

**Haute Ecole  
« ICHEC – ECAM – ISFSC »**



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

# **Face à la crise énergétique en Belgique : l'autoconsommation photovoltaïque peut-elle être une solution pour les particuliers ?**

Mémoire présenté par :

**Nathan GHIGNY**

Pour l'obtention du diplôme de :

**Master en sciences commerciales**

Année académique 2022-2023

Promoteur :

**Pascal VERHASSELT**



## Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de mon mémoire.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon promoteur, Monsieur Pascal VERHASSELT. Sa disponibilité, sa réactivité et le temps qu'il m'a accordé ont été essentiels pour cadrer mes recherches et établir la méthodologie.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers Cédric LEPAGE et Jérôme DE BRUYN, ainsi qu'à l'ensemble des collaborateurs de l'entreprise Horizon Energie. Leur expertise et leur passion pour le domaine du photovoltaïque m'ont permis d'acquérir une vision plus complète de ce secteur. Merci pour la confiance qu'ils m'ont accordée et les opportunités d'apprentissage qu'ils m'ont offertes.

Mes remerciements s'adressent à l'ensemble de mes proches pour leur soutien inconditionnel, et plus particulièrement à Anne-Catherine LEONARD pour ses relectures attentives et ses précieux commentaires.

## Engagement anti-plagiat

Je soussigné, GHIGNY, Nathan, étudiant en Master en sciences commerciales, déclare par la présente que le Mémoire ci-joint est exempt de tout plagiat et respecte en tous points le règlement des études en matière d'emprunts, de citations et d'exploitation de sources diverses signé lors de mon inscription à l'ICHEC, ainsi que les instructions et consignes concernant le référencement dans le texte respectant la norme APA, la bibliographie respectant la norme APA, etc. mises à ma disposition sur Moodle.

Sur l'honneur, je certifie avoir pris connaissance des documents précités et je confirme que le Mémoire présenté est original et exempt de tout emprunt à un tiers non-cité correctement.

Dans le cadre de ce dépôt en ligne, la signature consiste en l'introduction du mémoire via la plateforme ICHEC-Student.

# Table des matières

Introduction.....	1
1 Méthodologie – approche macro-économique.....	2
1.1 Objectifs.....	2
1.2 Aperçu des besoins.....	2
1.3 Valeur ajoutée.....	2
1.4 Modalités de confrontation au terrain.....	3
2 Le photovoltaïque au cœur des enjeux énergétiques.....	4
2.1 Introduction au chapitre.....	4
2.2 Tenants et aboutissants de la crise énergétique.....	5
2.3 Définition d'un système photovoltaïque.....	7
2.4 Le cadre photovoltaïque en Belgique.....	22
2.5 Conclusion du chapitre.....	35
3 L'autoconsommation photovoltaïque : concepts et applications.....	37
3.1 Introduction au chapitre.....	37
3.2 Présentation du concept d'autoconsommation.....	38
3.3 Les solutions d'autoconsommation.....	41
3.4 Recul critique de l'autoconsommation.....	54
3.5 Conclusion du chapitre.....	56
4 Méthodologie : approche micro-économique.....	57
4.1 Étapes de la construction du tableau d'analyse de rentabilité.....	57
5 De l'innovation à l'impact : la batterie de stockage.....	59
5.1 Introduction au chapitre.....	59
5.2 Objectifs du tableau.....	60
5.3 Identification des facteurs clés et récolte de données.....	62
5.4 Construction du tableau.....	71
5.5 Étude de cas selon divers scénarios.....	74
5.6 Auto-évaluation selon les KPI's.....	76
5.7 Conclusion du chapitre.....	77
6 Recul critique, limites et perspectives.....	78
6.1 Recul méthodologique.....	78

6.2	Perspectives .....	79
7	Conclusion .....	80
8	Bibliographie .....	82
Annexes	.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Liste des figures et des tableaux

Figure I : Contribution de l'énergie à l'inflation en Belgique .....	6
Figure II : Forfait d'équilibrage par fournisseurs .....	19
Figure III : évolution de la production PV en Belgique (gauche) et répartition selon les régions (droite).....	24
Figure IV : Explication de la puissance électrique nette développable (kWe) .....	26
Figure V : coût du tarif prosumer forfaitaire .....	27
Figure VI : Prime sur les panneaux photovoltaïques en Flandre.....	28
Figure VII : Prime sur les batteries en Flandre .....	29
Figure VIII : Taux d'octroi des CV à Bruxelles pour le photovoltaïque .....	32
Figure IX : Tableau comparatif du cadre photovoltaïque pour les installations inférieures à 10 kVA.....	34
Figure X : consommation électrique moyenne selon le nombre de personnes (Belgique) .....	64
Figure XI : Indice des prix à la consommation de l'électricité .....	67
Figure XII : Tableau général d'analyse de rentabilité photovoltaïque .....	73

# Introduction

La transition énergétique en Belgique constitue un défi majeur qui nécessite des solutions innovantes et durables. Dans ce contexte, l'autoconsommation photovoltaïque émerge comme une possible alternative pour les particuliers. Ce mémoire s'interroge sur sa capacité à résoudre la crise énergétique et examine ses effets potentiels.

Les motivations de ce choix de recherche sont ancrées dans un environnement inflationniste et de crise énergétique, incitant à rechercher des solutions pour atténuer ces impacts. Le sujet de l'autoconsommation photovoltaïque a été choisi afin de comprendre son fonctionnement et son potentiel pour valoriser la production d'électricité renouvelable.

Parallèlement à mes études en Master en sciences commerciales, j'exerce également une activité d'étudiant indépendant dans le secteur photovoltaïque, ce qui m'a naturellement orienté vers cette question de recherche. Mon immersion quotidienne dans ce domaine m'a amené à me questionner sur les moyens d'augmenter l'autoconsommation chez les particuliers et les raisons sous-jacentes à cette démarche.

Cette problématique revêt un intérêt particulier dans le contexte actuel, où les énergies renouvelables occupent une place primordiale dans les débats sur la transition énergétique. Les recherches se focaliseront sur le photovoltaïque résidentiel, en cherchant à déterminer les avantages et les limites de l'autoconsommation. La finalité est de comprendre en quoi cette approche peut contribuer à la réduction des impacts de la crise énergétique et favoriser l'indépendance énergétique des particuliers.

La méthodologie adoptée pour ce travail de recherche comprendra une analyse de rapports de recherche, la collecte de données existantes, des entretiens avec des spécialistes du domaine, la construction d'un modèle d'analyse de rentabilité, ainsi que des études de cas. Le mémoire sera structuré en deux parties, avec une première partie consacrée à une approche macro-économique du photovoltaïque et de l'autoconsommation, suivie d'une partie micro-économique qui se concentrera plus spécifiquement sur les batteries de stockage, étayée par des études de cas.

Pour recueillir et traiter les informations nécessaires au développement de la problématique, différentes étapes de travail seront entreprises. Pour la partie macro-économique, une recherche documentaire et l'analyse d'indicateurs chiffrés seront privilégiées. Pour la partie micro-économique, des expérimentations et des études de cas seront menées afin de créer des résultats concrets, tout en s'appuyant sur des indicateurs et des statistiques pour la construction du modèle d'analyse.



