

# **Contribution à l'autoconsommation de l'électricité produite par deux installations photovoltaïques via batteries, contrôle de la production d'eau chaude sanitaire et prises intelligentes**

Dr Ir. V. HANUS  
HENALLUX - Pierrard – Virton

*Le projet Gaume Energies a, entre autres, comme objectif de mettre en place des solutions de stockage décentralisé d'énergie afin d'augmenter au-delà de 60% le taux d'autoconsommation d'énergie d'origine photovoltaïque. Le placement de batteries, de contrôleurs de puissance sur la production d'eau chaude sanitaire et de prises intelligentes pendant deux ans sur deux installations a permis de constater, via un monitoring, un taux d'autoconsommation entre 71 et 84%, selon les installations et les années considérées, à comparer avec un taux compris entre 20 et 31 % sans système.*

*Mots-clefs : batterie, contrôleur de puissance, photovoltaïque, prise intelligente.*

*One goal of the project Gaume Energies is to set up energy storage solutions to increase the self-consumption of the photovoltaic electricity above a rate of 60%. The monitoring of batteries, power controller on the production of sanitary hot water, and smart plugs for two installations during two years allowed to observe a self-consumption rate between 71 and 84% (depending on the installation and the year), to compare to a rate between 20 and 31% without any system.*

*Keywords : battery, power controller, PV heater, photovoltaics, smart plug.*

## 1. Présentation du projet « Gaume Energies »

Le projet « Gaume Énergies » est un projet mis en place par le Groupe d'Action Locale (GAL) Parc Naturel de Gaume asbl (PNdG), financé dans le cadre du Plan wallon de Développement Rural 2014-2020.

Ce projet a, entre autres, pour objectif de mettre en place des solutions de stockage décentralisé d'énergie, avec les indicateurs initiaux suivants à atteindre :

- 2 bâtiments-pilotes pour le stockage décentralisé d'énergie ;
- 2 formations d'occupants ;
- 2 solutions de stockage réalisées ;
- au minimum 60% d'autoconsommation de l'énergie photovoltaïque produite annuellement, de manière à être cohérent avec le tarif prosumer mis en place par la CWAPe, qui a établi que seulement « 37,76 % de l'énergie produite est consommée simultanément » [1].

L'École d'Ingénieurs d'HENALLUX est le sous-traitant chargé des calculs et des aspects techniques. Deux bénéficiaires possédant déjà des installations photovoltaïques ont été sélectionnés au cours du projet, et deux systèmes ont été installés : ils sont composés d'une batterie (soit Li-ion, soit Na-ion), d'un contrôleur de puissance sur la résistance d'un ballon d'eau chaude sanitaire, le tout géré par un système de gestion énergétique (Energy Management System, EMS). Ils ont été monitorés sur une période de deux ans, soit de juillet 2019 à juin 2021.

## 2. Présentation des systèmes mis en place

Les systèmes mis en place relèvent de trois technologies différentes :

- Une batterie électrochimique permet de stocker l'électricité sous forme chimique. Elle comprend un certain nombre de cellules, couplées à un convertisseur de puissance bidirectionnel, qui réalise l'interface entre le réseau électrique domestique et les cellules. L'état de la batterie est contrôlé à travers un système (Battery Management System, BMS). L'électricité peut être restituée avec un certain rendement : ce rendement globalise un rendement dû à la conversion électrochimique, un rendement du convertisseur de puissance bidirectionnel et l'auto-décharge de la batterie.
- Un contrôleur de puissance associé à une résistance pour la production d'eau chaude sanitaire (PV-heater) permet de convertir l'électricité excédentaire en stockage de chaleur ; la production d'eau chaude sanitaire est déplacée dans le temps de manière à avoir lieu pendant les moments où une injection sur le réseau est susceptible de se mettre en place ; la température de l'eau chaude peut également être relevée dans un certain intervalle pour stocker plus de chaleur dans le ballon lorsque la production photovoltaïque est abondante. L'eau chaude stockée ne permet pas de restituer de l'électricité.

- Des prises intelligentes (smart plugs) permettent d'interrompre le cycle d'un appareil électroménager à son démarrage pour le reprendre quand la production photovoltaïque est suffisamment élevée pour induire une autoconsommation.

Cette dernière solution n'est pas à proprement parler du stockage d'énergie : c'est uniquement un décalage temporel qui permet de mettre consommation et production en phase. Les prises intelligentes participent donc à l'objectif d'autoconsommation, mais leur contribution est faible (car les consommations déplacées sont modestes), et donc les conclusions ne s'en trouvent pas modifiées.

L'interaction de toutes ces technologies est gérée au travers d'un système de gestion énergétique, qui actionne les différents dispositifs selon les priorités suivantes :

1. les prises intelligentes ne souffrent d'aucun rendement : elles sont donc actionnées dès qu'un certain seuil de puissance photovoltaïque produit est atteint ;
2. la batterie perd un certain pourcentage d'énergie lors des transformations entre énergie électrique et énergie chimique ; cependant, elle restitue de l'énergie électrique, et est donc chargée en priorité à tout autre système de stockage ;
3. le contrôleur de puissance sur la production d'eau chaude sanitaire est activé en dernier lieu, puisqu'il ne restitue pas d'énergie électrique :
  - si la production d'eau chaude sanitaire est assurée électriquement, alors c'est un déplacement temporel de la production qui est implémenté, dans le respect des températures minimum (55 °C pour les légionelles) et maximum du ballon ;
  - si la production d'eau chaude est assurée au moyen d'énergie fossile, alors c'est un préchauffage qui est ainsi effectué, permettant de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> de l'habitation.

Deux bénéficiaires ont été sélectionnés en regard des objectifs à atteindre : une installation est localisée à Meix-devant-Virton, l'autre à Florenville.

## 2.1. Installation de Meix-devant-Virton

L'installation photovoltaïque de Meix-devant-Virton a les caractéristiques suivantes :

**Type d'installation** : fixe ;

**Pente** : 35° ;

**Azimut** : 38° vers l'ouest ;

**Technologie** : silicium cristallin ;

**Puissance** : 6 kW<sub>c</sub> pour les panneaux, 4,6 kW pour l'onduleur.

La batterie installée se caractérise comme suit :

**Technologie** : sodium-ion ;

**Puissance** : 2,4 kW pour la batterie et pour le convertisseur de puissance bidirectionnel ;

**Énergie** : 10,8 kWh ;  
**Masse des cellules** : 560 kg ;  
**Volume** : 0,383 m<sup>3</sup> ;  
**Énergie spécifique massique** : 19,3 Wh/kg ;  
**Énergie spécifique volumique** : 28,2 Wh/L ;  
**Rendement électrochimique annoncé** : 88,5%.

Le contrôleur de puissance sur l'eau chaude sanitaire est configuré comme suit :

**Capacité** : 160 L ;  
**Puissance** : 3 kW ;  
**Température minimum** : 5 °C ;  
**Température maximum** : 75 °C pour le contrôleur, 60 °C pour le thermostat mécanique ;  
**Production en aval** : assurée par la chaudière combinée au mazout.

Deux prises intelligentes alimentent un lave-linge et un lave-vaisselle.

## 2.2. Installation de Florenville

L'installation photovoltaïque de Florenville a les caractéristiques suivantes :

**Type d'installation** : fixe ;  
**Pente** : 10° ;  
**Azimut** : 15° vers l'ouest ;  
**Technologie** : silicium cristallin ;  
**Puissance** : 5,5 kWc pour les panneaux, 4,5 kW pour l'onduleur.

La batterie installée se caractérise comme suit :

**Technologie** : lithium-ion ;  
**Puissance** : 9 kW pour la batterie, 2,4 kW pour le convertisseur de puissance bidirectionnel ;  
**Énergie** : 10,5 kWh ;  
**Masse des cellules** : 149 kg ;  
**Volume** : 0,2 m<sup>3</sup> ;  
**Énergie spécifique massique** : 70,5 Wh/kg ;  
**Énergie spécifique volumique** : 52,6 Wh/L ;  
**Rendement électrochimique annoncé** : 95 %.

Le contrôleur de puissance sur l'eau chaude sanitaire est configuré comme suit :

**Capacité** : 300 L ;  
**Puissance** : 2 kW ;  
**Température minimum** : 50 °C ;  
**Température maximum** : 75 °C pour le contrôleur, 70 °C pour le thermostat mécanique ;  
**Production en aval** : aucune ;  
**Désinfection thermique** : enclenchée jusqu'à 65 °C ou pendant 3h si la température n'a pas atteint 65 °C dans les 30 dernières heures.

Une prise intelligente alimente un lave-vaisselle.

### 3. Instrumentation

Toutes les mesures sont relevées au moyen du système de gestion énergétique (EMS). Ce dernier effectue un enregistrement d'une valeur moyenne<sup>1</sup> toutes les 5 minutes, et il calcule également une série de résultats à partir de ses mesures. L'ensemble des valeurs affichées se classe en 3 catégories : compteurs d'énergie (counters), capteurs (sensors), régulation (regulation). La figure 1, le tableau 1, le tableau 2 et le tableau 3 donnent une description des facteurs utilisés dans cette analyse.

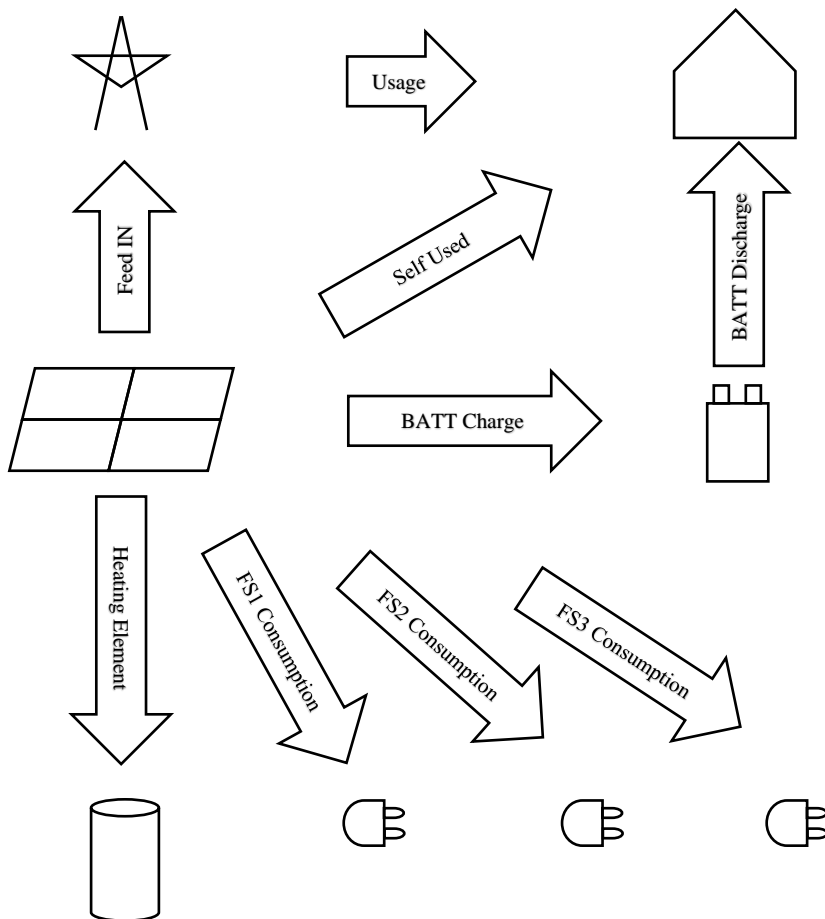


Figure 1 : Représentation schématique des indicateurs « compteur d'énergie »

<sup>1</sup> On peut donc avoir un prélèvement et une injection non nulles dans le même enregistrement, tout comme on peut avoir une charge et une décharge non nulles.

