

## 4.2 Simulation d'écosystèmes énergétiques à domicile : présentation du modèle

### 4.2.1 Cadre général

L'outil de modélisation développé sert à construire et à évaluer des scénarios, à partir de chroniques d'entrées similaire (mêmes besoins en électricité et chauffage d'une maison, mêmes trajets effectués en voiture), mais avec des équipements différents (voiture thermique ou électrique, chaudière à gaz ou PAC, concepts listés précédemment...). La comparaison des résultats permet d'évaluer l'intérêt potentiel des différentes configurations testées par rapport à un scénario de base, qui peut être par exemple la situation d'un foyer sans écosystème énergétique particulier équipé d'un véhicule thermique.

L'outil est en Python et la résolution se base sur la librairie de solveurs linéaires PuLP [11]. Il est entièrement paramétrable depuis des fichiers YAML (fichiers textes) et des fichiers CSV pour les données d'entrée afin d'être utilisable facilement par les autres membres de l'équipe.

Entrées du modèle :

- chroniques de demande (ex : électricité, chauffage, déplacements)
- moyens de production et volumes potentiels associés (ex : production solaire par kWc installé, connexion au réseau, station essence)
- coûts (monétaires ou autres) marginaux éventuels associés aux moyens de production (ex : prix ou intensité carbone de l'électricité du réseau)
- chroniques de connexion entre les différents environnements (ex : plages temporelles où la voiture est connectée à la maison)
- équipements disponibles & caractéristiques
- variable à optimiser (ex : coût, émissions de CO<sub>2</sub>, économies d'énergie, pourcentage d'autoconsommation)

Une description plus précise des données prises en entrées est donnée sections 4.2.2 et 4.2.3. Le solveur est un solveur linéaire et par conséquent, la description du fonctionnement des différents équipements et de leur interactions est linéarisée. De même, la variable à optimisée doit être une expression linéaire.

Sorties du modèle :

- solution optimale de pilotage des flux d'énergie entre les différents équipements
- solution de dispatching de la consommation lorsqu'elle est pilotable
- dimensionnement optimal des équipements lorsque déclaré comme variable d'optimisation (ex : capacité de la batterie, puissance PV installée)

La simulation aboutit à des coûts (au sens large, monétaires ou CO<sub>2</sub> ou autres) de CAPEX et d'OPEX, mais à moins que la durée de simulation corresponde à la durée de vie du système, leur agrégation dans la valeur de la fonction objectif renvoyée en sortie n'est pas pertinente telle quelle. A titre indicatif, pour la phase de démonstration qui sera présentée dans ce travail, la durée de simulation est d'une semaine au pas horaire. Une étape de post-traitement est nécessaire pour pondérer les OPEX par la durée de vie du système rapportée à la durée de la simulation afin d'obtenir un Total Cost of Ownership (TCO) ou indicateur d'impact équivalent sur toute la durée de vie du système. Faire le calcul année par année permet de plus d'obtenir le temps de retour sur investissement par rapport à un scénario de base, qui est un indicateur déterminant pour les ménages.

### 4.2.2 Architecture : catégorisation en différents types d'objets

Afin de répondre aux exigences de flexibilité explicitées section 4.1.2, un cadre de modélisation a été conçu. Chaque équipement à modéliser est associé à un objet qui est rattaché à un *environnement* et un *type d'énergie* principale, avec les implications suivantes :

- les objets dans un même environnement et d'un même *type d'énergie* sont connectés à chaque instant. Par exemple, la voiture et la maison sont deux environnements distincts. Un panneau solaire

sur le toit est rattaché à l'environnement maison, un moteur électrique est rattaché à l'environnement voiture.

- Les types d'énergie peuvent être soit une véritable forme d'énergie (électricité, chaleur, énergie mécanique, énergie chimique...), soit directement des grandeurs proportionnelles et plus pratiques à utiliser (kilomètres parcourus, litres d'essence...).
- Chaque couple (environnement, type d'énergie) donne lieu à la création d'un objet fictif *Hub* qui peut physiquement représenter un nœud liant des fils électriques ou un module d'energy management (voir exemple figure 11). Il est utilisé pour implémenter l'équation de conservation de l'énergie de ce type d'énergie dans cet environnement en tant que contrainte du modèle : ce qui rentre dans le Hub est égal à ce qui sort du Hub

$$C_{Hub}(t) : \sum_X [X \rightarrow Hub(t)] + pertes(t) = 0, \forall t$$

avec  $X$  les objets liés au Hub,  $t$  le pas de temps et  $X \rightarrow Hub(t)$  et  $pertes(t)$  des variables du modèle.

- Quand un objet est créé, il est automatiquement lié à son Hub, c'est-à-dire qu'un vecteur de variables  $Objet \rightarrow Hub(t)$  est créé, représentant le flux d'énergie de l'objet vers le Hub à chaque instant. Il peut être négatif a priori. A chaque nouvel objet créé, ces variables sont ajoutées aux membres de gauche des équations de conservation de l'énergie du Hub :

$$C_{Hub}(t) += Objet \rightarrow Hub(t), \forall t$$

Les équipements, ou objets, peuvent être de quatre types : **Source**, **Demande**, **Stockage**, ou **Convertisseur**.

### Source

- exemples : connexion au réseau, panneau solaire, station essence, borne de recharge
- caractérisée par un minimum et un maximum, qui bornent le flux depuis la source vers son Hub
- min et max peuvent être illimités
- min (et max) peuvent être négatifs (cas de réinjection sur le réseau par exemple)
- min et max peuvent être dépendant du temps (électricité que peut produire un panneau PV par exemple)
- n'importe quel type de coût (monétaire, CO<sub>2</sub>...) peut être attribué aux volumes échangés via cet objet
- min et max peuvent être déclarés comme variables pour être déterminés de manière optimale, si un coût linéaire associé est spécifié (par exemple, le coût par kWc de PV installé)
- les flux d'énergie *Source → Hub* sont des variables du modèle

### Demande

- exemples : postes de consommation d'une maison, distances parcourues en voiture
- caractérisée par une valeur qui est une donnée d'entrée
- cette valeur peut être dépendante du temps
- la demande est toujours satisfaite : le problème n'aura pas de solution si l'énergie disponible est insuffisante
- si la demande n'est pas déplaçable alors *Demande → Hub* est fixe, ce n'est pas une variable
- si la demande est déplaçable, elle sera alors pilotée par l'optimiseur dans les limites d'une fenêtre temporelle donnée en entrée.

Pour modéliser une demande déplaçable, une variable  $x_{pilotable}(t) = -ConsoDispatchable \rightarrow Hub(t)$ , qui désigne l'énergie effectivement consommée à chaque instant après dispatching (avec éventuellement une conversion puissance/énergie si pas de temps choisi n'est pas horaire), est créée pour chaque instant.