# 1 Méthodologie – approche macro-économique

Les recherches entreprises dans ce mémoire seront scindées en deux sections.

Commençons par détailler la méthodologie de la partie macro-économique, où l'on s'intéressera au photovoltaïque et à l'autoconsommation dans son ensemble.

## 1.1 Objectifs

Ce projet de mémoire a pour objectif de répondre aux changements engendrés par la crise énergétique tout en se concentrant sur le secteur photovoltaïque.

Dans un premier temps, il est important de définir un système photovoltaïque résidentiel. Nous essayerons ensuite de comprendre l'intérêt de maximiser l'autoconsommation photovoltaïque et d'optimiser le rendement énergétique pour contrer l'augmentation des prix et l'incertitude liée à l'approvisionnement en électricité. Pour cela, nous étudierons des solutions concrètes offertes par l'autoconsommation photovoltaïque et l'impact qu'elles peuvent avoir.

## 1.2 Aperçu des besoins

En réponse aux prix de l'électricité en constante évolution, les consommateurs souhaitent diminuer leurs prélèvements sur le réseau électrique et les coûts qui en découlent. Les enjeux actuels sont d'augmenter le recours aux énergies renouvelables et ainsi, l'indépendance énergétique.

Dès lors, les (futurs) détenteurs d'installations photovoltaïques souhaitent maximiser la production de leurs installations pour couvrir au mieux leur consommation et valoriser leurs surplus.

Parallèlement, les fournisseurs de solutions photovoltaïques doivent élargir leurs offres afin de sécuriser leurs revenus à long terme. Avec des variations de prix de l'électricité qui sont cycliques et un marché incertain en raison des évolutions réglementaires, le défi est de maintenir une demande constante.

## 1.3 Valeur ajoutée

La valeur du projet réside dans l'apport de solutions enrichissant la question de l'autoconsommation photovoltaïque et son application dans le cadre de la transition énergétique. Bien qu'il existe déjà certaines solutions, le flou persiste autour de l'intérêt des outils destinés à mieux consommer et valoriser sa production d'électricité.

Au-delà de la compréhension des concepts, l'objectif de cette partie est de fournir des pistes de solutions visant à réduire le montant de la facture tout en maximisant l'indépendance énergétique. Nous nous intéresserons également aux solutions d'autoconsommation pour les personnes n'ayant pas la possibilité de se munir d'une installation photovoltaïque.

De plus, à travers la fourniture de pistes d'optimisation de la consommation d'électricité, l'utilité indirecte de ce projet est la réduction des émissions de CO<sup>2</sup> du parc immobilier belge.

## 1.4 Modalités de confrontation au terrain

Les acteurs liés à la thématique choisie sont les ménages ayant ou souhaitant acquérir une installation photovoltaïque, les entreprises qui les fournissent ainsi que les autres membres de la filière : fabricants, grossistes, sous-traitants, installateurs, gestionnaires de réseau, législateurs.

## 2 Le photovoltaïque au cœur des enjeux énergétiques

### 2.1 Introduction au chapitre

La première partie de ce mémoire a pour objectif d'offrir une vue globale sur le contexte actuel du marché belge du photovoltaïque.

Nous allons dans un premier temps tenter de comprendre les origines de la crise énergétique et d'en expliquer les enjeux. Cela permettra d'analyser les impacts de la crise sur le recours aux énergies renouvelables. Les recherches qui seront entreprises durant la rédaction de ce mémoire partent de la question de l'accélération de la transition énergétique en réponse à cette crise, d'où la nécessité d'en poser les bases.

Ensuite, il convient de définir les éléments repris dans une installation photovoltaïque. L'intérêt ici est de comprendre les composants essentiels d'un système photovoltaïque. Cette étape est nécessaire pour définir les concepts clés et dès lors comprendre les termes qui seront utilisés dans ce mémoire. Nous expliquerons également le rôle de chacun des acteurs.

Une fois ces éléments précisés, nous pourrons nous intéresser aux mesures prises par le gouvernement pour répondre au changement des conditions de marché. Les réglementations par régions seront mises en exergue. Le rôle de cette partie est d'aborder les enjeux réglementaires actuels afin de pouvoir étudier leur potentiel impact sur les systèmes photovoltaïques.

L'ambition de ce chapitre est la compréhension d'un système photovoltaïque dans son ensemble, en prenant la situation du marché belge en considération. Cette connaissance est indispensable pour la compréhension de la suite des recherches. L'approche théorique qui sera développée permettra de construire les fondements de ce mémoire et a pour objectif de préparer une confrontation avec la thématique de l'autoconsommation qui sera abordée dans le chapitre suivant.

## 2.2 Tenants et aboutissants de la crise énergétique

Durant l'automne 2021, les prix de l'énergie ont augmenté en raison du regain de l'activité économique, après une période d'assouplissement de la demande en énergie due à la crise sanitaire et le confinement. Selon Brugel (2023), cette reprise a entraîné une forte croissance de la demande qui a dépassé l'offre existante, créant par conséquent des tensions sur le marché énergétique. Parallèlement, les niveaux de stockage de gaz en Europe étaient en dessous des normes saisonnières. La situation a ensuite été aggravée par l'instabilité géopolitique et l'incertitude quant à la sécurité d'approvisionnement en raison de la guerre en Ukraine et des sanctions à l'encontre de la Russie, ce qui a contribué à la hausse des prix.

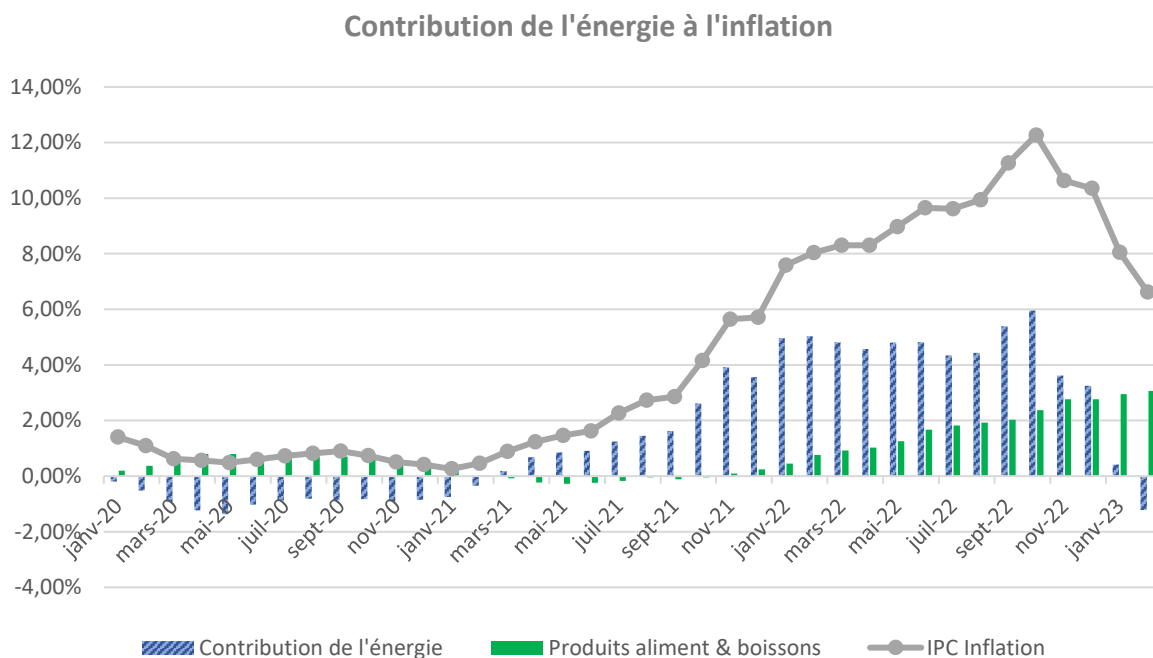
Les conséquences de cette hausse s'observent auprès des ménages, des entreprises et des fournisseurs. En effet, la situation des ménages est hétérogène, car elle dépend du type et de la date de conclusion du contrat. D'une part, ceux ayant souscrit un contrat à tarif variable ou un contrat à prix fixe à partir de l'automne 2021 subissent la hausse des prix à travers des augmentations de leur facture d'acompte et de leurs factures de régularisation. D'autre part, les ménages ayant souscrit un contrat fixe avant cette période ne sont pas encore touchés.