Nom assigné par l'EMS	Signification
Feed IN	Puissance injectée sur le réseau
Usage	Puissance prélevée sur le réseau
Heating Element	Puissance de la résistance du boiler <sup>2</sup>
BATT Charge	Puissance de chargement de la batterie
BATT Discharge	Puissance de déchargement de la batterie
FS1 Consumption	Puissance de la prise intelligente 1
FS2 Consumption	Puissance de la prise intelligente 2
PV Production	Puissance produite par l'onduleur photovoltaïque
Self-Used	Puissance autoconsommée par l'habitation
Total Consumption	Puissance de tous les consommateurs électriques <sup>3</sup>
House Electricity	Puissance consommée par les consommateurs de la maison <sup>4</sup>
FS3 Consumption	Puissance de la prise intelligente 3
PV DC Side	Puissance produite par les panneaux photovoltaïques

*Tableau 1 : Description des indicateurs de type « compteur d'énergie »*

Nom assigné par l'EMS	Signification
Boiler temperature	Température du ballon d'eau chaude
BATT SoC	Charge de la batterie
BATT V	Voltage de la batterie
Max Store	Puissance maximale pour la charge
Max Discharge	Puissance maximale pour la décharge
BATT A	Ampérage de la batterie
Power Frequency	Fréquence du réseau

*Tableau 2 : Description des indicateurs de type « capteur »*

<sup>2</sup> fonctionnement en PV heater ou non

<sup>3</sup> tout sauf la batterie

<sup>4</sup> y compris les prises intelligentes

Nom assigné par l'EMS	Signification
Heating Element Heater	Pourcentage de disponibilité du PV heater
FS1 Regulation	Pourcentage de sollicitation du PV heater
FS2 Regulation	Pourcentage d'activation de la prise intelligente 1
BATT Power	Pourcentage d'activation de la prise intelligente 2
Grid Power	Puissance de chargement (+) ou de déchargement (-) de la batterie
Heating element Enabled	Puissance de prélèvement (+) ou de réinjection (-) envers le réseau
FS Enabled	État d'activation du PV heater
FS1 FS2 + FS3 + FS1 Switching State	État d'activation des prises intelligentes
FS2 Switching State	Puissance des trois prises intelligentes
Water Max Temp	Température maximum du boiler
Water Max - 3	Température maximum du boiler, diminuée de 3 °C
FS3 Regulation	Pourcentage d'activation de la prise intelligente 3
FS3 Switching State	
Heating Element Minimum Temp	Pourcentage d'activation de la résistance pour maintenir la température minimum
Heater Hand or Minimum	Pourcentage d'activation de la résistance due à une action manuelle ou au maintien de la température minimum
Legionellenregelung	Pourcentage d'activation du cycle anti-légionelle

*Tableau 3 : Description des indicateurs de type « régulation »*

## 4. Paramètres et méthodes d'analyse

Deux périodes sont analysées : du 01/07/2019 au 30/06/2020, et du 01/7/2020 au 30/06/2021.

Pour obtenir l'énergie annuelle, on réalise une intégration numérique : les puissances relevées sont multipliées par le pas de temps qui précède le relevé précédent, et puis sommées sur l'année pour obtenir le comportement sur une période d'un an. Cela permet de tenir compte de relevés manquant quand l'EMS dysfonctionne (ce qui est respectivement arrivé 0,54% et 1,58% du temps à Meix-devant-Virton et à Florenville sur la première période, et respectivement 0,25% et 0,61% sur la deuxième période).

### 4.1. Taux d'injection annuel

Le taux d'injection annuel est défini comme le rapport entre l'énergie injectée annuellement sur le réseau et l'énergie totale produite annuellement par l'installation photovoltaïque. Il est calculé comme suit : l'indicateur « Self-Used » (voir tableau 1) est intégré numériquement sur l'année et divisé par le résultat de l'intégration numérique de l'indicateur « PV Production » (voir tableau 1). Le résultat est le taux d'autoconsommation annuel de l'électricité produite, et le complémentaire (par rapport à 100%) est le taux d'injection annuel.

$$\text{Taux d'injection annuel} = 1 - \frac{\text{SelfUsed}}{\text{PV Production}} \quad (1)$$

Cette démarche d'intégration numérique est également appliquée sur l'indicateur « Usage » (voir tableau 1) pour obtenir les prélèvements sur le réseau, l'indicateur « House Electricity » (voir tableau 1) pour obtenir la consommation électrique des occupants, et sur l'indicateur « Feed IN » (voir tableau 1) pour obtenir l'injection sur le réseau.

Pour quantifier les contributions de chacun des dispositifs à la diminution de l'injection d'électricité sur le réseau, il convient de faire la différence entre ce qui s'est passé et ce qui se serait passé en cas d'absence de ces dispositifs : il faut donc recréer un scénario alternatif à partir des mesures. Les cas de Meix-devant-Virton et de Florenville se traitent différemment pour obtenir l'autoconsommation sans système via une simulation.

#### *Cas de Meix-devant-Virton*

- L'énergie stockée par la batterie (indicateur « BATT Charge » voir tableau 1) aurait été injectée sur le réseau. Sa contribution s'obtient donc en intégrant numériquement cette valeur. Une correction doit lui être appliquée : du 08/01/2020 au 27/01/2020 et du 17/01/2021 au 24/01/2021, une erreur de programmation de l'EMS dans une mise à jour a induit la charge de la batterie en pleine nuit ; la charge de la batterie sans production photovoltaïque



est donc déduite. Le ratio avec la production photovoltaïque donne sa contribution à la diminution du taux d'injection.

- L'énergie stockée par le contrôleur de puissance (indicateur « Heating Element », voir tableau 1) sous forme d'eau chaude sanitaire aurait été injectée sur le réseau. Sa contribution s'obtient donc en intégrant numériquement cette valeur ; la même correction que pour la batterie est appliquée. Le ratio avec la production photovoltaïque donne sa contribution à la diminution du taux d'injection.
- Les prises intelligentes contribuent à l'autoconsommation en déplaçant temporellement des charges à des moments de production ; il s'agit donc de comparer l'autoconsommation entre le profil réel où les charges sont déplacées, et un profil simulé où elles ne le sont pas.
  - Pour le profil réel, on utilise l'indicateur « House Electricity » (ce qui permet de ne pas prendre en compte la batterie ou le contrôleur de puissance, vu leur priorité plus faible), et on le compare avec l'indicateur « PV Production » (voir tableau 1) ; chaque fois que la production photovoltaïque est plus grande, la différence est calculée, puis intégrée numériquement.
  - Pour le profil simulé, on soustrait à l'indicateur « House Electricity » (voir tableau 1) les indicateurs « FS1 Consumption » (voir tableau 1) « FS2 Consumption » (voir tableau 1) et « FS3 Consumption » (voir tableau 1) ; en se basant sur les indicateurs « FS1 Switching State » (voir tableau 3), « FS2 Switching State » (voir tableau 3) et « FS3 Switching State » (voir tableau 3), on est en mesure de supprimer les interruptions temporelles introduites par les prises ; par addition, on est en mesure d'obtenir le profil de consommation qui tient compte de la suppression des interruptions temporelles, qui est comparé avec l'indicateur « PV Production », puis intégré comme expliqué pour le profil réel. En résumé, on compense le déphasage temporel apporté par l'EMS, et on en déduit ce qui se serait passé sans ce décalage dans le temps.
  - La différence entre les deux autoconsommations montre l'apport des prises intelligentes.
- Le calcul de l'autoconsommation sans aucun dispositif pourrait se faire de deux manières :
  - Soit on part du taux d'autoconsommation calculé au départ, et on soustrait les contributions de la batterie, du contrôleur de puissance et des prises intelligentes.
  - Soit on utilise le résultat obtenu pour les prises intelligentes au point précédent.

Cependant, cette deuxième méthode ne peut estimer correctement ce qui se passe à une échelle de temps inférieure à 5 minutes ; c'est particulièrement

problématique pour les enregistrements présentant des injections et des prélèvements sur le réseau dans le même intervalle de 5 minutes, ce qui peut arriver 20% du temps. C'est pourquoi seule la première méthode est pertinente.

### ***Cas de Florenville***

- L'énergie stockée par la batterie (indicateur « BATT Charge », voir tableau 1) aurait été injectée sur le réseau. Sa contribution s'obtient donc en intégrant numériquement cette valeur. Une correction doit lui être appliquée : de la mise en service jusqu'au 05/03/2020, une erreur de programmation de l'EMS dans une mise à jour a induit la charge de la batterie en pleine nuit lorsque la résistance du ballon était sollicitée ; la charge de la batterie sans production photovoltaïque pendant cette période est donc déduite. Mis à part ce dysfonctionnement, il arrive aussi régulièrement que la batterie se charge sans production photovoltaïque associée, pendant quelques minutes : ce cas s'explique par la consommation du BMS pour gérer un niveau très bas de la batterie (moins de 20%), le plus souvent en période hivernale. Cette énergie fait partie intégrante du fonctionnement de la batterie, et donc aucune correction n'est appliquée à son égard. Le ratio de l'énergie stockée avec la production photovoltaïque donne sa contribution à la diminution du taux d'injection. Concernant la décharge, une certaine partie de l'énergie est déstockée pour chauffer de l'eau chaude sanitaire, ce qui représente un transvasement entre deux types de stockage : la quantité concernée peut être déduite de l'intégration du minimum entre l'électricité déstockée (indicateur « BATT Discharge », voir tableau 1) et la chaleur développée par la résistance (indicateur « Heating Element », voir tableau 1) quand ces deux éléments sont actifs simultanément.
- L'énergie stockée par le contrôleur de puissance ne représente qu'une partie de ce qui est mesuré par l'indicateur « Heating Element » (voir tableau 1), car ce dernier ne fait pas la différence quand son activation est due au contrôleur de puissance qui utilise de l'énergie d'origine photovoltaïque excédentaire, due au besoin de maintenir une température minimum dans le ballon ou due à la nécessité d'appliquer un cycle anti-légionelle. Ces deux contributions sont signalées par l'indicateur « Heater Hand or Minimum » (voir tableau 3), et la contribution du contrôleur de puissance s'obtient donc en intégrant numériquement la valeur de l'indicateur « Heating Element » (voir tableau 1) quand l'indicateur « Heater Hand or Minimum » (voir tableau 3) est nul. Le ratio avec la production photovoltaïque donne sa contribution à la diminution du taux d'injection.

Cette forme de stockage est entachée d'une perte constante qui n'est pas négligeable : l'isolation du ballon a été renforcée le 27/5/2021. Pour estimer la perte, les relevés de température du ballon (indicateur « Boiler tempera-

ture », voir tableau 2) et de la puissance de la résistance (« Heating Element », voir tableau 1) sont examinés pour les périodes sans prélèvement, sans intervention du contrôleur de puissance et sans cycle anti-légionelle, où des pics de puissances montent le ballon en température sur un intervalle de quelques minutes, avant de laisser les déperditions thermiques le refroidir lentement pendant quelques heures. L'énergie nécessaire pour passer de 50 °C à 54 °C est obtenue par intégration, et divisée par l'intervalle de temps entre deux recharges pour en déduire la puissance moyenne ; cette puissance moyenne multipliée par le nombre d'heures annuelles donne l'énergie perdue annuellement.