Elle peut être bornée, auquel cas  $x_{min}(t)$  et  $x_{max}(t)$  doivent être donnés en entrée. Par exemple,  $x_{min}$  peut correspondre à la consommation minimale des appareils en veille et  $x_{max}$  leur puissance nominale. La contrainte  $x_{min}(t) \leq x_{pilotable}(t) \leq x_{max}(t)$  est ajoutée au modèle.

$\forall t_0$ , on note  $E_{requise}(t_0)$  l'énergie initialement prévue au temps  $t_0$  ( $E_{requise}$  est désignée par "valeur" sur le schéma 11). Cette énergie peut être déplacée dans une fenêtre  $[t_0 - 12h, t_0 + 12h]$  en reprenant ce même exemple de la figure 11.  $\forall t \in [t_0 - 12h, t_0 + 12h]$ , des variables  $y(t_0, t)$  sont créées. Elles correspondent à la quantité d'énergie initialement prévue à  $t_0$  qui est déplacée à l'instant  $t$ . La contrainte de replacer toute l'énergie  $E_{requise}(t_0)$  dans la fenêtre  $[t_0 - 12h, t_0 + 12h]$  s'écrit :

$$\sum_{t=t_0-12h}^{t_0+12h} y(t_0, t) = E_{requise}(t_0)$$

La consommation pilotable effective à chaque instant  $t$  devient :

$$x_{pilotable}(t) = \sum_{t_0=t-12h}^{t+12h} y(t_0, t)$$

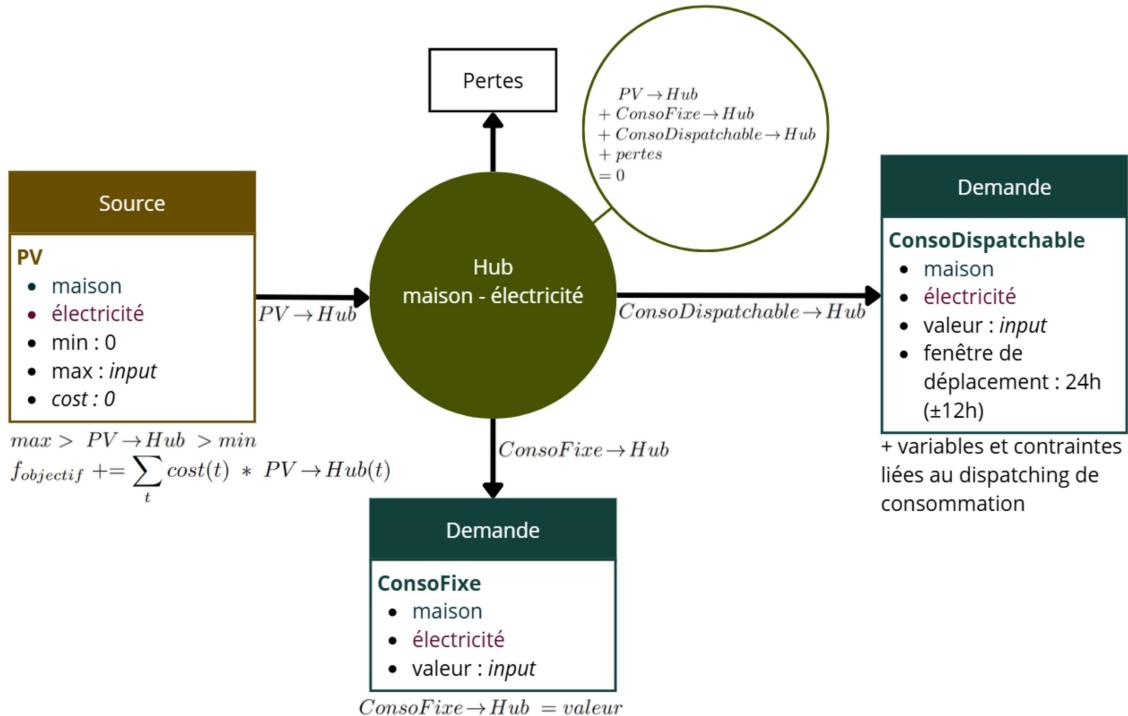


Figure 11 – Exemple d'usage des objets Source et Demande pour la modélisation d'une maison équipée d'un panneau solaire avec une part de consommation d'électricité fixe et une part déplaçable, et équation du Hub correspondante.

Un exemple d'usage des objets Source et Demande est donné figure 11. Les informations dans les encadrés sont renseignées par l'utilisateur dans un fichier de configuration, et les variables, les équations

et l'objet Hub sont créés ou mis-à-jour automatiquement par l'outil. Cet exemple présente la modélisation de l'électricité dans une maison qui aurait deux postes de consommation, un fixe (éclairage par exemple) et un pilotable à l'intérieur d'une fenêtre de 24h (chauffe-eau par exemple), et un panneau PV en tant que source. Les flux d'énergie représentés par les flèches sont des variables du modèle. La valeur min du PV est 0 (pas de flux d'énergie vers le PV) et sa valeur max est son profil de production (donc dépend de  $t$ ). Son coût marginal est 0 : le recours à l'électricité produite par le PV ne pèse pas sur la fonction objectif  $f_{objectif}$ . L'équation de conservation de l'énergie du Hub est explicitée dans la bulle et est une contrainte du modèle.

### Stockage

- exemple : batterie
- caractérisé par un volume
- une variable  $SOC(t)$  caractérisant l'état de charge du stockage à chaque instant est créé, avec la contrainte  $0 \leq SOC(t) \leq volume$
- les équations de conservation de l'énergie à l'intérieur du stockage d'un pas de temps à un autre sont ajoutées au modèle :  $\forall t > 0, SOC(t) = SOC(t - 1) - Stockage \rightarrow Hub(t - 1)$
- le taux de charge initial  $\alpha$  de la batterie doit être spécifié :  $SOC(0) = \alpha * volume$
- le volume de stockage peut être déclaré comme variable du modèle pour être déterminé de manière optimale, si un coût linéaire associé est spécifié (par exemple, coût par kWh de batterie installé)

