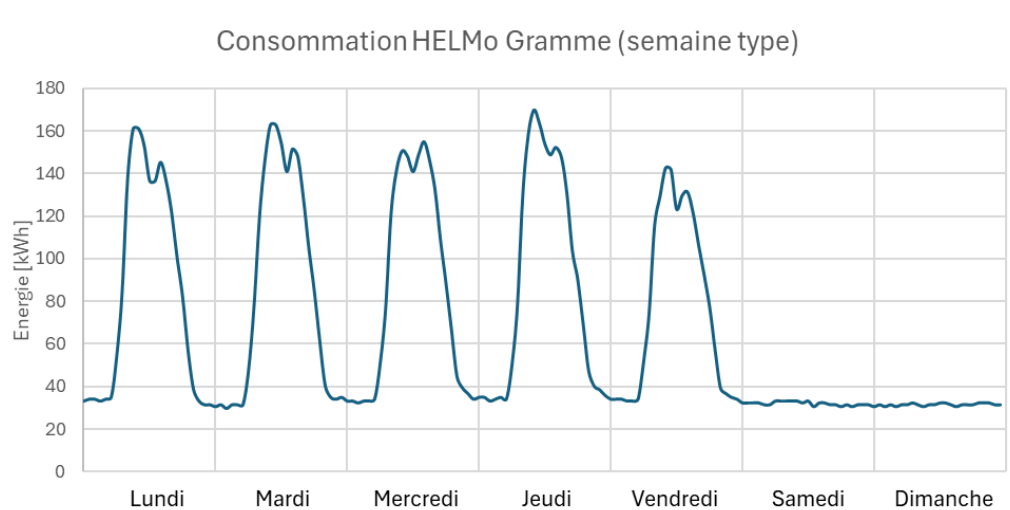


Figure 3 - Profil de consommation du campus de l'Ourthe (semaine type)

L'analyse se fera en trois temps :

- L'installation de bornes de recharge sur le parking ;
- L'ajout de l'installation photovoltaïque ;
- L'ajout d'une unité de stockage.

### 3.1 Ajout des bornes de recharge

La démonstration de ce cas test s'inscrit dans une situation future, où la plupart des professeurs et visiteurs viendront donner cours avec leur voiture électrique. Au total, vingt-cinq points de charge de 11 kW seront installés. Les recharges apparaîtront du lundi au vendredi avec un groupe de 25 voitures le matin et un autre l'après-midi, dans le but de fournir une autonomie de 50 km par voiture (trajet moyen aller-retour pour un professeur). Cette configuration augmente la consommation totale de 104 MWh par an.

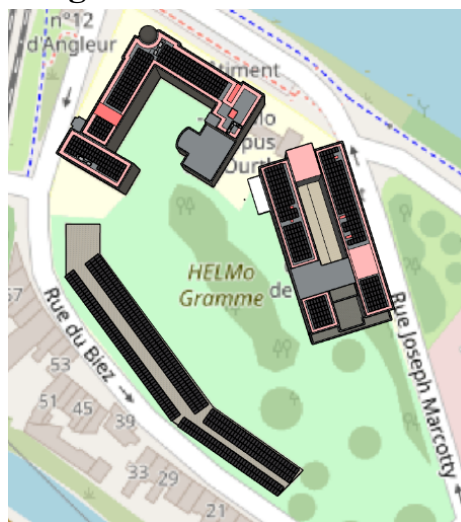


Figure 4 - Installation photovoltaïque imaginée

### 3.2 Ajout de l'installation photovoltaïque

Concernant l'installation photovoltaïque imaginée, celle-ci se compose de deux systèmes de pose différents. Une partie est installée sur les toitures des deux bâtiments, grâce à un système de pose lesté. Une autre partie est installée sur le parking grâce à un carport.

L'installation complète représente une puissance installée de 553,31 kWc. Elle est équipée de plusieurs onduleurs dont la puissance totale s'élève à 440 kVA. La production estimée s'élève à 460 MWh.

### 3.3 Ajout d'un système de stockage

Pour le stockage de l'énergie, un système composé de plusieurs batteries Li-Ion (type LFP) est utilisé. Cette technologie reste la plus adéquate pour cette utilisation où un grand nombre de cycles de charge-décharge sera infligé à la batterie. La capacité de la batterie choisie est de 372 kWh avec un convertisseur de 200 kW, qui permettrait de fournir jusqu'à 70% de la puissance absorbée par les bornes si la batterie est chargée à 100% et que toutes les bornes prélèvent 11 kW en même temps.