Du côté des fournisseurs, la hausse des prix met à mal leur trésorerie qui est sous pression. Selon leur couverture en amont des volumes d'énergie à fournir, ils peuvent être amenés à acheter de l'énergie à un prix élevé sur le marché pour ensuite la revendre aux consommateurs à un prix inférieur déterminé. Les fournisseurs en difficulté financière sont dès lors vulnérables et risquent de devoir stopper leurs activités. En outre, la hausse des prix accroît le risque d'impayés au niveau des clients affectés, ce qui détériore davantage les liquidités des fournisseurs (Brugel, 2023).

L'impact financier se fait également ressentir au sein des entreprises, notamment celles dont l'activité requiert d'importants volumes d'énergie. Conséquemment, les entreprises sont contraintes de répercuter en partie ou en totalité ce coût additionnel auprès de leurs clients. Pour certaines industries, le gaz et l'électricité sont des matières premières cruciales.

En février 2023, le taux d'inflation s'élevait à 6,62%. Malgré une diminution de 7,93% de l'inflation énergétique (Statbel, 2023), les niveaux de prix de l'électricité et du gaz naturel restent importants. L'augmentation de l'inflation établie depuis 2021 s'explique en majeure partie par l'essor du prix de l'énergie. Cependant, la tendance s'inverse depuis le début de l'année 2023 : la baisse des prix du gaz naturel et de l'électricité contribue à l'atténuation du niveau d'inflation.

Figure 1 : Contribution de l'énergie à l'inflation en Belgique



Source : Statbel (2023, 27 février). L'inflation s'élève à 6,62%. Récupéré de <https://statbel.fgov.be/fr/themes/prix-la-consommation/indices-des-prix-la-consommation#news>

### 2.2.1 L'impact de la crise sur les énergies renouvelables

La crise énergétique devrait servir de tremplin à la transition vers les énergies renouvelables. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2022), l'invasion de l'Ukraine et les insécurités énergétiques qui en découlent ont poussé les gouvernements à déployer des plans ambitieux en matière de transition énergétique. Nous voyons ainsi apparaître des projets ambitieux comme la stratégie « REPowerEU », dont l'un des objectifs majeurs est la réduction de la dépendance envers les imports d'énergie fossile.

L'AIE (2022) estime une augmentation de la capacité de production d'électricité verte d'environ 60% entre 2022 et 2027. L'énergie solaire photovoltaïque en serait la principale source, suivi de l'éolien terrestre, l'éolien maritime, la bioénergie ainsi que l'hydroélectricité. En Europe, l'incitant principal pour l'investissement dans le photovoltaïque est le tarif de rachat du surplus de la production d'électricité. L'agence a rehaussé ses prévisions de 30% au vu des changements politiques opérés en réponse à l'invasion ukrainienne.

Pour favoriser les énergies renouvelables, l'Union européenne va mettre en place un mécanisme d'attribution de permis plus rapide et ainsi stimuler les développements de projets. Il faudra donc trois mois pour obtenir le feu vert d'un projet lié à l'énergie solaire (Georis, 2023).

## 2.3 Définition d'un système photovoltaïque

### 2.3.1 Les éléments clés

Après avoir abordé le contexte énergétique et ses enjeux, nous allons nous intéresser plus en détail au photovoltaïque. Dans cette partie, il convient de détailler les composantes d'un système photovoltaïque résidentiel et de comprendre leur intérêt individuellement.

L'objectif est d'apporter une vue schématique du fonctionnement d'un tel système et des interconnexions qui en découlent. La maîtrise de ces éléments et concepts est indispensable dans le cadre de la recherche qui sera réalisée durant la suite de ce mémoire. Le schéma d'un système photovoltaïque est disponible en annexe 2 pour un aperçu visuel.

#### 2.3.1.1 Les panneaux photovoltaïques

##### 2.3.1.1.1 Rôle et fonctionnalités

Les panneaux ou modules photovoltaïques sont les éléments clés d'un système. Leur rôle est de transformer les rayonnements solaires en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Leur principe de fonctionnement est le suivant : « Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. » (Connaissance des énergies, 2017, para.4).

Il existe deux types de technologies : les cellules monocristallines, caractérisées par un bon rendement, mais d'importants coûts de production et les cellules polycristallines qui offrent un rendement et des coûts inférieurs (connaissance des énergies, 2017).

##### 2.3.1.1.2 Unité de mesure

L'unité de mesure des panneaux est la puissance crête, mesurée en watt crête (Wc). Le watt est l'unité de mesure de la puissance électrique. Selon EDF ENR (s.d), celle-ci est la capacité de production maximale selon un certain ensoleillement et moyennant des conditions idéales appelées des conditions standard de référence. Celles-ci prennent en compte l'orientation, l'ombrage, l'inclinaison, l'irradiance, etc. De manière synthétique, ces conditions correspondent à une journée ensoleillée en été, aux alentours de midi. Cet indicateur de référence est utilisé dans le cadre du dimensionnement d'une installation, ou encore dans la comparaison d'installations et de panneaux. Au plus le niveau de kilowatt-crête (kWc) est important, au plus la production d'électricité le sera également.

Il est important de ne pas confondre cet indicateur de référence avec le kilowattheure (kWh) qui mesure la production ou la consommation électrique. Cette unité se définit comme telle : « Un kilowatt équivaut à 1.000 watts. Si l'on parle d'un kilowattheure, on désigne donc l'énergie consommée par un appareil électrique d'une puissance de 1.000 watts pendant une heure. » (Ores, 2018, para.4). En ce qui concerne les conversions, 1 kWh correspond à 1000 Wh et 1 mégawattheure (MWh) est égal à 1000 kWh.

À titre d'exemple, 1 kWc de panneaux photovoltaïques permet une production allant de 900 à 1400 kWh d'électricité sur une année. Cela dépend toutefois des conditions météorologiques et d'implantation des panneaux. Nous pourrions parler par exemple d'une installation de 10 kWc (kilowatts crête) dans le cadre d'une installation de panneaux sur la toiture d'une maison. Cela donne une indication de la capacité installée en toiture mais ne correspond pas à la production annuelle de l'installation (EDF ENR, s.d.).