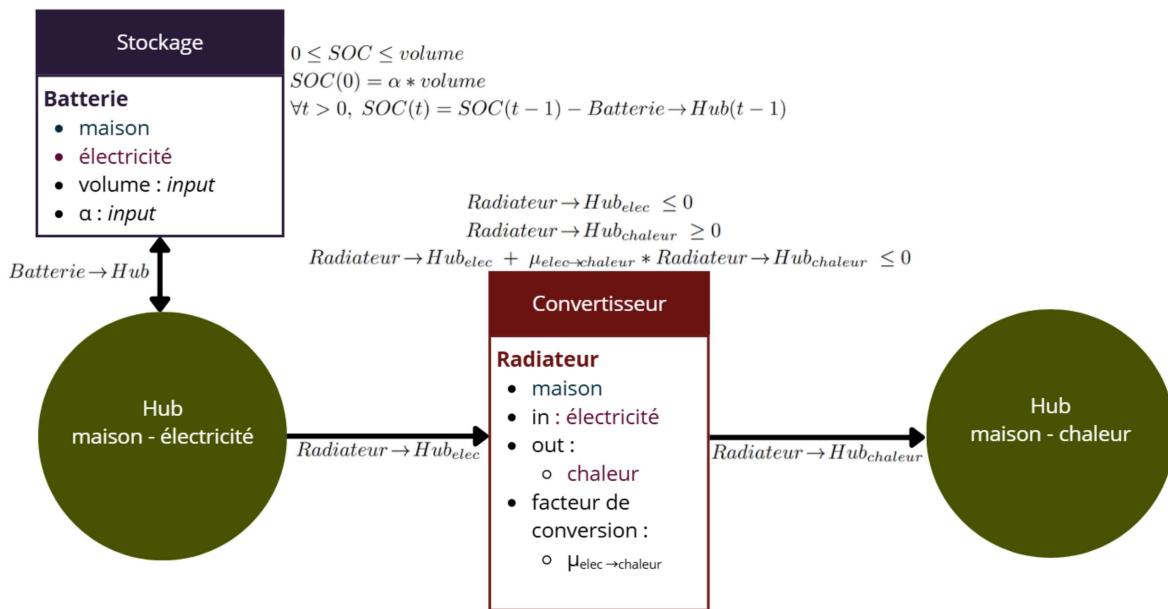


Figure 12 – Exemple d'usage des objets Stockage et Convertisseur pour la modélisation d'une batterie et d'un radiateur électrique. Les équations des Hubs sont analogues à celle de l'exemple figure 11.

### Convertisseur

- exemples : radiateur électrique, moteur électrique, moteur thermique, groupe électrogène
- le type Convertisseur est le seul type d'objet lié à plusieurs énergies : une seule en entrée ( $Hub_{in}$ , avant conversion) et une ou plusieurs en sortie ( $Hub_{out}$ , après conversion), avec les rendements et facteurs de conversion  $\mu_{in \rightarrow out}$  associés
- la conservation de l'énergie du convertisseur est ajoutée comme contraintes du modèle  $\forall t$  :

$$Convertisseur \rightarrow Hub_{in}(t) + \sum_{out} \mu_{in \rightarrow out} * Convertisseur \rightarrow Hub_{out}(t) \leq 0$$

avec  $Convertisseur \rightarrow Hub_{in}(t) \leq 0$  et  $Convertisseur \rightarrow Hub_{out}(t) \geq 0$  (le convertisseur ne peut être utilisé que dans le sens in  $\rightarrow$  out). La conservation de l'énergie est ici plutôt exprimée comme une inéquation : les pertes sont autorisées mais pas la création d'énergie

Un exemple d'utilisation des objets Stockage et Convertisseur est donné figure 12. Le schéma représente une batterie et un radiateur électrique dans une maison. Pour la batterie, des variables  $SOC$  sont créées en plus des variables de flux  $Batterie \rightarrow Hub$  pour modéliser son état de charge. Le radiateur transforme de l'électricité en chaleur. La contrainte que l'énergie aille bien depuis le Hub électricité vers le Hub chaleur à travers le radiateur impose que  $Radius \rightarrow Hub_{elec} \leq 0$  et  $Radius \rightarrow Hub_{chaleur} \geq 0$ . Une seule connexion est autorisée en *in*, mais plusieurs sont autorisées en *out*, qui contient une liste d'énergies. Par exemple si l'on s'intéresse à la récupération de chaleur, on modélisera un groupe électrogène par un convertisseur avec de l'essence en entrée et de l'électricité et de la chaleur en sortie.

Cette décomposition en catégories d'objets Source, Demande, Stockage et Convertisseur permet de modéliser des systèmes à partir d'un minimum d'informations à renseigner par l'utilisateur, qui correspondent aux données présentées dans les encadrés sur les figures 11 et 12. La création des Hubs, des variables et des équations associées à chaque objet est automatisée et permet donc une grande flexibilité pour modéliser rapidement des systèmes très différents.

Pour ce qui est des types d'énergie, il est également possible de donner un niveau de détail plus fin que "électricité". Par exemple, il est possible de faire une distinction entre 220V/AC et 24V/CC, auxquels cas deux Hubs séparés seraient créés et connectables via un objet Convertisseur. Cette possibilité permet de mieux évaluer les pertes énergétiques des différentes options d'alimentation en électricité d'un foyer et des modes de recharge d'une voiture électrique.

#### 4.2.3 Architecture : connexions entre environnements

La partie précédente a permis d'expliquer comment modéliser les différents éléments d'un environnement au sein duquel tous les équipements peuvent être toujours connectés les uns aux autres. L'intégration d'une voiture électrique dans la modélisation d'un écosystème énergétique ne correspond pas à cette situation : elle est donc considérée ici comme un environnement distinct, avec ses propres Hubs, qui peuvent être reliés ou non aux Hubs de l'environnement maison.

Pour lier deux environnements, une chronique de booléens doit être donnée en entrée, indiquant les plages de connexion  $\Omega_c$  et les plages de déconnexion  $\Omega_d$  entre les deux (périodes où la voiture est branchée à la maison par exemple).

- Des vecteurs de variables  $Hub_{env1} \rightarrow Hub_{env2}(t), \forall t$  sont créés pour chaque paire de Hubs de *env1* et *env2* de même type d'énergie, liant les Hubs de chaque paire. Ces variables de liaison viennent s'ajouter aux équations des hubs, comme les autres variables de liaison :

$$C_{hub_{env1}} += -Hub_{env1} \rightarrow Hub_{env2}$$

$$C_{hub_{env2}} += Hub_{env1} \rightarrow Hub_{env2}$$

- Quand deux environnements sont déconnectés, il n'y a pas d'échange d'énergie permis entre les deux :  $Hub_{env1} \rightarrow Hub_{env2}(t) = 0, \forall t \in \Omega_d$
- Quand deux environnements sont connectés, il est permis d'échanger de l'énergie entre les Hubs dans des limites  $min(t)$  et  $max(t)$  fixées en entrée :

$$min(t) \leq Hub_{env1} \rightarrow Hub_{env2}(t) \leq max(t), \forall t \in \Omega_c$$

Un exemple de modélisation complète d'une voiture électrique et de connexion à un environnement maison est donné figure 13. Au même titre qu'une consommation d'électricité, la demande de déplacement est modélisée par une chronique de distances à parcourir, en km. Le moteur électrique est un Convertisseur qui transforme l'électricité en km, avec un facteur de conversion  $\mu_{elec \rightarrow distance}$  renseigné en entrée (typiquement 15 kWh/100km). On considère ici que la voiture a accès à une borne de recharge à n'importe quel moment (la source BorneRecharge fait partie de l'environnement voiture), mais il est aussi possible de déclarer la borne de recharge dans un environnement distinct "station" en spécifiant des plages horaires où la voiture peut se connecter à la station et des plages où elle ne peut pas, comme ce qui a été fait pour la maison.