- Les prises intelligentes sont traitées exactement de la même manière que dans le cas de Meix-devant-Virton.
- Le calcul de l'autoconsommation sans aucun dispositif est traité exactement de la même manière que dans le cas de Meix-devant-Virton.

#### **4.2. Rendement charge-décharge des batteries**

Le rendement charge-décharge des batteries s'obtient comme le ratio entre l'énergie déstockée (calculé par l'intégration numérique de l'indicateur « BATT Discharge », voir tableau 1) et l'énergie stockée (calculé par l'intégration numérique de l'indicateur « BATT Charge », voir tableau 1). Ce ratio comprend le rendement de conversion électrochimique, celui du convertisseur de puissance bidirectionnel et la consommation de l'électronique associée à la batterie (BMS, quelques dizaines de W).

#### **4.3. Capacité de décharge et de charge sur un cycle**

Les cycles réellement appliqués à la batterie ne sont jamais une décharge totale suivie d'une charge totale. Les cycles qui sont étudiés sont donc définis ici comme les cycles commençant et terminant à 100% de charge (indicateur « BATT SoC », voir tableau 2). Il faut savoir que cet indicateur est calculé à partir de la tension de la batterie (indicateur « BATT V », voir tableau 2), et est réinitialisé à 100% lorsque la charge est complète : c'est une méthode très basique pour estimer l'état de charge (State Of Charge, SOC) de la batterie, car elle ne tient pas compte de la tension coupure ou du problème de relaxation ; des méthodes plus poussées ont été développées [2]. On peut donc rechercher le minimum de la tension pendant chaque cycle, et quantifier via une intégration numérique la différence entre la décharge et la charge qui ont eu lieu avant, et la différence entre la charge et la décharge qui ont eu lieu après. Comme ce minimum de tension peut apparaître plusieurs fois, on calcule ces valeurs pour le premier minimum et le dernier minimum, et on conserve les deux valeurs pour la charge et pour la décharge. Ces valeurs peuvent être représentées sur un graphique en fonction des pourcentages de décharge, ce qui montre une tendance linéaire (voir figure 3, figure 5, figure 7 et figure 9) ; la valeur maximale de cette

tendance indique l'ordre de grandeur de la charge et de la décharge possible sur un cycle.

Les cycles qui sont ainsi étudiés ne sont donc quasi jamais des cycles complets, et ils ne peuvent donc pas être comparés aux nombres de cycles donnés par le constructeur. On peut les quantifier de deux manières :

- on divise la quantité d'énergie stockée par la capacité de stockage, ce qui donne un nombre équivalent de cycles complets (qui sera aussi un minimum) ; c'est une très grosse approximation, puisque le vieillissement dû à un cycle complet n'est pas comparable au vieillissement de deux demi-cycles par exemple, mais elle permet d'avoir une idée.
- dans la démarche utilisée pour déterminer la capacité de charge, on peut compter le nombre de cycles qui sont utilisés, ce qui donne un nombre maximum de cycles (par définition incomplets).

#### 4.4. Puissance maximale de sortie

La puissance maximale de la batterie en charge, de la batterie en décharge et du contrôleur de puissance est obtenue en cherchant la valeur maximale des indicateurs « BATT Charge », « BATT Discharge » et « Heating Element » (voir tableau 1).

	Meix-devant-Virton		Florenville	
	Période 1	Période 2	Période 1	Période 2
Autoconsommation	4 641 kWh	4 785 kWh	3 031 kWh	3 422 kWh
Production photovoltaïque	6 513 kWh	6 207 kWh	4 049 kWh	4 065 kWh
Injection	1 885 kWh	1 435 kWh	1 032 kWh	653 kWh
Prélèvement	1 952 kWh	1 890 kWh	4 259 kWh	4 501 kWh
Consommation domestique	4 041 kWh	4 333 kWh	6 648 kWh	7 316 kWh
Énergie stockée par la batterie	1 716 kWh	1 789 kWh	1 991 kWh	1 659 kWh
Énergie déstockée par la batterie	1 109 kWh	1 096 kWh	1 404 kWh	1 146 kWh
Énergie stockée par le contrôleur de puissance	1 620 kWh	1 545 kWh	539 kWh	464 kWh
Énergie déplacée par les prises intelligentes	2 kWh	7 kWh	4 kWh	23 kWh

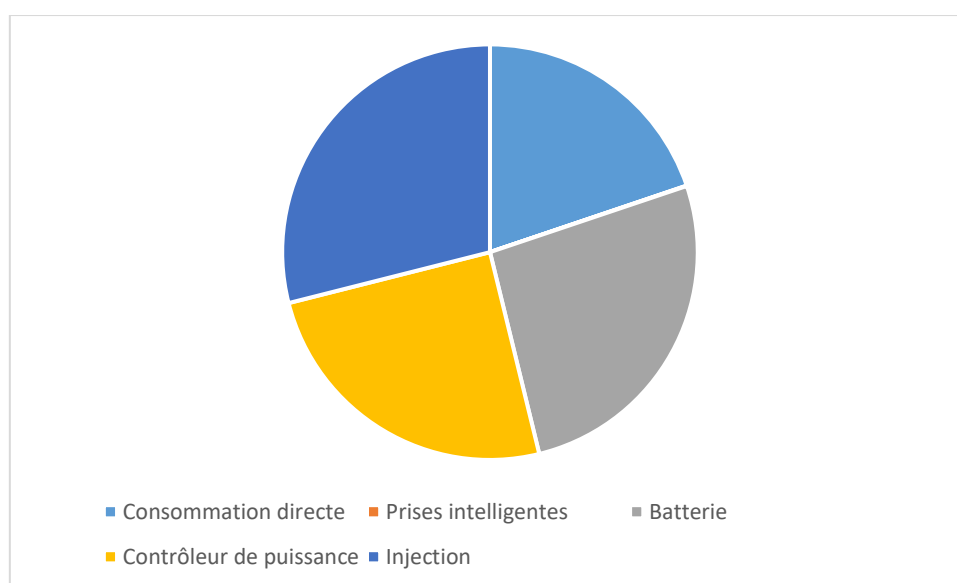
Tableau 4: Principaux résultats

## 5. Résultats techniques

Les principaux résultats sont repris dans le tableau 4 et détaillés par la suite

### 5.1. Installation de Meix-devant-Virton

#### *Résultats de la première période*



*Figure 2 : Répartition de la production photovoltaïque entre les différents usages pour la première période à Meix-devant-Virton*

Pour la première période, l'autoconsommation s'élève à 4 641 kWh, à comparer aux 6 513 kWh produits par l'installation photovoltaïque, soit 71% (taux d'injection de 29%, injection de 1 885 kWh). Les prélèvements sur le réseau s'élèvent à 1 952 kWh et la consommation électrique des occupants (sans batterie ni contrôleur de puissance) s'élève à 4 041 kWh. La répartition de l'autoconsommation solaire se fait de la manière la suivante (voir figure 2) :

- La contribution de la batterie s'élève à 1 716 kWh, soit 26% ; elle délivre en contrepartie 1 109 kWh, soit un rendement charge-décharge de 65% ; les puissances maximales en charge et en décharge s'élèvent à 2 kW ; les énergies en charge et en décharge sont représentées à la figure 3, convergeant vers une capacité de 10,3 kWh en charge et 6,1 kWh en décharge. Le nombre de cycles réalisés est de 273, et le nombre équivalent de cycles complets est de 171.
- Celle du contrôleur de puissance s'élève à 1 620 kWh, soit 25% ; la puissance maximale s'élève à 3,2 kW.

- La contribution des prises intelligentes s'élève à 2 kWh, soit 0,024%.
- L'autoconsommation sans aucun système s'élève à 1 304 kWh, soit 20% (taux d'injection de 80%).

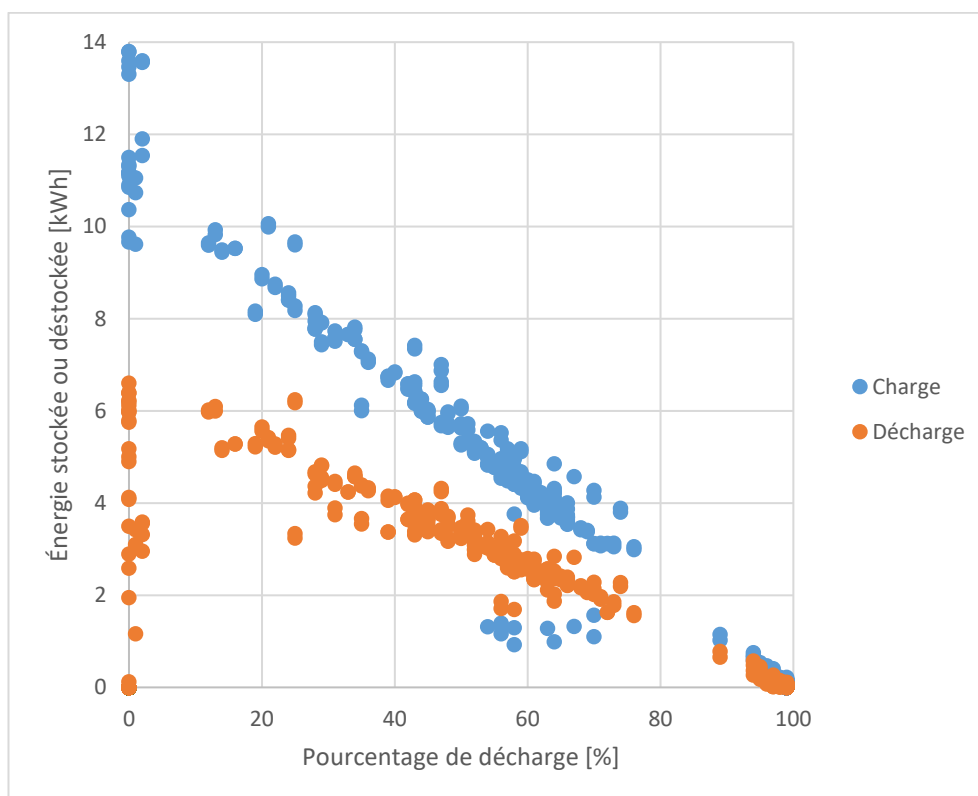
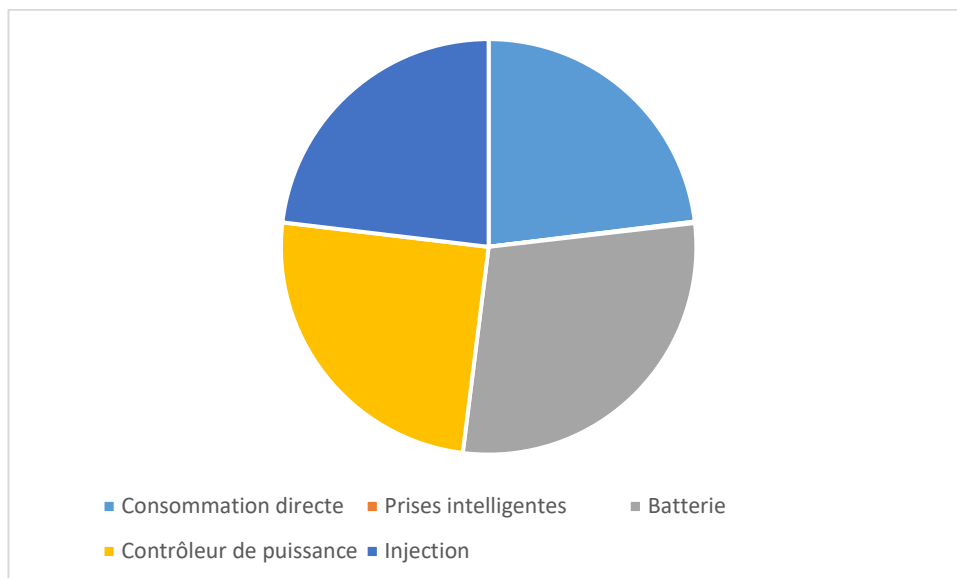


Figure 3 : Énergie stockée et déstockée en fonction du pourcentage de décharge minimum atteint par la batterie pour la première période à Meix-devant-Virton

### Résultats de la seconde période

Pour la seconde période, l'autoconsommation s'élève à 4 785 kWh, à comparer aux 6 207 kWh produits par l'installation photovoltaïque, soit 77% (taux d'injection de 23%, injection de 1 435 kWh). Les prélèvements sur le réseau s'élèvent à 1 890 kWh et la consommation électrique des occupants (sans batterie ni contrôleur de puissance) s'élève à 4 333 kWh.