#### *2.3.1.1.3 Avantages et limites*

Abordons maintenant les avantages et les limites des panneaux photovoltaïques. Tout d'abord, la source d'énergie solaire est inépuisable et abondamment disponible. Selon Engie (2022), la longévité des panneaux est de 30 ans environ et ils sont recyclables à hauteur de 94%. La majorité des composants sont récupérables : verre, aluminium, plastique, cuivre et silicium. Par exemple, le verre peut être recyclé à l'infini et le silicium jusqu'à 4 fois. Il est donc possible de recréer de nouvelles cellules photovoltaïques. Malgré l'extraction des matières premières, la production et le transport, leur impact environnemental est positif : « Selon l'ADEME, l'agence de la transition écologique, **un panneau émet aujourd'hui en moyenne 40 à 55 grammes de CO2 par kW produit**. On considère donc qu'il faut entre une et trois années pour amortir sa fabrication. Lorsqu'on sait qu'il peut produire de l'électricité verte pendant 30 à 40 ans, on peut vite comprendre que **son impact environnemental reste largement positif**. » (Cité par Engie, 2022, para.14).

Une autre raison en faveur de la technologie est sa flexibilité. Installer des panneaux est possible tant pour les particuliers que pour les entreprises et sur divers types de structures : au sol, sur des toitures en tuile, en ardoise, en bac acier, etc.

Une limite des panneaux est la contrainte physique. Encore lourds et fragiles, ces derniers sont parfois difficiles à manipuler et à acheminer sur des toitures. Malgré leur modularité, installer des panneaux en ville est parfois compliqué ou du moins peu rentable en raison d'une faible surface disponible.

Par ailleurs, il n'est pas possible de stocker l'énergie produite sous sa forme primaire et de manière directe (Connaissance des Énergies, 2017). Cela rejoint la contrainte de la saisonnalité de la production d'énergie. Dans un pays comme la Belgique, la variabilité météorologique engendre une production plus dispersée que dans un pays plus ensoleillé. Durant les périodes hivernales, la production est amoindrie, car l'irradiance est moins élevée et les journées sont plus courtes. Les perspectives d'indépendance grâce au photovoltaïque sont donc peu pertinentes si une interconnexion et une combinaison d'outils de stockage et de production alternative ne sont pas envisagées.

### *2.3.1.2 L'onduleur*

#### *2.3.1.2.1 Rôle et fonctionnalités*

L'onduleur prend la forme d'un boîtier et est généralement installé sur un support mural ou dans un tableau électrique. Selon photovoltaïque.info (2019), son rôle principal est de convertir l'électricité produite par les panneaux pour la rendre consommable en toute sécurité.

Les panneaux produisent du courant continu (DC) que l'onduleur transforme en courant alternatif (AC) équivalant au courant du réseau. Il occupe dès lors une place centrale dans un système photovoltaïque et est un intermédiaire indispensable pour la consommation de l'électricité verte. Sa fonction est de répondre à des normes de sécurité déterminées par le gestionnaire de réseau, par exemple à travers une protection de découplage. Ce système permet la déconnexion automatique de l'onduleur en cas de surtension ou de défaut sur le réseau électrique. (cf. infra p. 23).

#### *2.3.1.2.2 Unité de mesure*

L'unité de mesure de l'onduleur est le kVA (kilovoltampère). La commission wallonne pour l'énergie le définit comme « l'unité de mesure dans laquelle est exprimée la puissance électrique maximale apparente d'une installation, mesurée à la sortie de l'onduleur. » (CWaPE, 2023, para.2). Certains parlent aussi de puissance AC. L'onduleur étant l'intermédiaire entre les panneaux et les récepteurs de l'électricité, il définit la puissance d'entrée et sortie.

#### *2.3.1.2.3 Dimensionnement*

Le choix du modèle est non négligeable dans le cadre du dimensionnement d'une installation photovoltaïque. De nombreux facteurs sont à prendre en compte lors de cette étape ; la puissance crête, l'ombrage, l'inclinaison des panneaux, le type de réseau électrique, etc. Lorsqu'une installation photovoltaïque produit, l'énergie est consommée directement sur place, par des produits électroménagers par exemple.



Toutefois, il est possible que la production soit plus importante que la consommation à un moment précis ; dans ce cas, l'électricité est réinjectée sur le réseau. Le raccordement électrique de l'onduleur est donc soumis à certaines réglementations afin de contrôler ces réinjections.

De manière générale, deux types de déclinaison de courant alternatif existent ; le courant monophasé et le triphasé. Selon TotalEnergies (2021), le courant monophasé est représenté d'une seule phase électrique alors que le triphasé en dispose de trois. La différence entre les deux est qu'une alimentation en triphasé permet la fourniture d'une tension trois fois plus conséquente que dans le cas du courant monophasé. Nous pouvons ainsi prendre l'exemple d'un compteur électrique de 12 kVA. La puissance est concentrée sur une phase en monophasé et sera équilibrée entre trois phases de 4 kVA en triphasé. La principale distinction est dès lors la puissance, ou les habitations plus énergivores seront généralement équipées d'un courant triphasé. Selon Energieplus (2021), le raccordement d'une installation photovoltaïque en monophasé est permis jusqu'à 5 kVA par phase. Au-delà, un raccordement en triphasé est obligatoire. Cela est donc important à prendre en compte dans le dimensionnement d'une installation. En effet, l'installation d'un onduleur monophasé est possible sur un raccordement triphasé, mais l'inverse ne l'est pas.

Les onduleurs peuvent être sous-dimensionnés ou surdimensionnés. Bruxelles Environnement (2010) précise qu'il est possible de sous-dimensionner un onduleur, donc la puissance AC, par rapport à la puissance crête installée. Cela induit que la puissance de l'onduleur (en kVA) est moins élevée en comparaison à la puissance crête (kWc). Généralement, les onduleurs sont sous-dimensionnés à 80%. Attention, « Un sous ou surdimensionnement trop élevé de l'onduleur peut diminuer fortement les performances de l'ensemble du système. C'est notamment pour cette raison qu'il est important de suivre les prescriptions du fournisseur des modules et des onduleurs. Ces prescriptions varient d'une marque à une autre et peuvent même être propre au modèle choisi. » (Bruxelles Environnement, 2010, pp.2-3).

Les fournisseurs d'onduleurs fournissent généralement un outil en ligne ou un logiciel de dimensionnement dans lequel il est possible de dessiner l'installation. Cet outil prend en compte les facteurs d'implantation et conseille l'installateur sur l'onduleur à choisir (SMA, 2019).

#### *2.3.1.2.4 Les différents types d'onduleurs*

##### I. L'onduleur de chaîne :

Ce dernier convertit l'électricité de l'ensemble d'une chaîne de panneaux reliés entre eux par un câble. L'onduleur, en bout de chaîne, convertit le courant. L'avantage est la facilité de gestion, d'installation et de maintenance. Toutefois, les modules sont dépendants les uns envers les autres, ce qui peut empiéter sur la production (Engie, 2022).