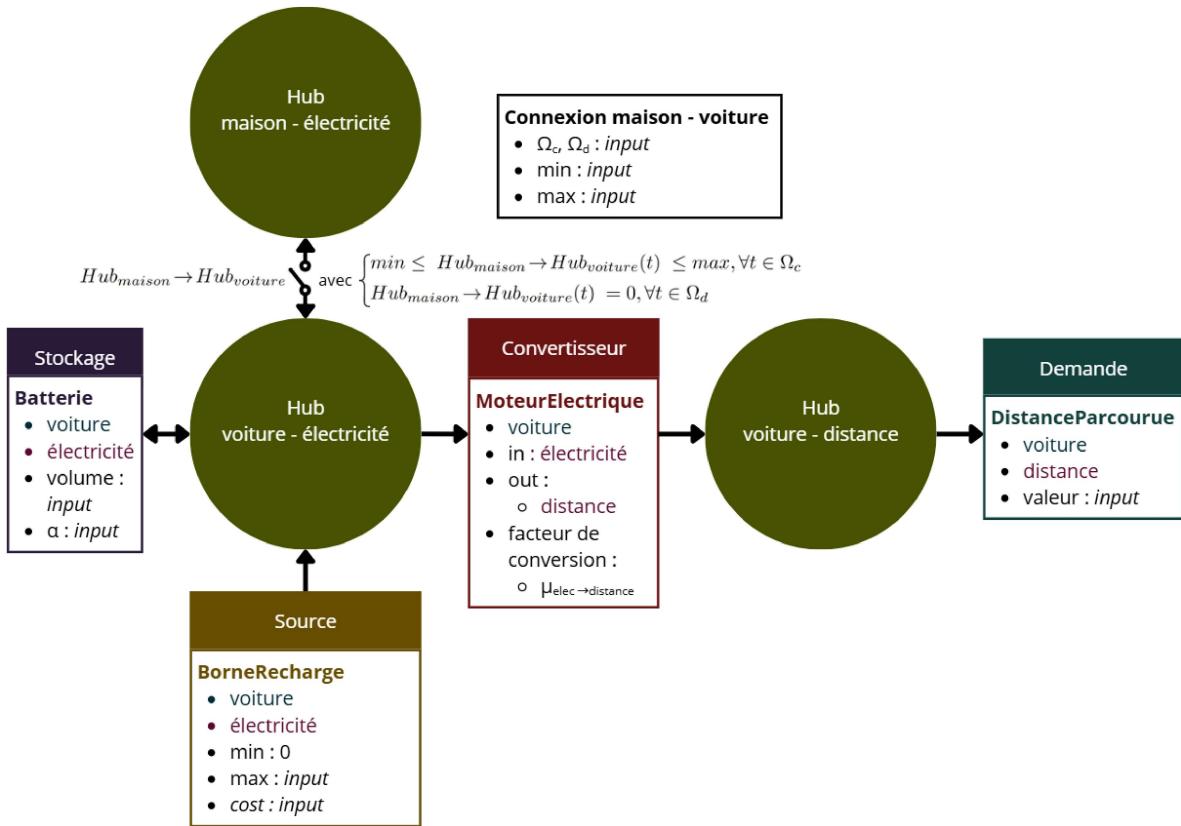


Figure 13 – Exemple de connexion entre un environnement *voiture* et un environnement *maison*, et modélisation complète d'une voiture électrique.

Cette architecture permet donc de construire un grand nombre de systèmes différents en modélisant plusieurs voitures ou alors plusieurs quartiers qui auraient des capacités d'échanges limitées par exemple. Elle permet de plus de modéliser les concepts décrits dans la partie 4.1.2, en déclarant une batterie dans un environnement disjoint "batterie" étant tantôt embarquée dans une voiture (donc connectée à un environnement voiture), tantôt branchée en stationnaire (donc connectée à un environnement maison ou bien station-batterie).

### 4.3 Démonstration de l'outil sur un cas d'application

Les fonctionnalités principales sont opérationnelles mais l'outil est en cours de finalisation, alors seul une démonstration sur un exemple d'écosystème énergétique à domicile est donné ici. Cet exemple vise à illustrer l'utilisation de l'outil, mais il ne peut pas permettre de tirer des conclusions quant au dimensionnement de l'écosystème car les données d'entrée ne sont pas représentatives de situations réelles.

#### 4.3.1 Données d'entrée : un foyer équipé d'une voiture

On choisit de simuler les flux d'électricité dans un foyer sur une semaine au pas horaire, de manière simplifiée, dans deux scénarios distincts, un scénario  $S_{ref}$  de référence et un scénario  $S_{sol}$  incluant une solution à tester, et des variantes  $S_{ref}^*$  et  $S_{sol}^*$  dans lesquelles les conditions de tarification de l'électricité sont différentes.

Les deux scénarios partagent les hypothèses suivantes :

- Le foyer a une consommation d'électricité donnée en entrée en Wh dont une part (80%) est fixe et une part (20%) est déplaçable dans une fenêtre de  $\pm 12h$  autour de l'instant auquel elle était

initialement prévue. Ces données prennent la forme d'une série temporelle au pas horaire.

- Le foyer est équipé de panneaux solaires qui totalisent 3 kWc de puissance installée et qui suivent un profil de production donné en Wh en entrée au pas horaire.
- Le foyer est connecté au réseau, dont il peut tirer 9000 Wh par heure au maximum (abonnement 9 kVA). Dans les scénarios  $S_{ref}$  et  $S_{sol}$ , l'électricité est facturée à 19,52 ct€/kWh (TRV) et il n'y a pas de réinjection possible. Dans les scénarios alternatifs  $S_{ref}^*$  et  $S_{sol}^*$ , l'électricité est facturée au prix du marché spot à J-1, une chronique de prix étant donnée au pas horaire en entrée. La réinjection est autorisée jusqu'à -9000 Wh par heure.
- Le foyer est équipé d'une voiture et a un certain nombre de trajets à faire dans la semaine. Ces déplacements sont caractérisée par un nombre de kilomètres à parcourir et un instant où ils sont parcourus. Ces données prennent la forme d'une série temporelle au pas horaire indiquant le nombre de kilomètres à parcourir à chaque heure (0 si la voiture est à l'arrêt).