*Figure 4 : Répartition de la production photovoltaïque entre les différents usages pour la seconde période à Meix-devant-Virton*

La répartition de l'autoconsommation solaire se fait de la manière la suivante (voir figure 4) :

- La contribution de la batterie s'élève à 1 789 kWh, soit 29% ; elle délivre en contrepartie 1 096 kWh, soit un rendement charge-décharge de 61% ; les puissances maximales en charge et en décharge s'élèvent à 2 kW ; les énergies en charge et en décharge sont représentées à la figure 5, convergeant vers une capacité de 11 kWh en charge et 6,1 kWh en décharge. Le nombre de cycles réalisés est de 304, et le nombre équivalent de cycles complets est de 179.
- Celle du contrôleur de puissance s'élève à 1 545 kWh, soit 25% ; la puissance maximale s'élève à 3,2 kW.
- La contribution des prises intelligentes s'élève à 7 kWh, soit 0,11%.
- L'autoconsommation sans aucun système s'élève à 1 445 kWh, soit 23% (taux d'injection de 77%).

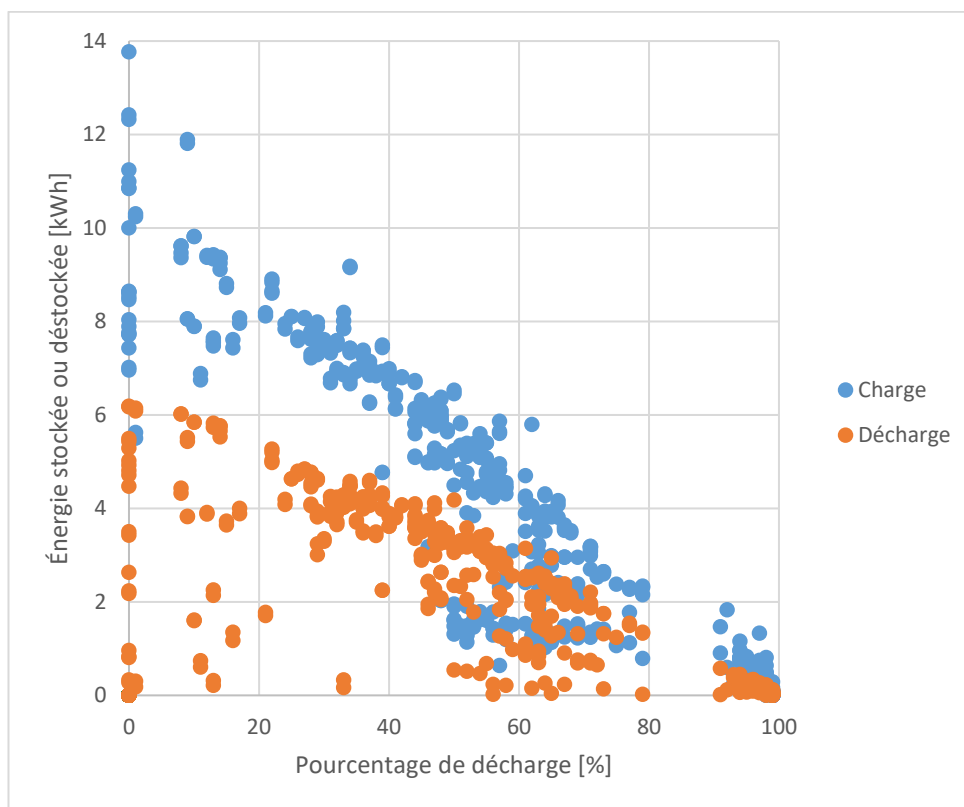


Figure 5 : Énergie stockée et déstockée en fonction du pourcentage de décharge minimum atteint par la batterie pour la seconde période à Meix-devant-Virton

### Comparaison des périodes

On constate que les deux périodes étudiées sont relativement similaires. Voici des éléments explicatifs en mesure d'expliquer certaines différences observables :

- La production photovoltaïque fut 5% plus élevée sur la première période que sur la seconde : cela est cohérent avec la productivité de la filière reportée au niveau de la Belgique, qui pointe une différence de 8% entre les mêmes périodes [3].
- Les prélèvements plus élevés sur la première période s'expliquent par les dysfonctionnements (au niveau de l'EMS) plus élevés sur cette période (222 kWh plutôt que 28 kWh).
- La consommation électrique des occupants est plus élevée sur la seconde période, ce qui peut notamment s'expliquer par la présence d'un des adultes en télétravail sur la période de mars 2020 à juin 2021.



- La capacité de charge de la batterie pour un cycle complet (10,3 kWh et 11 kWh pour les deux périodes) correspond peu ou prou à ce qui est annoncé par le fabricant (10,8 kWh).
- La dégradation du rendement charge-décharge de la batterie pourrait être attribué au vieillissement de celle-ci, mais une étude sur une période plus longue est nécessaire pour le confirmer.
- La consommation du contrôleur de puissance plus faible sur la deuxième période s'explique pour une faible proportion par la désactivation de la sonde de température entre le 05/10/2020 et le 22/10/2020 ; cette désactivation a induit l'injection de 26 kWh sur le réseau, quantité qui aurait été consommée par le contrôleur de puissance s'il avait été activé pendant cette période.
- La très faible contribution des prises intelligentes sur la première période s'explique par la première activation le 20/05/2020 ; il faut également noter que le système a été activé la dernière fois le 30/11/2020.
- L'autoconsommation sans système (simulée) est plus élevée sur la seconde période, ce qui peut notamment s'expliquer par la présence d'un des adultes en télétravail (autoconsommation en journée favorisée).

### ***Conclusion des résultats***

Les conclusions sur les systèmes de stockage sont les suivantes :

- Le taux d'autoconsommation sans système (simulée) est très faible (bien inférieur au pourcentage de 37,76% pris comme référence moyenne), car la puissance photovoltaïque installée est élevée (du fait du grand besoin annuel d'énergie).
- Les deux systèmes (batterie et contrôleur de puissance) sont nécessaires pour dépasser un taux de 60%.
- Le rendement d'une batterie est bien moins élevé que le rendement électrochimique annoncé ; en effet, le rendement global tient compte également du rendement du convertisseur de puissance bidirectionnel et d'une auto-décharge. L'ordre de grandeur obtenu en utilisant une année globalement ou en la décomposant en cycle est cohérent dans pour les deux méthodes, et tourne autour de 60%. Si les modifications de performance sont à attribuer au vieillissement (ce qu'une étude sur une plus longue durée serait en mesure de déterminer), alors il semble que celui-ci se traduirait par plus d'énergie stockée pour la même énergie déstockée.
- Avant l'installation de la batterie et du contrôleur de puissance, l'installation photovoltaïque produisait de l'énergie excédentaire sur base annuelle. À présent, le rendement de la batterie et la consommation du contrôleur de puissance induisent une consommation électrique supplémentaire sur base annuelle (66 kWh sur la première période, 455 kWh sur la seconde). Économiquement, il n'est pas pertinent de prélever plus sur le réseau pour auto-

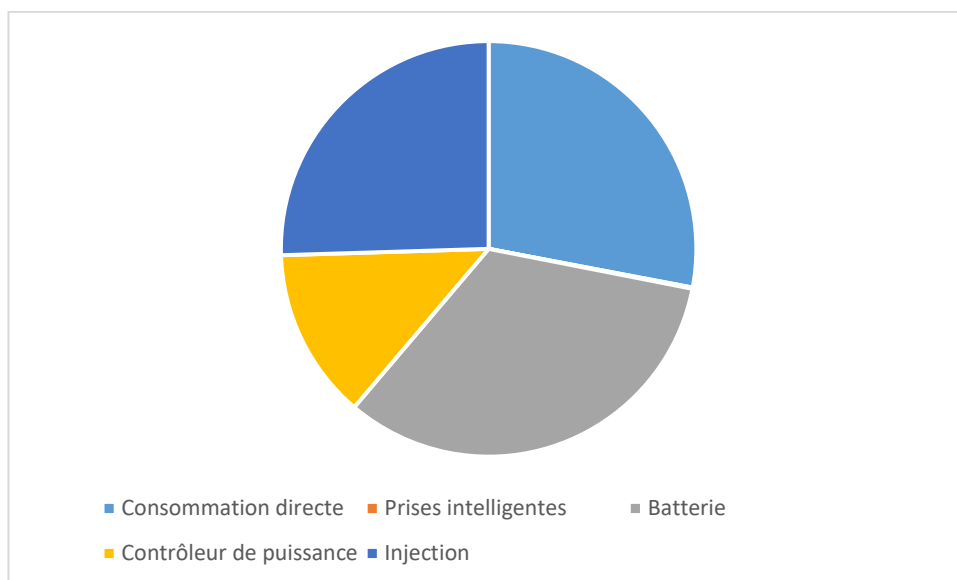
consommer plus avec le tarif prosumer proportionnel : le coût le plus évitable est celui du contrôleur de puissance, et il serait donc pertinent de limiter celui-ci. Il faut cependant noter que ce contrôleur de puissance induit une diminution de la consommation de mazout (de l'ordre de 150 L) par son préchauffage, ce qui compense partiellement le coût du prélèvement qui augmente. En comparaison, la batterie a un certain rendement global qui augmente qui augmente la consommation sans apporter un avantage autre que la diminution des injections. On peut en déduire qu'un trop haut taux d'autoconsommation induit des prélèvements à d'autres moments et une augmentation de la consommation électrique si l'eau chaude sanitaire est assurée au départ par un autre moyen.

- Les prises intelligentes ont une contribution anecdotique pour plusieurs raisons :
  - de base, les énergies que sont susceptibles d'être déplacées sont assez faibles (quelques centaines de kWh) ;
  - les habitants utilisent souvent les appareils électroménagers en journée, ce qui active rarement le système ;
  - la programmation simple du système qui ne permet de garantir un cycle dans un certain délai induit une frustration quand l'attente du démarrage du cycle se prolonge. Ainsi, leur mode automatique est désactivé sur de longues périodes par l'utilisateur pour passer en mode manuel.