## 4. Description de la routine de calculs

Au début de la routine, il faut récupérer l'ensemble des informations entrées par l'utilisateur, dans le but de créer les tableaux dans lesquels sont stockés les données.

Ensuite, quart d'heure par quart d'heure, les différents tableaux sont remplis dans l'ordre suivant :

- 1) Profil de consommation du bâtiment : la consommation du bâtiment est soit, calculée sur base du profil configuré soit, importée directement depuis une feuille Excel.
- 2) Production photovoltaïque : pour cela, le programme reprend les informations de la puissance installée et de l'irradiance, et calcule la production pour le quart d'heure concerné, à l'aide des données de production relative, extraites d'un logiciel d'estimation de production photovoltaïque. Un facteur de correction est alors pris en compte pour l'inclinaison des panneaux, selon la Figure 5. Si la puissance calculée est supérieure à celle de l'onduleur encodé par l'utilisateur, la puissance prise en compte sera écrêtée à la puissance de l'onduleur.

Azimet Inclinaison	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
0°	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
10°	0,93	0,93	0,91	0,89	0,87	0,84	0,82	0,8	0,78	0,78
20°	0,98	0,97	0,94	0,9	0,86	0,81	0,76	0,72	0,69	0,68
30°	1	0,99	0,95	0,9	0,84	0,77	0,69	0,63	0,59	0,58
40°	1	0,98	0,94	0,88	0,81	0,72	0,63	0,55	0,5	0,49
50°	0,97	0,96	0,92	0,85	0,77	0,67	0,58	0,48	0,42	0,4
60°	0,93	0,91	0,87	0,8	0,72	0,62	0,52	0,43	0,36	0,33
70°	0,86	0,85	0,81	0,75	0,67	0,57	0,47	0,38	0,31	0,28
80°	0,77	0,76	0,73	0,68	0,6	0,52	0,43	0,34	0,28	0,25
90°	0,67	0,67	0,65	0,6	0,54	0,46	0,38	0,31	0,26	0,24

Figure 5 - Table de performances PV selon l'inclinaison et l'orientation (Polarsun, 2023)

- 3) Consommation des véhicules électriques :
  - a. Le programme compte le nombre de bornes utilisées selon le profil de consommation des véhicules encodés. Il prend ensuite connaissance de la présence, ou non, d'un EMS (Energy Management System) ;
  - b. Si aucun EMS n'est présent, le programme prend la puissance minimum entre celle demandée par la voiture, selon le type de charge (AC ou DC), et la puissance délivrée par le chargeur ;
  - c. Si un EMS est présent, le calcul de la puissance est différent en fonction du choix, parmi les trois options de paramétrage de l'EMS :



- i. Statique : selon la puissance entrée par l'utilisateur, celle-ci est partagée entre les différentes bornes utilisées lors de ce quart d'heure, en donnant la priorité aux bornes DC ;
- ii. Dynamique : la puissance disponible à partager, à travers les différentes bornes, est donnée par la formule suivante :

$$\text{Puissance disponible} = \text{Puissance du compteur} + \text{Puissance fournie par la batterie} + \text{Puissance du PV} - \text{Consommation} \quad (2)$$

Dans cette configuration, encore une fois, la priorité est donnée aux bornes DC et le reste de la puissance est partagée entre les bornes AC utilisées ;

- iii. Optimisation de l'autoconsommation : les recharges DC sont prioritaires à nouveau. Les recharges en AC sont exploitées uniquement lorsqu'il y a une production solaire en suffisance, ou que la batterie est assez rechargée pour assurer la recharge des véhicules du quart d'heure concerné. Les recharges en DC peuvent se réaliser même quand il n'y a pas de soleil ou que la batterie n'est pas assez chargée. La combinaison des recharges en AC et DC ne peut se faire que si la puissance délivrée par les onduleurs, ainsi que par la batterie, le permet.
- 4) Le programme calcule une première autoconsommation, sans tenir compte de la présence éventuelle de la batterie (dans le but d'avoir une idée du gain apporté par celle-ci).
  - 5) Dans le cas où une batterie a été configurée par l'utilisateur, le programme entame la gestion de celle-ci pour le quart d'heure concerné. Pour cela, plusieurs cas de figure sont possibles :
    - a. Recharge de la batterie lors des heures creuses (si option cochée) ;
    - b. Recharge de la batterie lors de la production solaire ;
    - c. Décharge de la batterie dans le cas où la production solaire ne permet pas de satisfaire la demande et que le taux de charge de la batterie est suffisant.