Dans le scénario  $S_{ref}$ , la voiture est thermique et roule à l'essence, qui coûte 1,7€/L. Un schéma du système est représenté figure 14(a) : il n'y a aucun interaction entre la voiture et la maison.

Dans le scénario  $S_{sol}$ , représenté sur la figure ??(b), la voiture est électrique et équipée d'une batterie de 15 kWh. Elle peut se connecter à la maison lorsqu'elle y est (les plages temporelles de connexion à la maison sont données en entrée), et elle peut se recharger à une borne de recharge extérieure facturée 20 ct€/kWh. De plus, un module contenant une batterie supplémentaire de 15 kWh est embarqué dans la voiture pour les longs trajets. Le reste du temps, il est connecté à la maison en batterie stationnaire.

#### 4.3.2 Scénario de référence

La solution de dispatching fournie par l'optimiseur pour le scénario de référence  $S_{ref}$  est représentée sur la figure 15. Les flux d'énergie entrants et sortants des Hubs maison-électricité et voiture-essence sont représentés à chaque instant.

Pour le Hub voiture-essence, on voit donc à chaque instant sur la figure 15(b) d'où vient l'essence et où est-ce qu'elle va : directement de la pompe à essence (volumes en jaune positifs) vers le moteur (volumes violets négatifs), puisque l'on n'a pas modélisé de stockage pour représenter le réservoir. Il n'y avait ici aucun degré de liberté pour le pilotage : les volumes d'essence utilisés sont imposés par les données d'entrées qui indiquent les déplacements à effectuer (trajets matin et soir en semaine, retour à la maison le mercredi midi, grands trajets le vendredi et le samedi, autres trajets aléatoires). Par construction, les flux d'énergie sont symétriques à chaque instant (tout ce qui rentre dans le Hub sort du Hub, éventuellement représenté par des pertes).

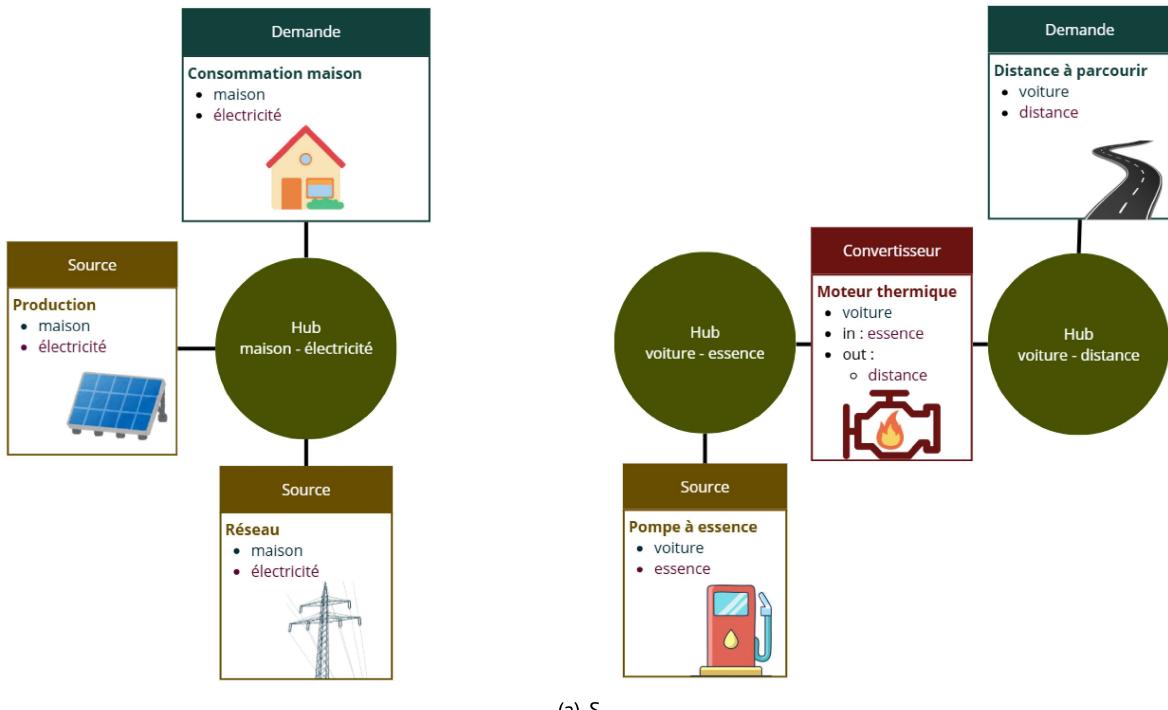
Pour le Hub maison-électricité, on observe sur la figure 15(a) que l'électricité vient du PV (aires jaunes) pendant les heures où il y a du soleil, et du réseau (aires bleues foncé) la nuit. On observe aussi que la consommation déplaçable (en bleu clair) est déplacée aux heures de soleil quand c'est possible.

#### 4.3.3 Scénario avec proposition de solution

Pour ce qui est du scénario  $S_{sol}$ , la solution de dispatching fournie par l'optimiseur est représentée sur la figure 16. Les flux d'énergie entrants et sortants des Hubs maison-électricité, voiture-électricité et module-électricité sont représentés à chaque instant.

Les plages hachurées en bleu représentent les créneaux pendant lesquels la voiture est connectée à la maison (les nuits le plus souvent), c'est une donnée d'entrée. Le module batterie supplémentaire est connecté à la maison en début de semaine jusqu'au jeudi, embarqué dans la voiture le vendredi et le samedi pour les grands trajets à parcourir, puis laissé à la maison le dimanche (non représenté sur les graphiques). C'est aussi une donnée d'entrée.