## II. L'onduleur central :

Les fonctionnalités sont comparables à l'onduleur décrit ci-dessus, à la différence qu'il peut prendre en charge plusieurs chaînes. Ce type d'onduleur est donc généralement choisi pour des installations plus importantes, par exemple pour des entreprises (Engie, 2022).

## III. Les micro-onduleurs :

Ces derniers sont petits et installés directement à l'arrière de chaque panneau. Au-delà de leur mission initiale qui est la transformation du courant continu en courant alternatif, ils analysent continuellement la production par modules.

Selon Engie (2021), leur gestion individualisée permet l'optimisation de la production grâce à la gestion de l'ombrage ou encore la réduction des effets de chaîne. Dans le cas où un panneau tomberait en panne ou qu'une partie de l'installation est ombragée, les autres modules continueront à produire car leur production est individualisée. Un autre avantage est la sécurité ; la longueur de câble étant limitée, la conversion de l'énergie se produit plus rapidement.

En raison du nombre de micro-onduleurs, le budget est multiplié et le service après-vente peut s'avérer plus coûteux. Par conséquent, la maintenance requiert un accès à la toiture ainsi que le démontage du ou des panneaux concernés, ce qui engendre une organisation et un coût supplémentaire.

## IV. L'onduleur hybride :

Ce dernier permet d'optimiser la diffusion de l'électricité. Il permet par exemple de paramétrer l'injection de la production dans le réseau électrique, la charge d'une batterie ou la consommation directe. Engie (2022) souligne qu'il est capable, sur base des données en temps réel, de déterminer au mieux l'utilisation de l'énergie.

### *2.3.1.2.5 Avantages et limites*

L'onduleur permet de maximiser la production photovoltaïque. Son rôle est d'analyser et d'adapter la tension de sortie en continu afin de dégager le meilleur rendement de l'installation. Cela est bien sûr réalisé dans des conditions de sécurité optimales grâce à son rôle de régulateur dû à sa fonction intermédiaire entre les modules et le réseau électrique.

Une limite majeure des onduleurs est l'effet de chaîne. Lorsqu'un panneau est défaillant ou ombragé, le reste de l'installation est freiné également, pouvant entraîner des pertes de production. Les micro-onduleurs résolvent ce problème mais à un certain coût et pour une maintenance complexifiée.

### *2.3.1.3 Les optimiseurs de puissance*

#### *2.3.1.3.1 Rôle et fonctionnalités*

Similairement aux micro-onduleurs, les optimiseurs de puissance sont des petits boîtiers qui s'installent à l'arrière des panneaux. Comme leur nom l'indique, ces derniers ont pour objectif d'optimiser la production en traçant le point de puissance maximum (MPP) en temps réel (SolarEdge, s.d). Leur intérêt est équivalent aux micro-onduleurs : facilité d'installation, sécurité, meilleur rendement, suivi en temps réel et alertes (Batibouw, 2022).

Nous sommes dès lors amenés à nous demander ce qui différencie l'optimiseur de puissance du micro-onduleur. L'objectif de l'optimiseur est finalement de répondre à tous les avantages fournis par son homologue, en supprimant ses limites. En effet, les micro-onduleurs contiennent plus de composants car ils convertissent le courant. Cela est onéreux et contraignant, d'autant plus pour les installations de plus grande envergure. De plus, le nombre important de composants induit plus de risque de défaut et maintenance (cf. supra p. 11). L'avantage majeur est donc la réduction de coûts et une gestion facilitée due à la combinaison entre les boîtiers optimiseurs et un onduleur de chaîne.

Un autre atout des optimiseurs est la compatibilité avec les batteries. Les micro-onduleurs ne sont compatibles qu'avec les batteries AC, chargées en courant alternatif, alors que les optimiseurs élargissent le panel de choix d'une batterie grâce à une compatibilité AC et DC. Cela induit que les batteries peuvent être chargées en courant continu, directement depuis les panneaux (Atelier solaire, 2019). Nous verrons plus tard l'intérêt de charger une batterie en DC (cf. infra p. 45).

### *2.3.1.4 La batterie de stockage*

#### *2.3.1.4.1 Rôle et fonctionnalités*

Nous nous intéressons ici aux batteries de stockage domestiques. Leur utilité principale est le stockage de l'énergie produite ne pouvant être directement consommée. L'intérêt est dès lors, dans le cadre d'une batterie solaire, de reporter la consommation de la production. La charge se produit donc dans la journée, lorsqu'il y a du soleil.

Nous avons vu précédemment que l'une des limites de la technologie photovoltaïque est la variabilité de la production. La batterie a pour objectif de contrer cette limite en permettant l'utilisation de la production PV durant la nuit et les journées de mauvais temps (TotalEnergies, 2023). Selon Simon (2015), ce report de la consommation d'énergie renouvelable rend la batterie extrêmement attrayante, puisqu'elle permet le lissage de la consommation en déchargeant l'énergie sur plusieurs cycles.

Il est important de préciser que toutes les installations PV ne disposent pas de batterie et que son utilité dépend à ce stade des réglementations, de la puissance crête installée, ou encore des habitudes de consommation. Elle n'est dès lors pas indispensable au bon fonctionnement d'une installation.

La batterie est sollicitée lorsque les panneaux produisent plus que ce qui est demandé par le système électrique, soit quand la production dépasse la consommation. En effet, les panneaux alimentent le système électrique et le surplus va être dirigé vers la batterie qui va charger et accumuler l'excédent. La batterie est constituée d'accumulateurs qui stockent l'énergie à travers un processus électrochimique. Pour résumer, les batteries solaires transforment l'énergie électrique en énergie chimique grâce à une réaction issue de différents matériaux (Planas, 2021).

Comme le mentionne Planas (2021), plusieurs facteurs sont à prendre en compte durant le choix d'une batterie. Tout d'abord, il s'agit de s'intéresser à la capacité de stockage de la batterie. La charge demande également de l'énergie, d'où l'importance de se renseigner sur l'efficacité de charge donnée en pourcentage. Au plus le pourcentage est élevé, au plus la performance est élevée. Ensuite, le facteur de l'autodécharge doit être retenu car il définit la décharge automatique réalisée sans que la batterie soit sollicitée. Finalement, il convient de se renseigner quant au taux de profondeur de décharge qui représente la quantité d'énergie pouvant être obtenue d'une décharge entière. Nous pouvons illustrer cette caractéristique comme suit : « **afin de prolonger la durée de vie des batteries solaires, celles-ci ne se déchargent jamais complètement.** C'est pourquoi les batteries sont largement "surdimensionnées" par rapport à l'installation en place, **de façon à ce qu'elles ne se déchargent pas au-delà d'un certain seuil.** Si ce seuil est donné par le fabricant à 50% par exemple, alors seulement 50% de la capacité de la batterie peut être utilisée, pas davantage. » (Libow, s.d, para. 6).

#### *2.3.1.4.2 Les différents types de batteries*

TotalEnergies (2023) mentionne l'existence de quatre types de batteries PV.