Dans tous les cas, la puissance de charge ou de décharge est écrêtée par le C rate<sup>1</sup> ou la puissance du convertisseur.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Le C rate caractérise à « quelle vitesse » le client souhaite décharger la batterie. Ainsi, par exemple, s'il ne reste que 5 000 Wh dans la batterie et que le client choisi un C rate à 150%, la puissance instantanée qui pourra être fournie par la batterie sera de 7,5 kW, à condition que le convertisseur en ait la capacité.

<sup>2</sup> Dans le cas d'une décharge, la puissance de décharge est le minimum entre l'énergie restante dans la batterie multipliée par le C rate ou la puissance du convertisseur.

- 6) Un calcul de bilan de l'installation est ensuite effectué. Dans cette partie, le programme calcule :
- L'énergie prélevée/injectée du/sur le réseau, selon l'équation (1).
  - La surproduction de l'installation photovoltaïque. Une séparation est effectuée entre l'injection durant les heures pleines et les heures creuses.
  - Le prélèvement d'énergie. Là aussi, une distinction est réalisée entre le prélèvement pendant les heures creuses et les heures pleines.

Les étapes 1 à 6 sont répétées pour tous les quarts d'heure de l'année.

Ensuite, les différents vecteurs sont exportés vers une feuille Excel.

## 5. Analyse des résultats

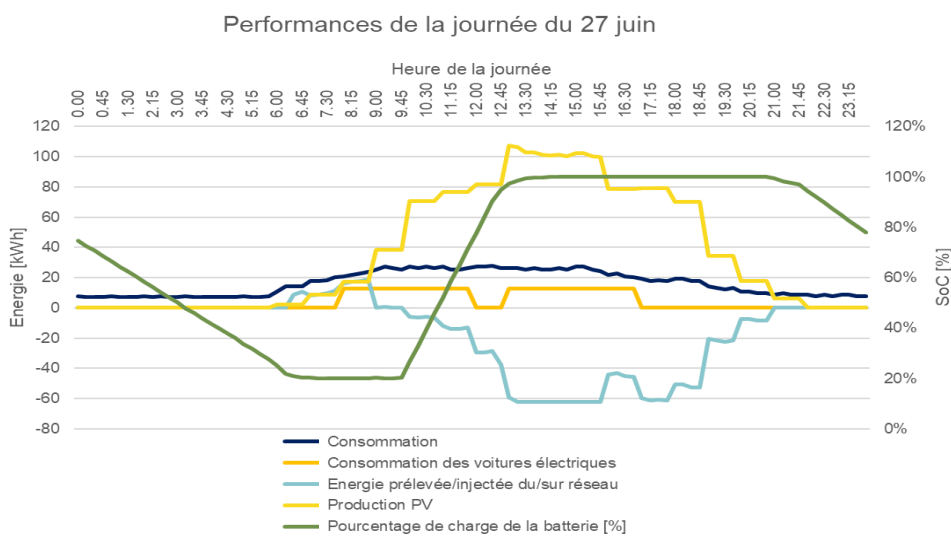


Figure 6 - Performances de la journée du 27 juin

Sur la Figure 6, il est possible de visualiser les performances théoriques de l'installation imaginée. Ainsi, nous pouvons constater qu'en début de journée, l'entière du site fonctionne sur la batterie jusqu'à la décharger entièrement dans les environs de 6 heures du matin. À ce moment-là, la production solaire commence tout doucement à débiter.

---

Dans le cas d'une recharge, la puissance de recharge est le minimum entre l'énergie complémentaire de la batterie (capacité de la batterie – énergie dans la batterie) multiplié par le C rate ou la puissance du convertisseur.

Néanmoins, entre 6 heures 45 et 9 heures, une partie de l'énergie consommée par le site provient du réseau. A partir de 9 heures et ce jusqu'à la fin de la journée, l'entièreté de l'énergie consommée par le site (soit pour les voitures, soit pour la consommation propre du site) provient directement de la production solaire ou de la batterie. D'une manière globale, l'autoconsommation passe de 54% pour une installation sans système de stockage à 70% avec une batterie.