Sur le graphe du Hub électricité-maison (figure 16(a)), on voit que contrairement au scénario  $S_{ref}$ , la production solaire (aire jaune) est utilisée en totalité et stockée dans la batterie du module amovible lors-



(a)  $S_{ref}$

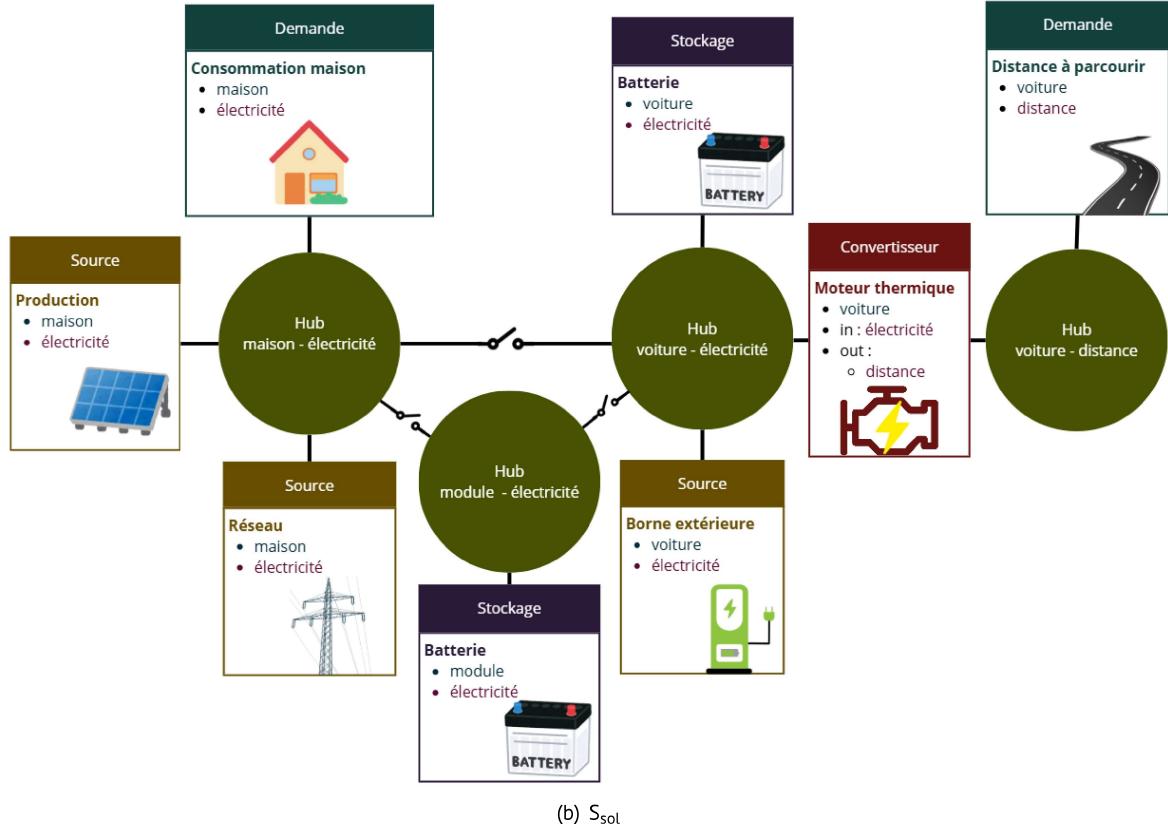
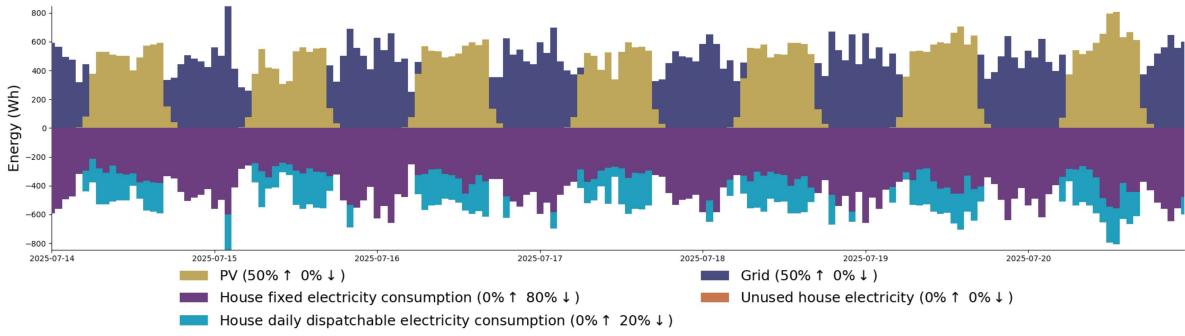
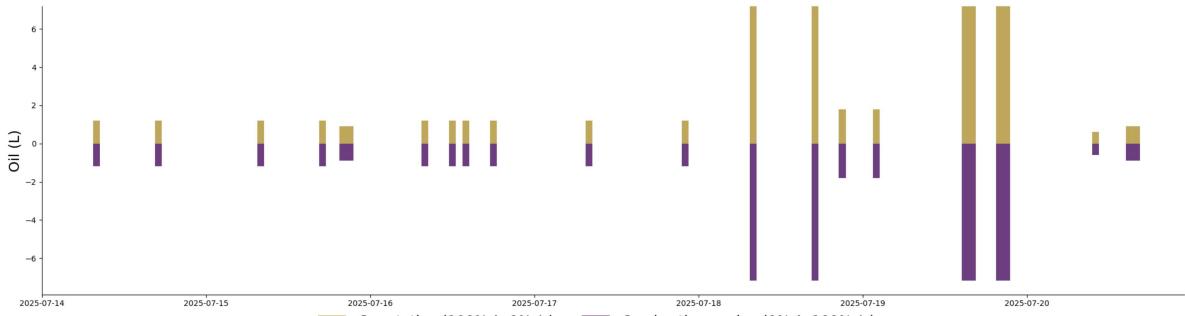


Figure 14 – Schémas des scénarios  $S_{ref}$  (a) et  $S_{sol}$  (b).



(a) Hub maison-électricité ( $S_{ref}$ )



(b) Hub voiture-essence ( $S_{ref}$ )

Figure 15 – Solution de dispatching fournie par l'optimiseur pour le scénario de référence  $S_{ref}$ .

qu'il est connecté à la maison. Le vendredi, lorsque le module est embarqué dans la voiture en journée, la production solaire est écrétée. On observe aussi que la batterie est préférentiellement rechargée au solaire, quand c'est possible.

La consommation déplaçable (aires bleu clair) est souvent déplacée dans les heures de soleil, mais de manière moins systématique que dans le scénario  $S_{ref}$ .

L'électricité du réseau (aires bleu foncé) est moins utilisée que dans le scénario  $S_{ref}$ , à l'exception de certains instant précédent les grands trajets, où les batteries de la voiture et celle du module amovible sont rechargées (aires orange).

On note de nombreux échanges neutres entre la batterie de la voiture et celle du module. Il n'y a dans le modèle aucune contrainte ni aucun coût pour pénaliser ces mouvements de vases communicants, alors il existe des solutions équivalentes qui jouent avec ces variables, et l'optimiseur en donne ici une. Des contraintes ou coûts pour empêcher ces mouvements ou alors une étape de post-traitement ferait beaucoup gagner les résultats en lisibilité.