##### I. Les batteries au plomb ouvert :

C'est la technologie la plus ancienne et la moins onéreuse. Cette solution nécessite d'être protégée du froid tout en étant installée dans un endroit aéré car elle libère de l'hydrogène (Libow, s.d). Malgré son faible coût, elle demande une maintenance régulière et des vérifications du niveau d'eau.

## II. Les batteries AGM :

Ces dernières ont une longévité moins élevée que les batteries au plomb ouvert mais nécessitent moins d'entretien et sont moins contraignantes dans leur usage ; elles n'émettent pas d'hydrogène.

## III. Les batteries gel :

Ce type de batterie dispose de meilleures performances que ses homologues et nécessite moins d'entretien. Elle est généralement privilégiée vis-à-vis des modèles présentés ci-dessus. Elle a par ailleurs l'avantage de ne pas dégager de chaleur ni d'hydrogène (Libow, s.d).

## IV. Les batteries au lithium :

Les batteries lithium-ion sont probablement les plus prometteuses et les plus populaires. Selon Aulanier (2016), cela est dû en partie à la croissance de la commercialisation de ces batteries par des acteurs reconnus comme Tesla ou LG Chem par exemple. D'ici 2025, la moitié du marché global du lithium devrait être dédié aux batteries.

Comme l'indique Gierczak (2019), la batterie lithium-ion est vue comme étant révolutionnaire. Elle s'est rapidement déployée dans notre quotidien au travers des smartphones, voitures électriques, etc. En outre, le prix Nobel de chimie de 2019 a été attribué à trois chimistes pour leur contribution en la matière.

Ces dernières sont plus compactes et légères que les batteries au plomb. Elles sont dès lors considérées comme étant haut de gamme et attirent l'attention pour le futur. Elles se différencient notamment par leur profondeur de décharge et leur longévité. Elles peuvent aller jusqu'à 6000 cycles de décharge à hauteur de 80% et ne requièrent pas d'entretien ou de maintenance spécifique (Planas, 2021).

### *2.3.1.4.3 Unité de mesure*

La capacité d'une batterie se mesure en kilowattheures et est représentée par l'énergie pouvant y être stockée. Pour déterminer cette capacité, il est nécessaire de multiplier l'intensité de la batterie, mesurée en ampères (A) par la tension, indiquée en volts (V) (Libow, s.d.).

### *2.3.1.4.4 Avantages et limites*

Un atout majeur du recours à la batterie est la réduction de l'intermittence de la production. La possibilité de stocker les excédents permet le report de la consommation de l'électricité et de ne pas réinjecter ce surplus sur le réseau.

Cela nous amène au point suivant qui est l'augmentation de l'indépendance énergétique. Lorsqu'il y a du soleil, le système électrique est alimenté par les panneaux. Au-delà, le moindre surplus est valorisé grâce à la batterie, diminuant le besoin de prélèvement d'électricité du réseau.

Par conséquent, limiter les prélèvements permet de diminuer la facture énergétique puisque la consommation d'énergie autoproduite augmente (Engie, 2023). Selon Energuide (2023), ces atouts permettraient également d'équilibrer les réseaux électriques car les batteries limitent les réinjections durant les pics. Cela engendre un avantage environnemental en raison de la minimisation des flux sur le réseau électrique.

Malgré les nombreux atouts de la batterie, son coût reste important ; il faut prévoir un budget oscillant en moyenne entre 5000 et 9000€ hors TVA pour une batterie solaire domestique. Au vu du coût de la technologie, la question de la rentabilité se pose ; nous étudierons cet aspect plus en détail dans un prochain chapitre.

Nous pouvons également nuancer les atouts du stockage de l'électricité verte en mentionnant l'impact environnemental des batteries lithium-ion. La mesure du bilan carbone de ces batteries n'est pas simple. Concernant la recyclabilité, « Si le recyclage des batteries lithium-ion est techniquement possible, il n'est encore mis en œuvre que de manière anecdotique. Contrairement au cobalt, le lithium n'est pas - ou presque pas - recyclé. Dommageable quand on sait qu'une batterie de voiture électrique, véhicule au bilan carbone élevé, contient entre 3 et 5 kilos de lithium... » (Greenly, 2022, para. 18).

L'extraction du lithium n'est pas sans effets. Caractérisée par des procédures énergivores en eau, l'extraction est nocive pour les sols (Greenly, 2022). Pour illustrer ces faits, nous pouvons prendre le cas de la Bolivie qui dispose de 17% des réserves mondiales. D'après National Geographic (2019), le métal pourrait être extrait du plus grand désert de sel du monde ; les enjeux économiques sont colossaux. Étant un composant essentiel de nos objets électroniques du quotidien, le recours à ce métal prend de l'ampleur et cela va probablement continuer vu l'essor des voitures électriques.

### *2.3.1.5 Les compteurs*

#### *2.3.1.5.1 Rôle et fonctionnalités*

Le compteur électrique a pour rôle de mesurer la consommation d'électricité d'un bâtiment. Ce dernier comptabilise les kilowattheures consommés. Il fournit l'index de consommation qui détermine la facture énergétique. C'est le gestionnaire du réseau de distribution (GRD) qui s'occupe de relever les index et de la maintenance des compteurs. Comme indiqué sur le site du comparateur énergie (2023), le GRD est ensuite chargé d'envoyer les informations de consommation au fournisseur d'énergie afin d'établir la facture d'acompte et de régularisation.

### *2.3.1.5.2 Les différents modèles de compteurs*

#### **I. Le compteur mono-horaire :**

Muni d'un seul cadran, ce dernier mesure la consommation et permet l'application d'un tarif normal ou simple. Il y a dès lors un seul index et le tarif reste le même entre le jour et la nuit (Ores, 2022).

D'après Luminus (s.d), ce compteur est recommandé aux propriétaires d'installations photovoltaïques lorsqu'ils produisent l'équivalent de leur consommation, ou plus.

#### **II. Le compteur bi-horaire :**

À la différence du mono-horaire, le compteur bi-horaire se compose de deux cadrans et mesure un index de jour (appelé heures pleines) et un index de nuit (heures creuses). Ce type de compteur permet l'application de tarifs différents ; consommer de l'électricité est moins onéreux en heures creuses. La répartition entre les heures pleines et heures creuses est déterminée par le GRD. Généralement, la consommation entre 7 heures du matin et 22 heures en semaine est imputée aux heures pleines, alors que les nuits et week-ends sont comptabilisés en heures creuses. Selon le comparateur énergie (2023), il est intéressant de passer à ce type de compteur lorsque la consommation en heures creuses est supérieure à la moitié de la consommation globale.

Ce compteur est conseillé lorsque la production photovoltaïque est moins élevée que la consommation. Luminus (s.d) le recommande au-delà d'une différence d'environ 1500 kWh.

#### **III. Le compteur à budget :**

Disposant des mêmes fonctionnalités qu'un compteur classique, celui-ci a la particularité de fonctionner avec un budget qui permet de contrôler la consommation. En effet, « il dispose en plus d'une fonction prépaiement qui permet à l'utilisateur de ne consommer de l'énergie qu'à hauteur du montant chargé sur une carte à puce insérée dans le lecteur du compteur. » (Comparateur énergie, 2023, para.5). Une fois le montant épuisé, il est donc nécessaire de recharger la carte pour continuer à consommer.