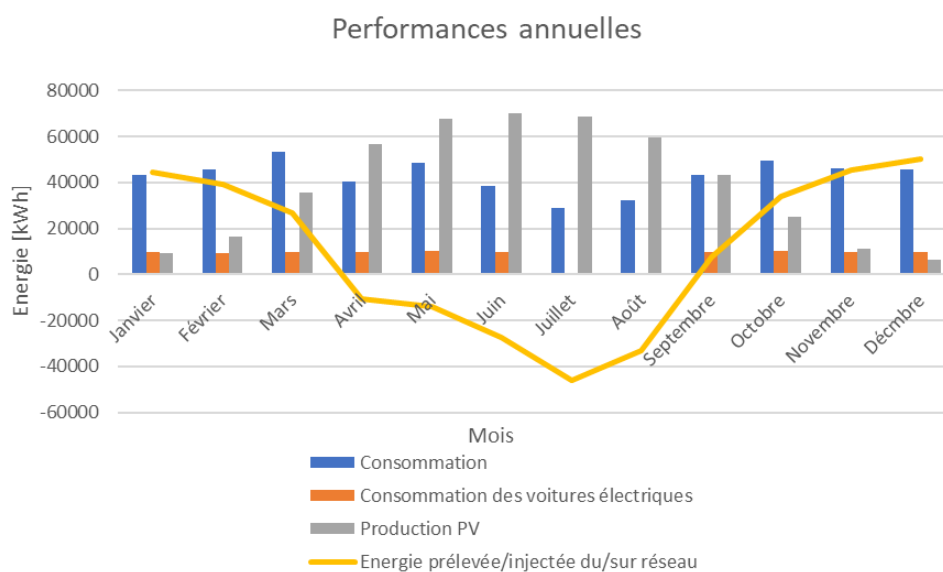


Figure 7 - Performances annuelles de l'installation

Sur la Figure 7, les performances annuelles sont représentées. Bien qu'il y ait une batterie installée sur site, la distribution de la production d'énergie solaire en Belgique nécessite le prélèvement d'énergie durant les mois d'hiver et l'injection d'énergie durant les mois d'été. Il est tout de même possible de dire que la recharge des véhicules électriques est assurée par la production solaire et ceci grâce à la batterie qui aura pu stocker l'énergie aux moments où le site n'en aura pas eu besoin.

Sur base de ces résultats, il est possible de générer un plan financier. Ainsi l'installation, telle que présentée ici, est rentable en un peu moins de 7 années et permettrait de charger des voitures électriques, sans impacter davantage le réseau de distribution. [2]

## 6. Conclusion

En conclusion, la conception d'un outil visant à la modélisation d'une installation photovoltaïque, embarquant bornes de recharges et système de stockage, permet de mettre en évidence l'amélioration de l'autoconsommation de l'énergie produite sur

site, grâce aux équipements additionnels ajoutés à une configuration classique de production photovoltaïque, pour répondre aux enjeux environnementaux, énergétiques et économiques actuels.

La modélisation permet de comparer l'influence des différents paramètres de conception pour une utilisation efficace de l'électricité produite par les panneaux solaires, en particulier en ce qui concerne la capacité de stockage de la batterie et de l'impact financier qu'elle engendre. Il en ressort qu'il est essentiel de choisir une capacité de batterie adéquate par rapport au profil de consommation du client et à la puissance installée. Néanmoins, l'impact financier lié à la batterie reste toujours, à l'heure actuelle, assez important, par rapport au prix de l'électricité. Un avantage persiste dans le fait d'utiliser une batterie car elle permettrait d'avoir la possibilité d'augmenter la puissance disponible, sans pour autant renforcer la puissance de raccordement. Certains points pourraient être présentés comme amélioration comme l'ajout d'une intelligence artificielle permettant de prédire la recharge nécessaire de la batterie le jour avant sur base des estimations météorologiques le jour d'après ; ou encore des modèles de consommation des recharges de véhicules électriques dans le but d'affiner encore plus l'étude.

Cette étude offre ainsi des perspectives intéressantes pour l'avenir de l'autoconsommation photovoltaïque, en permettant d'imaginer des solutions pratiques, économiques et durables pour la production et l'utilisation de l'électricité.

Les résultats de ces recherches pourraient être appliqués pour les acteurs de l'industrie de l'énergie solaire et de la mobilité électrique, mais aussi pour les résidentiels qui ont une volonté de concevoir des installations solaires avec stockage d'énergie et bornes de recharge, de manière plus efficace et plus rentable, contribuant ainsi à la transition énergétique et à la lutte contre le changement climatique.

## 7. Sources

- [1] Parlement Européen et Conseil Européen, *Le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique*. 2023. Consulté le : 25 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>
- [2] L. Mavaro, « Modélisation technique et financière des installations photovoltaïques équipées de bornes de recharge et de batteries de stockage, pour une utilisation en auto-consommation », HELMo Gramme, Liège, 2023.