## **5.2. Installation de Florenville**

### ***Résultats de la première période***

Pour la première période, l'autoconsommation s'élève à 3 031 kWh, à comparer aux 4 049 kWh produits par l'installation photovoltaïque, soit 75% (taux d'injection de 26%, injection de 1 032 kWh). Les prélèvements sur le réseau s'élèvent à 4 259 kWh et la consommation électrique des occupants (sans batterie, mais eau chaude sanitaire comprise) s'élève à 6 648 kWh.



*Figure 6 : Répartition de la production photovoltaïque entre les différents usages pour la première période à Florenville*

La répartition de l'autoconsommation solaire se fait de la manière la suivante (voir figure 6) :

- La contribution de la batterie s'élève à 1 341 kWh<sup>5</sup>, soit 33% ; elle délivre en contrepartie 1 404 kWh, soit un rendement charge-décharge de 71% ; 361 kWh sont déchargés pour chauffer de l'eau chaude sanitaire ; les puissances maximales en charge et en décharge s'élèvent à 2,1 kW ; les énergies en charge et en décharge sont représentées à la figure 7, convergeant vers une capacité de 11 kWh en charge et 8 kWh en décharge<sup>6</sup>. Le nombre de cycles réalisés est de 287, et le nombre équivalent de cycles complets est de 190.
- Celle du contrôleur de puissance s'élève à 539 kWh, soit 13% ; la puissance maximale s'élève à 2,2 kW. Les déperditions thermiques du ballon d'eau chaude sont évaluées entre 930 kWh à 1 390 kWh, à mettre en regard avec les 1 968 kWh utilisés sur la période pour fournir l'eau chaude sanitaire.
- La contribution des prises intelligentes s'élève à 4 kWh, soit 0,092%.
- L'autoconsommation sans aucun système s'élève à 1 148 kWh, soit 28% (taux d'injection de 72%).

<sup>5</sup> Le dysfonctionnement a induit en réalité une charge totale de 1 991 kWh.

<sup>6</sup> Cette estimation est réalisée en tenant compte que la batterie ne descend jamais en dessous de 15 % de capacité.

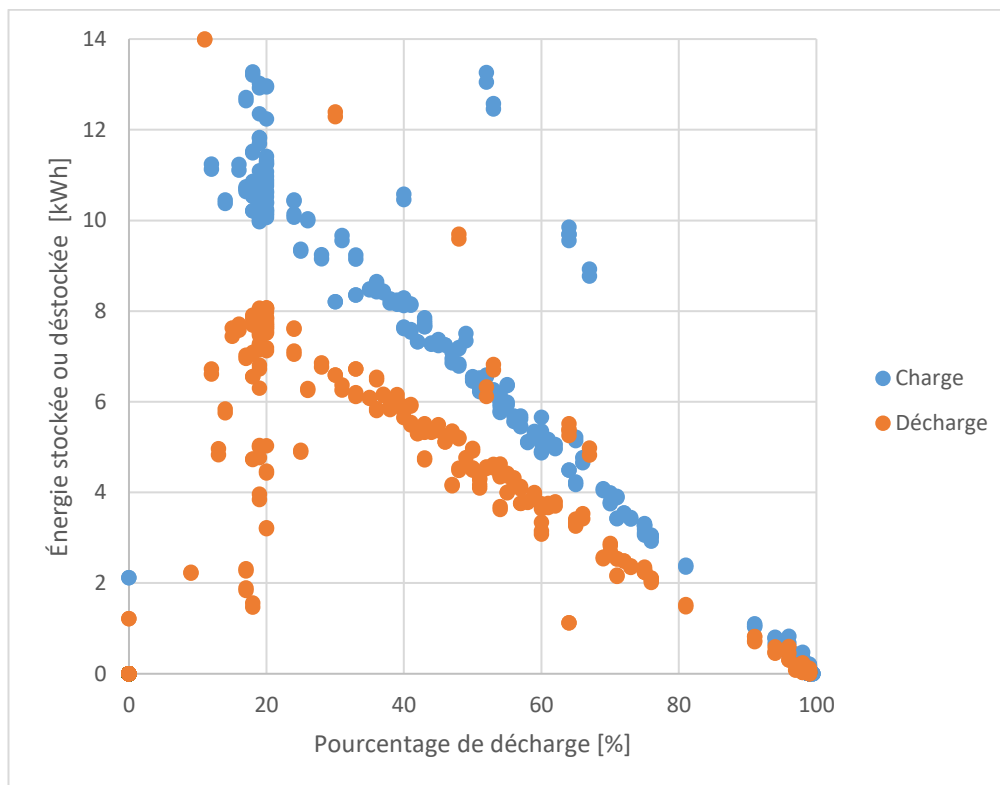
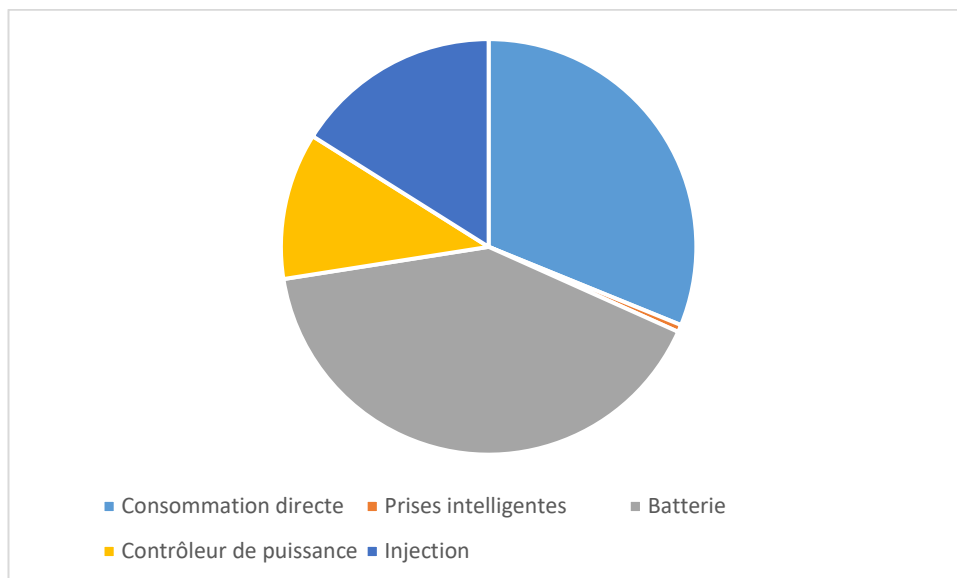


Figure 7 : Énergie stockée et déstockée en fonction en fonction du pourcentage de décharge minimum atteint par la batterie pour la première période à Florenville

### **Résultats de la seconde période**

Pour la seconde période, l'autoconsommation s'élève à 3 422 kWh, à comparer aux 4 065 kWh produits par l'installation photovoltaïque, soit 84% (taux d'injection de 16%, injection de 653 kWh). Les prélèvements sur le réseau s'élèvent à 4 501 kWh et la consommation électrique des occupants (sans batterie, mais eau chaude sanitaire comprise) s'élève à 7 316 kWh.



*Figure 8 : Répartition de la production photovoltaïque entre les différents usages pour la seconde période à Florenville*

La répartition de l'autoconsommation solaire se fait de la manière la suivante (voir figure 8) :

- La contribution de la batterie s'élève à 1 659 kWh, soit 41% ; elle délivre en contrepartie 1 146 kWh, soit un rendement charge-décharge de 69% ; 457 kWh sont déchargés pour chauffer de l'eau chaude sanitaire ; les puissances maximales en charge et en décharge s'élèvent à 2,1 kW ; les énergies en charge et en décharge sont représentées à la figure 9, convergeant vers une capacité de 11 kWh en charge et 8 kWh en décharge<sup>7</sup>. Le nombre de cycles réalisés est de 248, et le nombre équivalent de cycles complets est de 158. La quantité d'énergie pour maintenir la batterie vide en fonctionnement (en période hivernale) s'élève à 20 kWh.
- Celle du contrôleur de puissance s'élève à 464 kWh, soit 11% ; la puissance maximale s'élève à 2,2 kW. Les déperditions thermiques du ballon d'eau chaude sont évaluées de 930 kWh à 1 390 kWh jusqu'au 27/05/2021, et ensuite de 658 kWh à 822 kWh, à mettre en regard avec les 2 450 kWh utilisés sur la période pour fournir l'eau chaude sanitaire.
- La contribution des prises intelligentes s'élève à 23 kWh, soit 0,56%.
- L'autoconsommation sans aucun système s'élève à 1 276 kWh, soit 31% (taux d'injection de 69%).

<sup>7</sup> Cette estimation est réalisée en tenant compte que la batterie ne descend que rarement en dessous de 18 % de capacité.

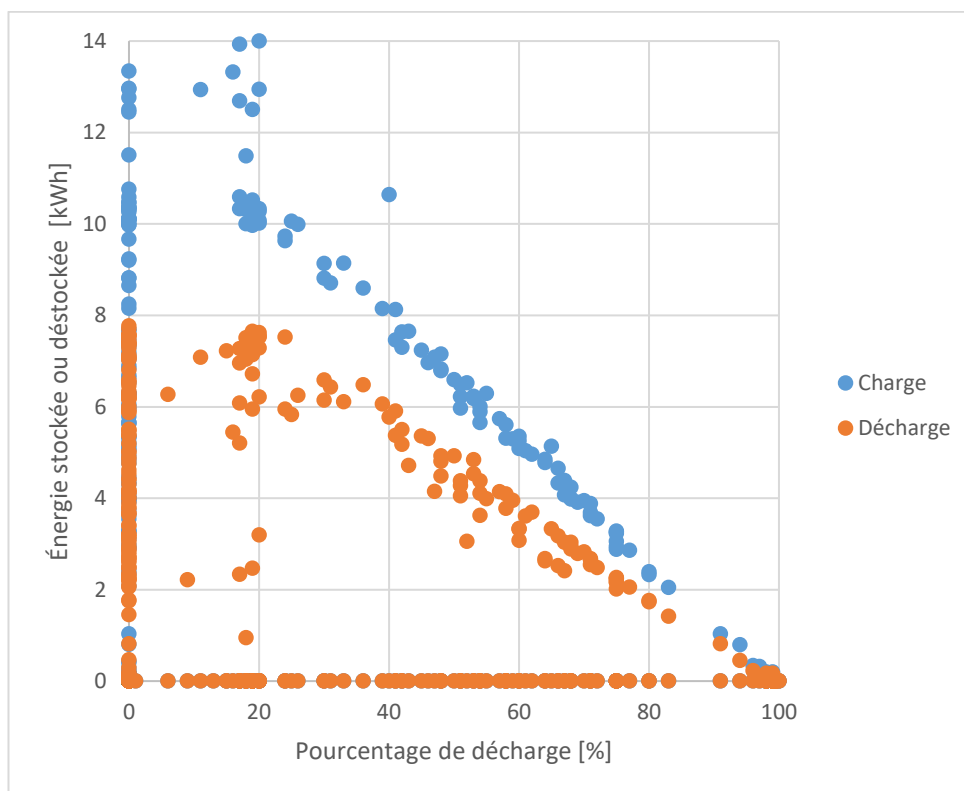


Figure 9 : Énergie stockée et déstockée en fonction du pourcentage de décharge minimum atteint par la batterie pour la seconde période à Florenville

### Comparaison des périodes

Le dysfonctionnement du chargement de la batterie est le principal point de différence entre les deux années. Voici différents éléments explicatifs :

- La production photovoltaïque est quasiment identique pour les deux périodes : un nettoyage en fin de première période (mai 2020) a probablement compensé la baisse d'ensoleillement sur la deuxième période.
- Les prélèvements augmentent légèrement entre la première et la deuxième période, guidés en cela par l'augmentation générale de la consommation entre les deux périodes (détaillée ci-après).
- Malgré le dysfonctionnement sur la première période, la consommation augmente de la première à la deuxième période : l'arrivée d'un jacuzzi (octobre 2019), d'un deuxième occupant permanent (janvier 2020), mais surtout d'un congélateur (juillet 2020) et un besoin de chauffage électrique (avril 2021) pour compenser une panne de chaudière ont probablement participé à cette évolution.