#### **IV. Le compteur intelligent :**

Ce compteur numérique, également appelé compteur double flux ou communicant, permet l'envoi automatique des index de consommation aux gestionnaires de réseau. En outre, il mesure l'énergie prélevée et réinjectée sur le réseau pour les propriétaires d'installations PV. Comme l'indique le comparateur énergie (2023), la Flandre a pour objectif d'équiper l'ensemble des ménages d'un compteur intelligent d'ici 2029. La situation est différente en Région wallonne et bruxelloise où seuls les ménages qui en font la demande ou qui remplacent un compteur défaillant en disposent.

### 2.3.1.6 Les récepteurs

Les récepteurs sont par définition les éléments réceptionnant l'électricité issue des panneaux ; le système électrique et les objets électroménagers, le réseau électrique ou encore une batterie.

### 2.3.2 Les parties prenantes

Maintenant que nous avons un aperçu des composants d'un système photovoltaïque, nous allons nous intéresser aux parties prenantes pour comprendre leur rôle. Il est important de pouvoir situer la place de chacun d'entre eux dans la filière en vue d'obtenir une meilleure compréhension des aspects réglementaires et des autres éléments qui seront abordés dans la suite des recherches. En outre, cela apportera une vision du déroulement du processus de vente et d'installation d'un système photovoltaïque.

Il faut préciser que nous nous intéressons ici aux parties prenantes concernées par un système de type résidentiel, de la même manière que dans la présentation des éléments clés.

#### 2.3.2.1 Les installateurs

Les installateurs, que nous pouvons également appeler les vendeurs, sont les entreprises qui consolident l'offre photovoltaïque. Généralement, ces derniers s'occupent de la partie commerciale, administrative, logistique, et de l'installation.

Ils ne produisent pas les panneaux, les onduleurs et les autres éléments présentés dans le cadre de la définition d'un système PV. En effet, les producteurs passent par des grossistes qui à leur tour vendent le matériel aux installateurs. Nous pouvons donc parler d'un processus B2B2C : Business to Business to Customer. La croissance des acteurs grandis avec la demande, en témoigne le journal *le Soir* (2023) qui précise d'ailleurs que l'année 2022 a battu les records en termes d'installations d'énergie renouvelables à l'échelle mondiale. Bobex, qui met en relation les professionnels du bâtiment en Belgique (2023), énumère quelques installateurs reconnus pour la Wallonie : Energreen, CB Energy, Mr Solar, Engie, etc.

Pour résumer de manière brève, les installateurs achètent le matériel, le revendent avec une marge et prennent en charge l'étude, l'analyse du projet, le dimensionnement, l'installation et certaines procédures administratives. Le processus d'installation d'un système photovoltaïque est généralement scindé en deux parties (Horizon Energie, 2023).

- 1) **La partie toiture**, qui concerne l'installation et le câblage des panneaux, généralement jusqu'à l'entrée de la maison. Cette partie est réalisée par des couvreurs sur divers types de toitures : tuile, ardoise, bac acier, tôle ondulée, roofing (toiture plate) ou même au sol. L'acheminement du matériel en toiture requiert parfois l'utilisation de nacelles, lifts ou grues.



- 2) **La partie électrique**, caractérisée par la pose de l'onduleur, le raccordement de l'installation et sa mise en service. Cette étape est réalisée par un électricien. La plupart du temps, l'onduleur est installé dans une cave ou un garage et l'installation à proximité du tableau électrique est privilégiée. Il peut arriver qu'il soit installé en extérieur.

Certains fournisseurs d'onduleurs, comme SolarEdge (s.d) mettent à disposition une plateforme de suivi de la production. L'installateur donnera dans ce cas au client un accès à l'application de suivi au propriétaire de l'installation, qui offre une visibilité sur la production et qui fournit des informations grâce à la connexion de l'onduleur au WiFi. Cette plateforme de suivi que l'on peut aussi appeler monitoring (surveillance en français) est également disponible pour l'installateur qui peut voir les données de production de ses clients installés et réagir en cas de panne (voir annexe 3 : aperçu visuel de la plateforme de monitoring SolarEdge).

Une fois ces deux étapes réalisées, l'installateur assure le suivi administratif du client dans la mesure où cela fait partie de son offre. En Belgique, ce suivi varie en fonction des régions. Nous aborderons en détail les réglementations plus tard (cf. infra p. 24).

#### *2.3.2.2 Les prosumers*

Selon la CWaPE (2023), le terme prosumer provient de la contraction des termes anglais Producer (producteur) et Consumer (consommateur). Les propriétaires d'installations PV utilisent le réseau électrique pour prélever de l'électricité et pour réinjecter leur surplus de production photovoltaïque. Ce sont donc des producteurs d'énergie et également des consommateurs. Généralement, ces derniers sont munis d'installations d'une capacité inférieure ou égale à 10 kVA. Les systèmes PV résidentiels sont, sauf exception, inférieurs ou égaux à cette puissance. Pour résumer, le terme prosumer est utilisé pour définir les propriétaires d'installations PV. Nous l'utiliserons dès lors pour identifier les propriétaires d'installations PV inférieures ou égales à 10 kVA.

Comme le souligne Luminus (s.d), ce terme correspond aux personnes qui disposent d'une installation de production d'électricité décentralisée. Il arrive donc que le terme prosumer soit aussi utilisé pour les personnes munies d'installations éoliennes, hydrauliques ou encore de cogénération.

#### *2.3.2.3 Les fournisseurs d'électricité*

KillMyBill (2023) indique les principaux producteurs d'électricité en Belgique : Engie Electrabel, Luminus, Eneco, TotalEnergies, Ecopower, etc. Il est à noter que l'électricité est une énergie secondaire, c'est-à-dire qu'elle est issue d'une transformation d'une énergie primaire directement issue de l'environnement.

L'électricité vendue par ces fournisseurs est issue de :

- L'énergie primaire fossile : provenant des centrales nucléaires et des centrales thermiques.
- L'énergie primaire renouvelable : provenant d'énergie solaire, éolienne, hydraulique, de biomasse ou encore de biogaz.

Afin d'encourager la transition énergétique, de plus en plus de fournisseurs d'électricité mettent en œuvre des offres liées au photovoltaïque. Callmepower (2023) cite l'exemple d'Eneco, fournisseur d'énergie verte. Ce dernier a lancé son offre « Toit Solaire » prenant en compte la production et la consommation.

Certains fournisseurs d'électricité ont récemment décidé de facturer des frais additionnels aux prosumers. Selon Sury (2022), ils justifient ces frais à travers leur obligation de transmettre quotidiennement un programme journalier d'équilibre au gestionnaire de réseau de transport Elia. Cela a pour objectif de permettre au gestionnaire de préserver l'équilibre sur le réseau électrique, c'est-à-dire de s'assurer que l'ensemble des consommateurs soient alimentés en électricité. Il peut arriver qu'un fournisseur se trouve dans une situation de déséquilibre, par exemple si la consommation est en pic ou que la production est plus faible que prévu. Dans ce cas, Elia lui facture des frais de déséquilibre.