La figure 16(b) représente les valeurs des variables liées au Hub voiture-électricité. L'électricité utilisée pour les déplacements correspond aux aires violettes en négatif qui représentent les flux vers le moteur électrique. Lorsque la voiture est connectée à la maison et donc au module, les mêmes flux d'échanges parasites entre les deux batteries apparaissent. L'information est d'autant plus brouillé qu'il n'est pas interdit ou pénalisé d'inclure dans la solution des échanges du type Hub(voiture, électricité) → Hub(maison, électricité) simultanés à Hub(maison, électricité) → Hub(module, électricité) que l'on voudrait voir représentés directement par Hub(voiture, électricité) → Hub(module, électricité) pour rendre les résultats interprétables.

Pour les déplacements, l'électricité des batteries est privilégiée, et complétée par de l'électricité venant de la borne de recharge extérieure (aire bleue clair) lorsque les batteries sont vides.

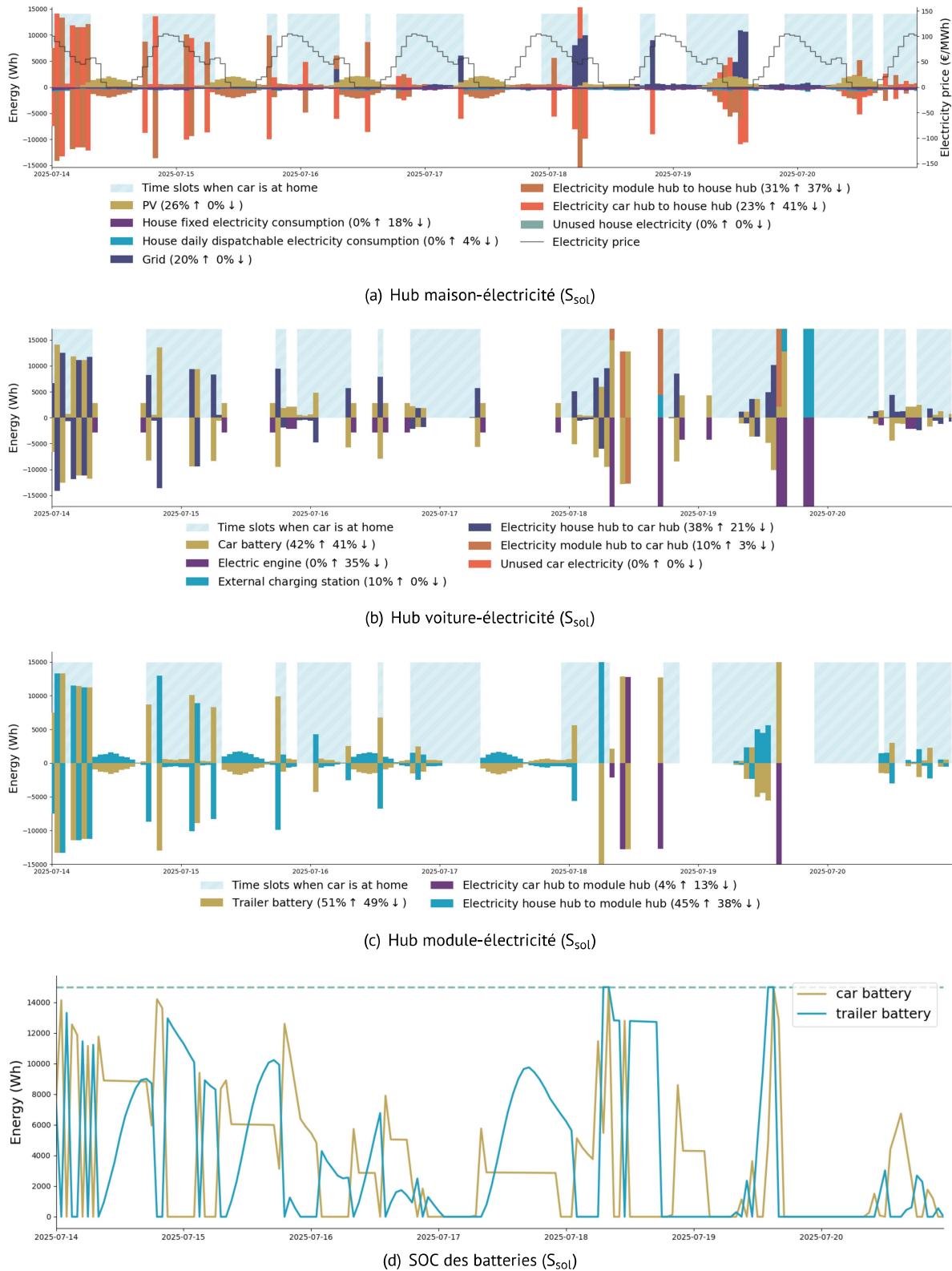


Figure 16 – Solution de dispatching fournie par l'optimiseur pour le scénario  $S_{\text{sol}}$ .

Les flux du Hub module-électricité sont représentés sur la figure 16(c). Si l'on fait abstraction des échanges parasites décrits précédemment, on observe que la batterie du module stocke l'excédent de la production solaire en journée pour ré-injecter le soir à la maison. Elle est de plus chargée avant les grands trajets où le module est embarqué pour renvoyer l'électricité dans la voiture au moment des déplacements.

Enfin, les états de charge (SOC) des deux batteries de la voiture et du module sont donnés sur la figure 16(d), mais à nouveau la lisibilité des résultats souffre beaucoup des échanges parasites.

Au global, le coût de l'achat d'énergie a été optimisé à 23,91 € sur la semaine, ce qui est près de cinq fois plus bas que les 115,23 € du scénario de référence. En remplaçant les données d'entrée par des données plus consolidées, ce résultat permettra d'estimer le prix maximal que la solution de voiture électrique avec module amovible peut atteindre pour être rentabilisée. Par exemple si on considérait que cette même semaine type se répétait à l'identique toute l'année, l'économie réalisée sur l'approvisionnement en énergie dans le  $S_{\text{sol}}$  par rapport au  $S_{\text{ref}}$  est de 23 700 € sur cinq ans.

#### 4.3.4 Scénarios alternatifs avec prix de marché

Pour aller plus loin dans les possibilité d'intégration des écosystèmes énergétiques à domicile dans les réseaux, deux scénarios exploratoires  $S_{\text{ref}}^*$  et  $S_{\text{sol}}^*$  prennent les mêmes hypothèses que  $S_{\text{ref}}$  et  $S_{\text{sol}}$  respectivement, mais cette fois la tarification de l'électricité venant du réseau est au prix du marché spot à J-1, et il est également possible de réinjecter sur le réseau en vendant au prix de marché.