- L'arrêt du dysfonctionnement de l'EMS à propos de la charge de la batterie amène celle-ci à prendre en charge une partie plus importante de la production photovoltaïque.
- La capacité de la batterie est légèrement supérieure à la performance annoncée par le fabricant. Il n'y a pas de différence significative entre les deux périodes.
- La contribution plus faible du contrôleur de puissance sur la seconde période peut s'expliquer par l'activation du module anti-légionelle à partir du 26/06/2020, ce qui amène à ne plus pouvoir stocker d'eau chaude si un cycle a déjà réalisé la montée en température.
- La très faible contribution des prises intelligentes sur la première période s'explique par la première activation le 20/05/2020.
- L'autoconsommation sans système (simulée) est plus élevée sur la seconde période, ce qui peut notamment s'expliquer par la consommation plus élevée.

### ***Conclusion des résultats***

Les conclusions sur les systèmes de stockage sont les suivantes :

- Le taux d'autoconsommation sans système (simulée) est très faible (inférieur au pourcentage de 37,76% pris comme référence moyenne [1]), malgré une puissance photovoltaïque installée réduite, dont la production est loin de couvrir toute la consommation
- La batterie est suffisante pour dépasser un taux de 60% ; la contribution du contrôleur de puissance est assez réduite, notamment car la différence de température entre celle maintenue en permanence (58 °C) et celle atteignable réellement (65 °C, malgré un réglage à 75 °C) est faible. D'ailleurs, le fait que 40% de l'électricité stockée dans la batterie sert à chauffer le ballon pendant les heures sans production photovoltaïque pose question : compte tenu du rendement charge-décharge, inverser ces priorités aurait permis d'éviter jusqu'à 105 kWh de pertes via la transformation à la première période, et 144 kWh pour la seconde période. Dans le cas de Florenville, cela se traduit par un prélèvement accru d'électricité sur le réseau, et donc une facture plus importante. À noter que l'isolation du ballon amène à moins solliciter la batterie pour combattre les déperditions thermiques, et cela diminue donc cet effet.
- L'installation photovoltaïque ne parvient pas à couvrir la consommation du bénéficiaire : on observe des prélèvements nets de 3 227 kWh et de 3 849 kWh, respectivement pour la première et la seconde période. Lors de la sélection du candidat en 2018, il existait déjà un prélèvement net de 1 009 kWh, mais force est de constater que la modification de la composition du foyer et de ses équipements a grandement accru cette différence. Au niveau du système de stockage, le différentiel entre le stockage et le déstockage de

la batterie a induit une surconsommation de 507 kWh et de 529 kWh, respectivement pour la première et la seconde période ; ce qui pourrait être imputé au contrôleur de puissance est anecdotique, sachant que les augmentations de température sont somme toute limitées en temps et en amplitude par rapport aux pertes constantes.

- Tout comme pour le cas de Meix-devant-Virton, le rendement d'une batterie est bien moins élevé que le rendement électrochimique annoncé ; en effet, le rendement global tient compte également du rendement du convertisseur de puissance bidirectionnel et d'une auto-décharge. L'ordre de grandeur obtenu en utilisant une année globalement ou en la décomposant en cycle est cohérent dans pour les deux méthodes, et tourne autour de 70%. Il n'y a pas de différence significative entre les deux années.
- La meilleure isolation du ballon d'eau chaude sanitaire amène à économiser de l'ordre de 420 kWh annuellement, ce qui sollicite moins la batterie et diminue les prélèvements nets d'électricité.
- L'utilisation d'une batterie sur une installation produisant moins que la consommation pose question : le rendement de la batterie induit d'augmenter cette consommation (et donc les coûts d'achat d'électricité) pour finalement augmenter l'autoconsommation et diminuer le tarif prosumer, réduisant d'autant les gains financiers que peut apporter le tarif prosumer proportionnel (comparé au capacitair). Du point de vue du réseau, cependant, cela ne pose pas de problème : les injections en période de production sont diminuées de manière substantielle.
- La prise intelligente utilisée a une contribution anecdotique pour plusieurs raisons :
  - de base, les énergies que sont susceptibles d'être déplacées sont assez faibles (quelques centaines de kWh) ;
  - le ménage utilise assez peu son lave-vaisselle.

## 6. Rentabilité de l'investissement

Le coût d'achat de l'installation de Meix-devant-Virton s'élève à 18 539 €, TVA de 21% comprise, tandis que celui de Florenville s'élève à 14 378 €, TVA de 21% comprise (un taux de **TVA de 6%** est applicable si le logement a au moins 10 ans).

Le tarif prosumer capacitair pour ORES Luxembourg est déterminé par rapport à la puissance nette développable et s'élève à [4] :

- 89,54 €/kWe en 2020 ;
- 90,29 €/kWe en 2021 ;
- 90,63 €/kWe en 2022 ;
- 91,63 €/kWe en 2023.



Il se situe donc entre 400 et 410 € pour les deux installations, suivant les années. Il est comparé dans la suite au montant du tarif proportionnel et aux conséquences financières des avantages ou des inconvénients des systèmes installés pour augmenter l'autoconsommation. Ce montant étant le potentiel maximum d'économie, on comprend déjà à ce stade qu'il sera impossible d'obtenir un temps de retour inférieur à plusieurs dizaines d'années.

Afin de bien comprendre la suite, il est nécessaire de définir les termes relatifs à l'utilisation d'un compteur double flux, qui sont donc définis sur une base annuelle. Lorsque le compteur tourne « à l'endroit », il comptabilise un prélèvement brut ; lorsqu'il tourne « à l'envers », il comptabilise une injection brute. La différence entre les deux est égale à la différence entre consommation et production :

$$\textit{Production} - \textit{Consommation} = \textit{Injection brute} - \textit{Prélèvement brut} \quad (2)$$

Toutes les valeurs données précédemment comme résultats à la section 5 étaient des résultats bruts. Deux cas sont à considérer : une production excédentaire ou déficitaire.

- En cas de production excédentaire, l'injection brute est supérieure au prélèvement brut, et la différence est donc l'injection nette :

$$\textit{Injection brute} - \textit{Prélèvement brut} = \textit{Injection nette} \quad (3)$$

À la figure 10, la consommation se répartit entre l'autoconsommation et le prélèvement brut. La production photovoltaïque peut se diviser entre la production suffisante pour couvrir la consommation (sur une base annuelle) et l'injection nette, mais également entre la part autoconsommée de la production et l'injection brute. Selon le principe du compteur qui tourne à l'envers, l'injection nette est donnée.

- En cas de production déficitaire, le prélèvement brut est supérieur à l'injection nette, et la différence est donc le prélèvement net :

$$\textit{Prélèvement brut} - \textit{Injection brute} = \textit{Prélèvement net} \quad (4)$$

À la figure 11, la production se répartit entre la part autoconsommée et l'injection brute. La consommation peut se diviser entre la consommation autoproduite et le prélèvement net, mais aussi entre l'autoconsommation et le prélèvement brut.

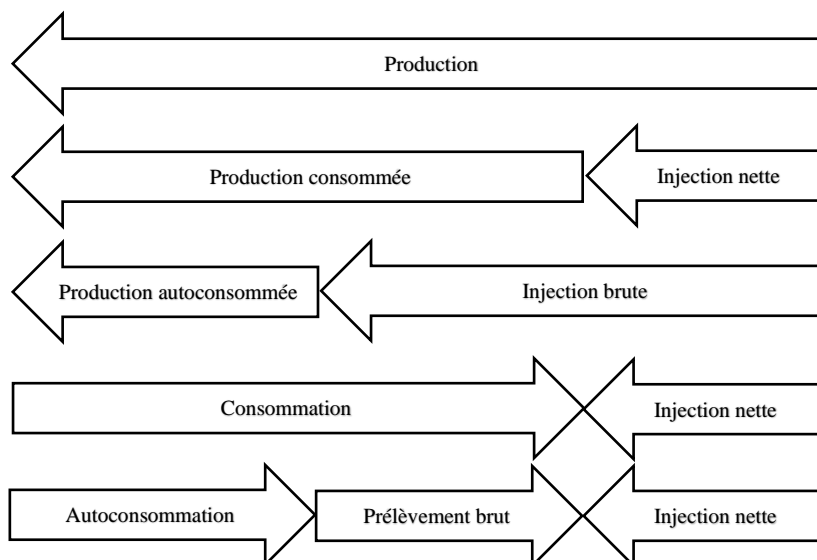


Figure 10 : Décomposition de la production et de la consommation dans le cas d'une installation équipée d'un compteur double flux avec une production excédentaire

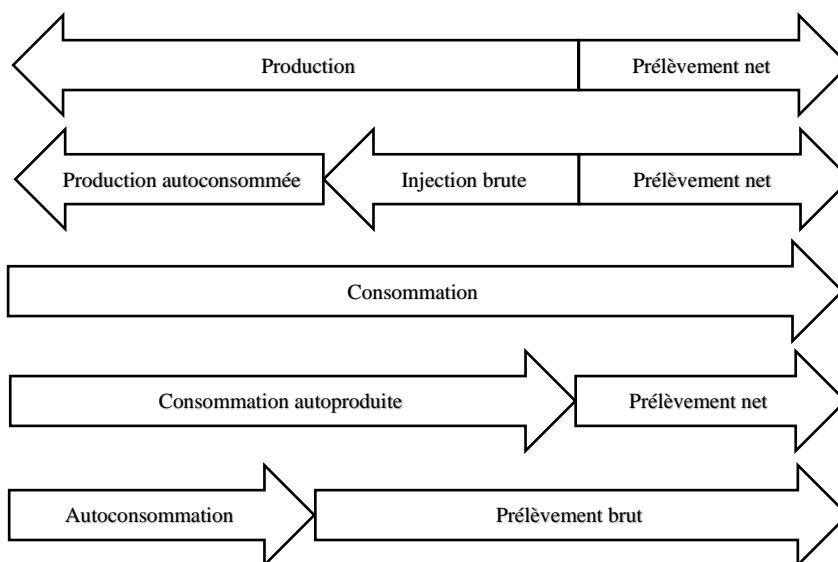


Figure 11 : Décomposition de la production et de la consommation dans le cas d'une installation équipée d'un compteur double flux avec une production déficitaire

## 6.1. Tarif proportionnel à Meix-devant-Virton

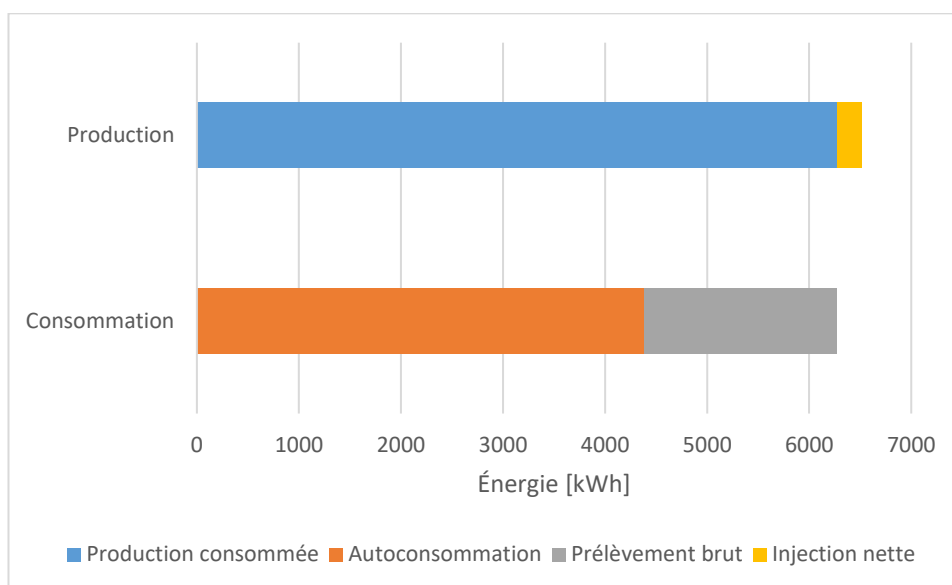


Figure 12 : Répartition de la consommation et de la production pour la première période à Meix-devant-Virton

Pour la première période à Meix-devant-Virton, la production excède la consommation (voir figure 12).

- Le tarif proportionnel s'applique au prélèvement brut et s'élève à 300 €.
- L'injection nette est donnée, et il n'y a aucun coût associé.
- Le contrôleur de puissance sur la production d'eau chaude sanitaire permet de diminuer la consommation de mazout, pour un montant équivalent à 120 €.

Le gain pour cette première période s'élève donc à 235 €.

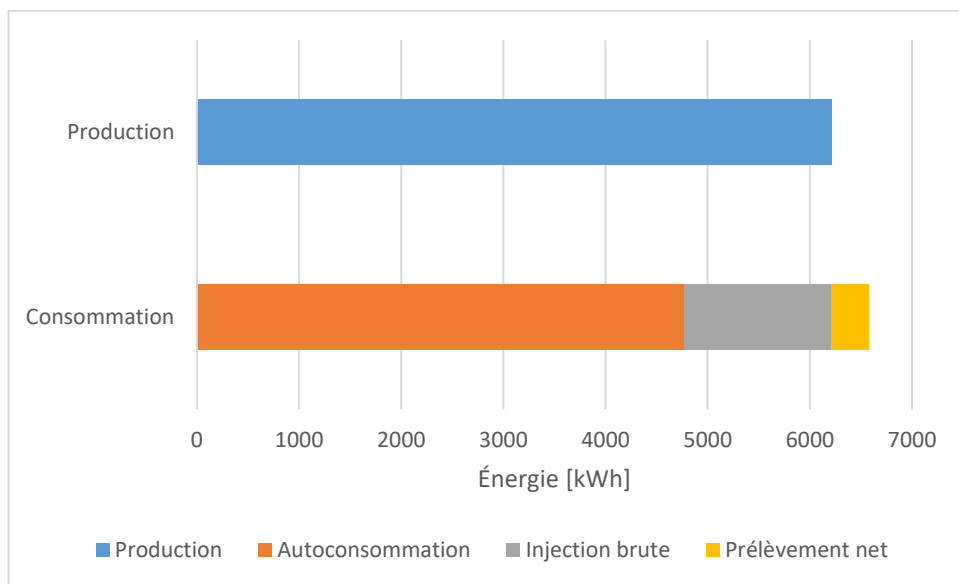
Pour la seconde période à Meix-devant-Virton, la consommation excède la consommation (voir figure 13).

- Le tarif proportionnel s'applique à l'injection brute et s'élève à 230 €.
- Le prélèvement net est acheté, pour une valeur de 100 €. On peut l'associer au contrôleur de puissance sur la production d'eau chaude sanitaire, qui, en autoconsommant un maximum pendant que l'installation produit, fini par induire un prélèvement net à d'autres instants.
- Le contrôleur de puissance sur la production d'eau chaude sanitaire permet de diminuer la consommation de mazout, pour un montant équivalent à 115 €.

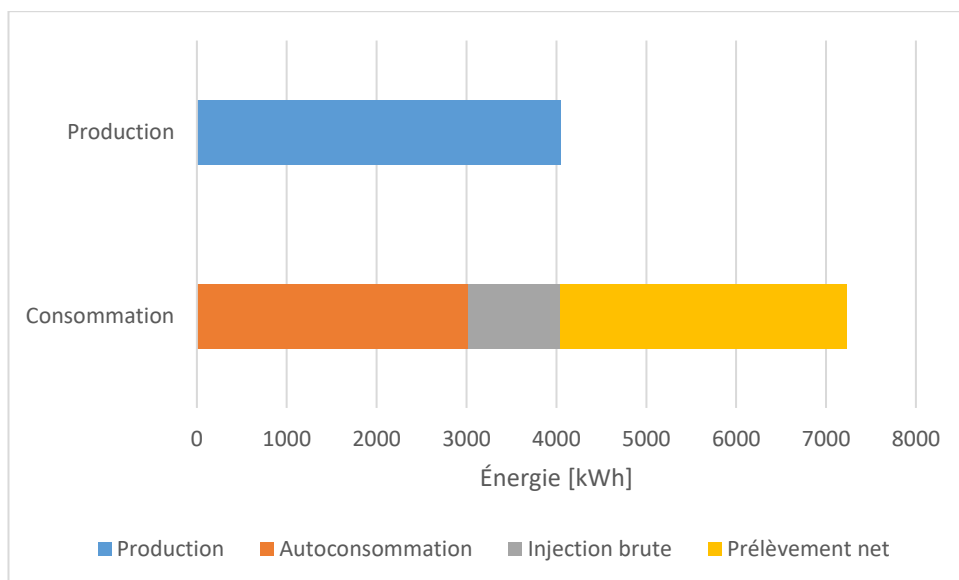
Le gain pour cette première période s'élève donc à 205 €.

Dans les deux cas, le temps de retour est de plusieurs dizaines d'années et excède largement la durée de vie de l'installation.

Il apparaît préférable de maintenir l'installation excédentaire (ou, encore mieux, à l'équilibre), plutôt que d'utiliser toutes les possibilités offertes par le contrôleur de puissance pour maximiser l'autoconsommation.



*Figure 13 : Répartition de la consommation et de la production pour la seconde période à Meix-devant-Virton*



*Figure 14 : Répartition de la consommation et de la production pour la première période à Florenville*

## 6.2. Tarif proportionnel à Florenville

Pour la première période à Florenville, la consommation excède la consommation (voir figure 14).

- Le tarif proportionnel s'applique à l'injection brute et s'élève à 165 €.
- Le prélèvement net est acheté, mais seule une part est à associer au système : c'est l'énergie perdue entre la charge et la décharge de la batterie. Cette part s'élève à 170 €.

Le gain pour cette première période s'élève donc à 70 €.

Pour la seconde période à Florenville, le scénario est sensiblement identique, avec une consommation qui excède la consommation (voir figure 15).

- Le tarif proportionnel s'applique à l'injection brute et s'élève à 105 €.
- Le prélèvement net est acheté, mais seule une part est à associer au système : c'est l'énergie perdue entre la charge et la décharge de la batterie. Cette part s'élève à 140 €.

Le gain pour cette première période s'élève donc à 165 €.

Dans les deux cas, le temps de retour est de plusieurs dizaines d'années et excède largement la durée de vie de l'installation.

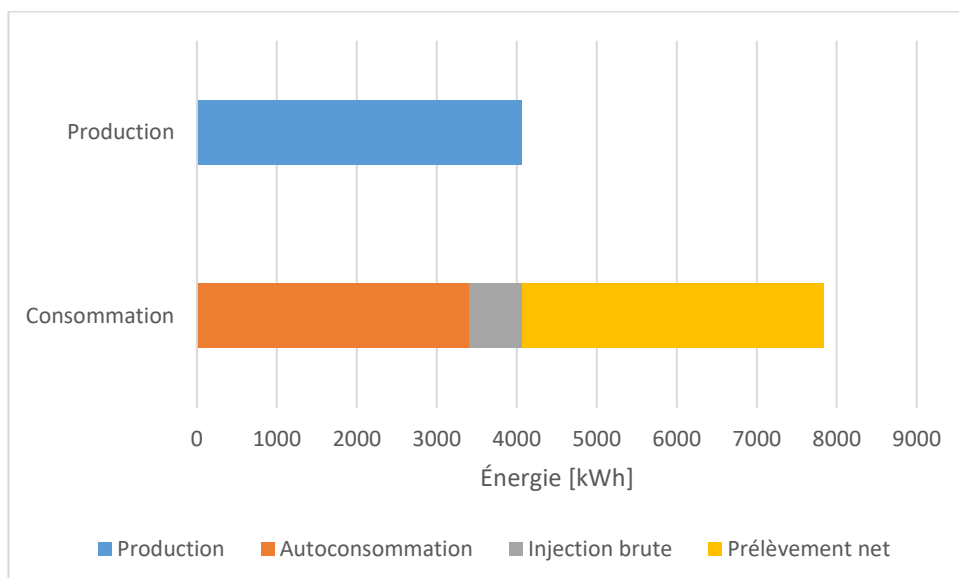


Figure 15 : Répartition de la consommation et de la production pour la seconde période à Florenville

## 7. Discussion

### 7.1. Comparaison des sites selon le profil

Les deux installations présentent la même situation de départ : sans dispositif de stockage, aucune n'atteint au moins les 37,76% requis pour rendre le tarif proportionnel intéressant.

Mais l'installation de Meix-devant-Virton a un profil plus favorable :

- l'installation est surdimensionnée par rapport à la consommation, ce qui permet de compenser les pertes de transformation de la batterie et la consommation du contrôleur de puissance ; il faut cependant veiller à ce que ce dernier ne finisse pas par induire une consommation à terme, au fur et à mesure que les panneaux vieillissent et que leur production diminue ;
- le chauffage de l'eau chaude sanitaire au mazout induit que le préchauffage effectué par le contrôleur de puissance induit des économies de carburant fossile ; de plus, la capacité de stockage est importante pour un volume raisonnable, du fait de l'eau peut être chauffée de 8 °C à 65 °C.

L'installation de Florenville est dans une situation moins intéressante :

- la consommation importante du ménage par rapport à la consommation permet d'atteindre un taux d'autoconsommation très important, mais au prix d'une augmentation de la consommation globale (associée au rendement global de la batterie) ; comme l'installation est sous-dimensionnée par rapport à la consommation, cette augmentation se répercute par un achat supplémentaire d'électricité.
- vu que la production d'eau chaude sanitaire est uniquement d'origine électrique, le maintien de l'eau chaude en température induit des pics de décharge de la batterie, qui auraient pu être évités en partie par une inversion de la priorité entre la batterie et le contrôleur de puissance ; cette inversion éviterait les pertes liées au rendement de la batterie pour le stockage-déstockage.

Dans les deux cas, les prises intelligentes démontrent une contribution anecdotique.

### 7.2. Estimation de l'incertitude des résultats

#### *Comparaison des indicateurs entre eux*

Les indicateurs fournis par l'EMS se recoupent partiellement, et les comparer avec les relations qui les lient permet d'avoir une idée de l'incertitude à laquelle il faut s'attendre avec la méthode d'analyse appliquée.