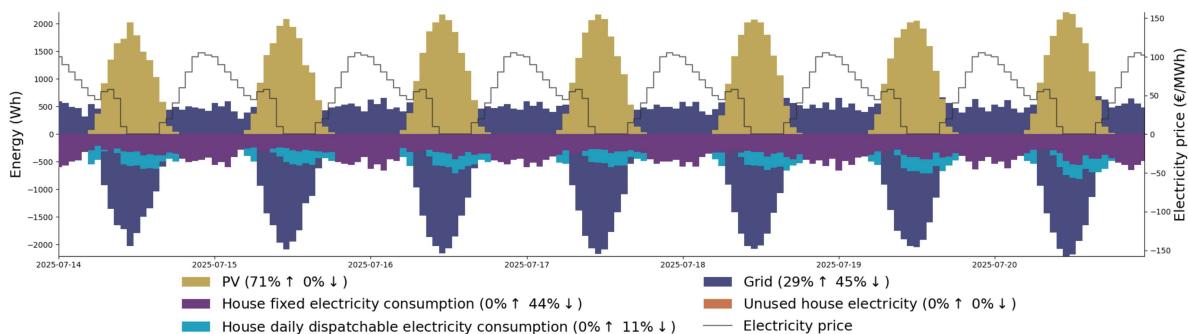


Figure 17 – Solution de dispatching des flux du Hub maison-électricité pour le scénario  $S_{\text{ref}}^*$ .

La solution de dispatching du Hub maison-électricité du scénario  $S_{\text{ref}}^*$  est donné figure 17. Les prix de l'électricité du réseau sont représentés par la ligne noire et l'axe de droite. Aux heures de midi, le prix de l'électricité est quasi nul mais positif (0,1€/MWh).

Cette fois-ci, la consommation pilotable est déplacée aux heures de soleil et aux heures les moins chères, lors du creux de prix de la nuit vers 5h du matin. Le déplacement de consommation sur le pic de prix du matin est évité, pour permettre qu'une plus grande part de la production solaire soit revendue à ce moment là.

La figure 18 représente le Hub maison-électricité pour le scénario  $S_{\text{sol}}^*$ . De manière analogue au scénario  $S_{\text{ref}}^*$ , la consommation pilotable est déplacée aux heures les moins chères.

Les batteries ne sont plus seulement utilisées pour faire des stocks pour la consommation de la maison et de la voiture, mais pour faire du trading : elles se rechargent une première fois lors du creux du matin pour réinjected lors du pic du matin (la batterie du module qui reste en stationnaire surtout, la voiture est déjà partie au plus haut du pic). De même, la batterie du module est rechargée aux heures quasi-gratuites pour réinjected dans le réseau lors du pic du soir. La batterie de la voiture se recharge au

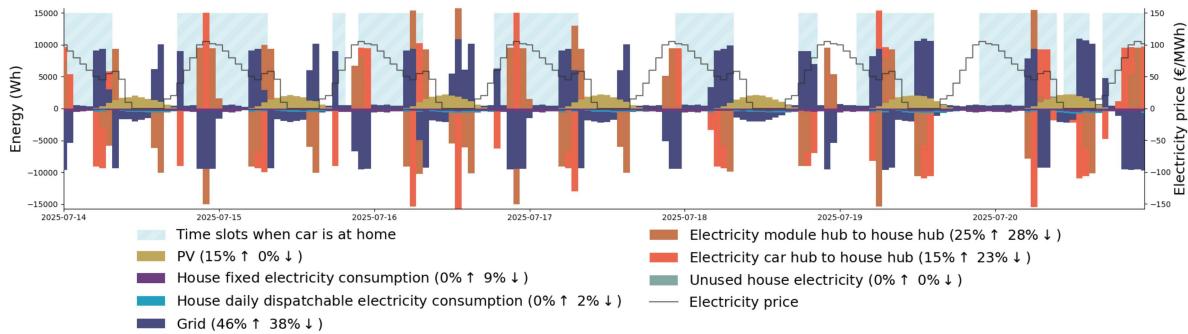


Figure 18 – Solution de dispatching des flux du Hub maison-électricité pour le scénario  $S_{\text{sol}}^*$ .

moment où elle rentre à la maison à 18h pour réinjecter sur le réseau à la pointe à 21h.

Le vendredi, où de grands trajets sont prévus en journée, il n'y a pas de réinjection sur le réseau lors pic du matin, les batteries sont chargées à bloc avant le départ.

Les coûts énergétiques ont été optimisés à 109,03 € pour le scénario  $S_{\text{ref}}^*$  et -1,53 € pour le scénario  $S_{\text{sol}}^*$ , signifiant que pour ce scénario, le trading a plus que compensé le coût de l'approvisionnement en énergie.  $S_{\text{ref}}^*$  est principalement pénalisé par l'achat d'essence pour la voiture thermique. Les gains sur la facture d'électricité peuvent seulement être faits en vendant la production solaire lors du pic de prix du matin et en déplaçant la consommation piloteable hors des heures de pics de prix. Dans ces conditions, le gain sur cinq ans du scénario  $S_{\text{sol}}^*$  par rapport au scénario  $S_{\text{ref}}^*$  est de 29 200€.

Si le signal prix envoyé par le marché spot à J-1 reflète correctement les besoins du réseau, ces scénarios alternatifs ont l'avantage, par rapport au scénario de base au tarif fixe, de participer à l'équilibrage du réseau, et constituent en ce sens des exemples concrets d'implémentation du concept de *smart grids*, nécessaires à la décarbonation de l'électricité.

#### 4.4 Futurs développements

L'outil de modélisation qui a été présenté ici est toujours en cours de construction et connaît actuellement un certain nombre de limites, qui feront l'objet de futurs développements. Les points d'attention actuels sont les suivants :

- consolider des jeux de données d'entrée représentatifs, prenant en compte la saisonnalité et la variabilité de l'état du réseau et des cas d'usage
- implémenter la possibilité de modéliser des rendements pour les stockages
- intégrer un coût du cyclage des stockages, car à chaque utilisation les batteries se dégradent un peu et leur valeur résiduelle baisse. Une prise en compte de ce coût permettrait à l'optimiseur d'arbitrer entre la préservation de la batterie et le gain à l'utiliser.
- sélectionner des solutions d'optimisation sans échanges inutiles entre les composants (trajets indirects entre des Hubs et vases communicants entre des stockages), via des contraintes, des attributions de coûts ou bien du post-traitement.

Cet outil permet d'étudier de nombreux concepts différents et de modéliser simplement des smart grids visant à remplir la fonction d'équilibrage offre/demande. Il peut également être utilisé non pas pour minimiser des coûts, mais aussi pour minimiser les émissions de GES d'un système par exemple, et va permettre d'évaluer de manière chiffrée de nombreux concepts étudiés par le département de R&D de Stellantis.