Une première relation exprime que toute la production photovoltaïque est soit injectée sur le réseau, soit auto-consommée ; au moyen des indicateurs du tableau 1, cela s'exprime comme suit :

$$PV\ Production = SelfUsed + Feed\ IN \quad (5)$$

Installation	Période	Membre de gauche	Membre de droite	Différence
Meix-devant-Virton	Première	6 513 kWh	6 527 kWh	14 kWh
Meix-devant-Virton	Seconde	6 207 kW h	6 220 kW h	13 kW h
Florenville	Première	4 049 kWh	4 063 kWh	14 kWh
Florenville	Seconde	4 065 kWh	4 075 kWh	10 kWh

Tableau 5 : Comparaison des membres de l'équation (5)

Une seconde relation exprime l'équilibre entre fournisseurs d'électricité et consommateurs : l'électricité est fournie par la production photovoltaïque, par la décharge de la batterie ou par le réseau, alors qu'elle est consommée par la charge de la batterie, par le contrôleur de puissance, par les autres consommateurs domestiques ou par le réseau. Avec les indicateurs du tableau 1, cela donne :

$$\begin{aligned}
 & PV \text{ Production} + BATT \text{ Discharge} + Usage \\
 & = BATT \text{ charge} + Heating \text{ Element} \\
 & + House \text{ Electricity} + Feed \text{ IN}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Installation	Période	Membre de gauche	Membre de droite	Différence
Meix-devant-Virton	Première	9 574 kWh	9 261 kWh	312 kWh
Meix-devant-Virton	Seconde	9 193 kW h	9 101 kW h	92 kW h
Florenville	Première	9 713 kWh	9 671 kWh	42 kWh
Florenville	Seconde	9 712 kWh	9 628 kWh	83 kWh

Tableau 6 : Comparaison des membres de l'équation (6)

Comme on peut le constater au tableau 5 et au tableau 6, l'erreur maximale obtenue est de 3%. Elle est évidemment plus élevée si un plus grand nombre d'indicateurs sont impliqués dans le calcul. De manière générale, les erreurs liées aux incertitudes de mesure de l'EMS sont limitées.

### **Comparaison avec les compteurs double-flux**

Des compteurs double-flux ont été installés dans le courant de la deuxième période (le 02/09/2020 à Florenville et le 01/10/2020 à Meix-devant-Virton), et un relevé sur les compteurs a été effectué le respectivement le 01/07/2021 et le 30/06/2021. Les résultats de calculs issus de l'EMS peuvent être comparés aux relevés des compteurs

double-flux sur la même période, tant pour l'injection brute que pour le prélèvement brut sur le réseau.

Installation	Sens du courant	Compteur	EMS	Différence
Meix-devant-Virton	Prélèvement	1 670 kWh	1 695 kWh	23 kWh
Meix-devant-Virton	Injection	777 kW h	809 kW h	32 kW h
Florenville	Prélèvement	4 286 kWh	4 305 kWh	19 kWh
Florenville	Injection	364 kWh	388 kWh	24 kWh

*Tableau 7 : Comparaison des compteurs double-flux et des mesures de l'EMS*

Comme le montre le tableau 7, l'EMS surestime généralement les échanges, de quelques dizaines de kWh, ce qui est tout à fait satisfaisant pour une période de 9 ou 10 mois. L'incertitude que l'on peut donc affecter aux calculs est somme toute maîtrisée.

### 7.3. Comparaison des batteries

La principale différence entre les deux batteries tient à sa composition : le lithium est bien plus léger et électro-négatif que le sodium, ce qui explique le rapport de quasi 4 entre les masses des batteries et de quasi 2 entre les volumes.

En fonctionnement, la batterie au lithium-ion présente un rendement charge-décharge de 7% plus élevé. Il est aussi à noter que ces cellules peuvent être associées à un convertisseur de puissance bidirectionnel plus puissant, ce que n'autorisent pas les cellules au sodium-ion.

### 7.4. Pistes d'amélioration

Le tarif prosumer est construit pour que le prosumer prenne en charge une partie des coûts liés à la distribution, et pas ceux associés au décalage dans le temps de l'injection et du prélèvement. Ce faisant, on suppose un réseau infiniment puissant, et qui n'a aucun coût associé au stockage. En tenant compte de cela et du coût actuel des batteries, il est préférable d'injecter de l'électricité sur le réseau pour conserver une balance entre production et autoconsommation, plutôt qu'essayer d'augmenter le taux d'autoconsommation. Il en résulte que les installations photovoltaïques surdimensionnées par rapport à la consommation du ménage sont dans une situation intéressante pour installer une batterie, alors que les installations sous-dimensionnées ont un incitant moindre à effectuer un tel investissement : ce qui sera économisé entre le tarif capacitaire et le tarif proportionnel sera en partie perdu par une augmentation de la consommation dû au rendement des batteries ; l'incitant peut même être négatif. Il sera intéressant d'observer comment l'évolution de la grille tarifaire en 2024 va modifier ces incitants.



Pour des installations générant leur eau chaude sanitaire uniquement avec de l'électricité, il est recommandé que le contrôleur de puissance ait la priorité sur la batterie, de manière à éviter d'acheter de l'électricité supplémentaire pour compenser le rendement charge-décharge de la batterie lorsqu'elle est utilisée pour produire de l'eau chaude ; cela permet en même temps de diminuer la sollicitation de la batterie. Dans le même ordre d'idée, synchroniser les cycles anti-légionelle pour qu'ils soient déclenchés quand une production photovoltaïque est probable (en pleine journée, avec une fréquence de 24 heures) sollicitera également moins la batterie ou le réseau.

Dès lors que les batteries peuvent développer une puissance importante, il est logique de leur adjoindre un convertisseur de puissance bidirectionnel d'une puissance équivalente à celui de l'onduleur photovoltaïque. Mais ce choix simple n'est pas nécessairement optimum : lors d'une journée ensoleillée, si l'on commence par charger la batterie, et que l'on passe au contrôleur de puissance une fois qu'elle est remplie, alors la puissance limitée de la résistance du contrôleur de puissance empêche d'absorber tout le flux de production. Il est préférable de poser un choix où la somme des puissances du convertisseur de puissance bidirectionnel et de la résistance du contrôleur de puissance équivaut à la puissance de l'onduleur, de telle manière qu'un des deux dispositifs travaille en base en se chargeant tout au long de la journée, et que l'autre absorbe les pics.

Implémenter de l'intelligence artificielle pour mieux connaître le comportement des consommateurs et utiliser les prévisions d'ensoleillement permettrait de ne pas avoir un système qui ne fait que réagir à la situation, mais qui peut aussi l'anticiper, pour éviter, par exemple, l'impact des limitations de puissance, ou pour limiter la consommation du contrôleur de puissance en fonction d'un objectif annuel à ne pas dépasser.

## 8. Conclusion et perspectives

Une autoconsommation de la production d'une installation photovoltaïque domestique de l'ordre de 70 à 80% est atteignable au moyen d'une batterie ou d'un contrôleur de puissance régulant la production électrique d'eau chaude sanitaire. Un tel résultat n'est plus atteignable si le chauffage de l'habitation est effectué électriquement (électrique pur ou pompe à chaleur) : en effet, le profil de consommation devient plus important l'hiver et se déphase trop du point de vue saisonnier par rapport à la production en été (le stockage par batterie est intra-journalier, et non inter-saisonnier). L'économie annuelle obtenue en passant du tarif prosumer capacitaire au tarif proportionnel est très variable suivant les cas étudiés : de l'ordre 45-50 €/kWe installé pour une installation surdimensionnée à 15-35 €/kWe installé pour une installation sous-dimensionnée. Dans tous les cas, ces gains sont trop faibles pour induire un temps de retour simple inférieur à la durée de vie des batteries.

Un taux plus élevé n'est pas atteignable, du fait qu'un stockage saisonnier serait nécessaire pour cela : les systèmes utilisés ont une autodécharge qui induit que seule leur utilisation pour un stockage intra-journalier est pertinent.

Concernant les batteries, le haut rendement électrochimique mis en avant par les fabricants n'est pas observé dans la réalité : des consommations auxiliaires induisent un rendement global de 60% entre électricité reçue et électricité délivrée.

La production d'eau chaude sanitaire déphasée au moyen du contrôleur de puissance sur une résistance électrique est un des moyens les moins chers et les plus efficaces (pour autant que le ballon soit correctement isolé). Il est cependant dommage que cette technologie ne soit pas complètement transposable à la production d'eau chaude sanitaire par pompe à chaleur (ballon thermodynamique) avec l'aspect « contrôle de la puissance », ce qui impliquerait une consommation électrique plus faible et rationnelle du ménage : en effet, si on peut imaginer d'utiliser un variateur pour modifier la vitesse de rotation et la consommation du compresseur d'une pompe à chaleur, sa dynamique est trop lente pour suivre toutes les variations que peut absorber une résistance électrique.

La contribution des prises intelligentes à l'autoconsommation est anecdotique, et peu d'arguments permettent d'envisager qu'il en soit autrement à l'avenir.

Lorsque plusieurs systèmes sont installés conjointement, les priorités au sein du système de gestion énergétique doivent être choisies adéquatement, de manière à éviter de cumuler les rendements de transformation si en en vient à déstocker de l'énergie d'une forme pour la stocker sous une autre.

Les conclusions ne peuvent donc être généralisées sans approfondir la démarche vis-à-vis d'autres situations. Une étude plus vaste avec des simulations pourrait amener à formuler des conclusions plus complètes.

Il serait ainsi intéressant d'étudier d'autres configurations :

- La variante avec un boiler thermodynamique, comme évoqué plus haut.
- Pour une maison possédant des panneaux solaires thermiques et des panneaux solaire photovoltaïques, il est probablement plus avantageux d'utiliser au maximum l'offre des panneaux solaires thermiques que de produire de l'eau chaude sanitaire au moyen d'une résistance utilisant l'électricité excédentaire.
- L'utilisation de l'électricité excédentaire pour des fins de chauffage peut aussi être envisager, même si l'adéquation entre l'offre et le besoin est a priori défavorable à l'obtention d'une contribution substantielle.
- L'utilité du stockage pour d'autres types de production décentralisée d'énergie, comme une cogénération, va donner d'autres résultats.

## 9. Sources

- [1] COMMISSION WALLONNE POUR L'ÉNERGIE, (mis en ligne le 11 mai 2020), *FAQ - Tarif prosumer*.

Adresse URL : <https://www.cwape.be/sites/default/files/cwape-documents/20e11-FAQ%20Prosumer-mise%20%C3%A0%20jour.pdf>

- [2] LI, J., *et al.*, *Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss*  
Protection and Control of Modern Power Systems, 3 (5), 2018, pp. 1-9.  
Adresse URL : <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0078-0>
- [3] ASSOCIATION POUR LA PROMOTION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, (consulté le 1<sup>er</sup> juillet 2021), *Production électrique renouvelable | APERe asbl*.  
Adresse URL : <http://www.apere.org/fr/production-electrique-renouvelable>
- [4] ORES, (consulté le 13 octobre 2021), *Le tarif prosumer – Particuliers et professionnels | ORES*.  
Adresse URL : <https://www.ores.be/particuliers-et-professionnels/tarif-prosumer>

## 10. Remerciements

Cette étude n'aurait pas été possible sans le concours de la Wallonie et du FEADER, qui ont financé la majorité du projet « Gaume Energies » au travers du Plan wallon de Développement Rural 2014-2020.

Avec le soutien de  
la



**Wallonie**



Fonds européen agricole pour le développement rural :  
l'Europe investit dans les zones rurales.