Ces frais additionnels ont pour objectif de couvrir les coûts d'équilibrage ; certains fournisseurs ont pris la décision de transférer ce coût sur le client final. Calculés de manière forfaitaire, ils varient selon les fournisseurs et la puissance installée. Certains fournisseurs comme Engie, Luminus ou encore Eneco expriment ne pas envisager de mettre en place ce forfait panneaux solaires.

Figure II : Forfait d'équilibrage par fournisseurs

Fournisseur	Forfait « panneaux solaires » mensuel
Mega	12 €/kVA
TotalEnergies	5 €/kVA
OCTA+	10,60 €/kVA
Trevion	2,75 €/kVA

Source : Callmepower. (2023). *Panneaux solaires et photovoltaïques : prix, tarif prosumer*. Récupéré le 08 avril 2023 de <https://callmepower.be/fr/energie/guides/environnement/panneau-solaire#tarif-prosumer-et-forfait-panneaux-solaires>

Pour un prosumer, le choix du fournisseur sera donc influencé par ses tarifs, sa compétitivité ainsi que l'existence ou non d'une offre photovoltaïque.

Lorsqu'un changement de fournisseur est envisagé, Sury (2022) recommande d'être vigilant concernant les délais. Il est conseillé d'opérer ce changement à une date proche du décompte annuel afin d'éviter une éventuelle perte de production PV qui serait engendrée par un relevé de compteur prématuré.

#### *2.3.2.4 Les gestionnaires de réseau*

« Le gestionnaire de réseau de distribution (GRD) assure l'exploitation, l'entretien et le développement du réseau de distribution d'électricité et de gaz naturel. L'électricité et le gaz naturel transitent par ce réseau de distribution avant de parvenir à votre domicile. Le GRD assure en outre le relevé des compteurs de votre habitation. » (CREG, 2018, para.1).

Le GRD a pour fonction de distribuer l'électricité dans la zone géographique qui lui a été affectée. Il est responsable de la maintenance des équipements de distribution et du bon fonctionnement de ces derniers. Il est également tenu d'assurer le relevé des compteurs. En Belgique, nous pouvons citer comme GRD : AIEG, AIESH, ORES, Sibelga, ou encore Infrax. Pour résumer, les missions du GRD sont l'entretien des réseaux d'électricité, la gestion des compteurs et des données de consommation, ainsi que les services attelés à l'organisation du marché.

Selon KillMyBill (2023), le GRD n'est pas à confondre avec le gestionnaire du réseau de transport (GRT). En Belgique, c'est Elia qui est chargé du réseau de transport de l'électricité. Ce dernier assure un rôle dans l'approvisionnement en énergie. Leurs infrastructures sont rattachées aux centrales électriques, aux installations des GRD ou encore aux consommateurs industriels importants.

#### *2.3.2.5 Les organismes agréés*

Selon Certinergie : « Un organisme de contrôle agréé est une société sous forme d'ASBL qui a reçu un agrément du ministère de l'Économie afin d'effectuer certains types de contrôles légaux (Gaz et Électricité). » (Certinergie, 2020, para.1).

Ces derniers sont notamment sollicités dans le cadre de contrôles d'installations photovoltaïques. Comme le précise Sury (2022) dans son guide d'investissement vers un système PV, même si l'installation est finalisée, il n'est pas autorisé d'en bénéficier tant que celle-ci n'a pas été contrôlée par un organisme et qu'elle n'est pas certifiée conforme par ce dernier. En pratique, l'installation ne peut être mise en service qu'à partir de ce moment. Lors de la pose de l'onduleur, l'électricien installe un disjoncteur photovoltaïque qu'il faut actionner pour lancer l'installation. Il est demandé de le mettre en route une fois que le rapport de conformité a été délivré par l'organisme agréé (OA) et transmis au GRD.

Cette étape est appelée un contrôle de règlement général des installations électriques (RGIE). Son objectif est de prévenir les risques liés à l'électricité. Le coût moyen de ce type de contrôle est de 150€ et généralement, l'installateur est l'intermédiaire pour la prise de rendez-vous chez son client final. Le contrôle RGIE est donc régulièrement présent dans les devis photovoltaïques.

Au-delà du contrôle de l'installation photovoltaïque, l'organisme contrôle également l'installation domestique. Le contrôleur procède par exemple à la mesure de la mise à la terre. « La mise à la terre, appelée aussi conducteur de protection, est un dispositif de protection électrique, solution installée dans une grande majorité de logements neufs ou rénovés. La mise à la terre est en revanche absente dans les logements anciens n'ayant subi aucune transformation électrique. Elle assure la protection des personnes en évacuant les courants de fuite vers la terre. » (EDF, 2023, para.1). La mesure de terre est réalisée en Ohms ( $\Omega$ ), une unité de résistance électrique. Afin que la mise à la terre soit conforme, celle-ci doit être inférieure à 30  $\Omega$ . Si la mesure est supérieure à ce niveau, il est nécessaire d'installer des piquets de terres. Ces travaux additionnels de mise en conformité sont à la charge du client. Lorsque l'installation électrique n'est pas conforme, l'électricien doit retourner faire les modifications nécessaires et il faut replanifier un contrôle RGIE (TotalEnergies, s.d.).

#### *2.3.2.6 Les assureurs*

Une fois l'installation photovoltaïque terminée, il peut être judicieux de contacter son assureur. Selon Sury (2022), la couverture de l'installation varie d'une assurance à une autre. De plus, cela apporte une valeur supplémentaire à un bien immobilier. En conséquence, la prime d'assurance habitation pourrait être révisée.

#### *2.3.2.7 Les régulateurs énergétiques*

Tout d'abord, l'essor des régulateurs énergétiques trouve son origine dans la libéralisation du marché de l'énergie. Selon de Ladoucette (2013), cela a été exacerbé à la suite de la signature du traité de Lisbonne en 2007 qui a permis de faire le point sur l'énergie. Les objectifs de l'Union européenne sont de maximiser l'efficacité énergétique, d'assurer la sécurité d'approvisionnement ou encore d'intégrer les énergies renouvelables aux réseaux.

D'après l'auteur, « l'évolution de la régulation de l'énergie reflète ce changement de paradigme. Nées du constat selon lequel la concurrence ne saurait se développer sans un accès libre, transparent et non discriminatoire aux réseaux de l'électricité et du gaz naturel, les autorités de régulation ont vu leurs compétences et leur indépendance à l'égard des acteurs de marché et des pouvoirs publics considérablement accrues ». (de Ladoucette, 2013, p. 68).

Maintenant que nous avons contextualisé le concept de régulateur énergétique, attardons-nous à la situation actuelle dans le pays et leur lien avec le photovoltaïque. Quatre régulateurs sont présents en Belgique. Leur rôle est similaire, il est de réguler le marché de l'énergie. Comme indiqué ci-dessus, la libéralisation du marché de l'énergie requiert la mise en place de règles, d'où la nécessité de créer des organismes indépendants qui assurent le rôle de contrôle. Par ailleurs, c'est eux qui attribuent les certificats verts en cas d'éligibilité.

#### *2.3.2.7.1 La CREG*

La commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG) est le régulateur fédéral. Il exerce donc un contrôle sur l'ensemble du pays. Selon KillMyBill (2023), leur responsabilité s'attèle au conseil envers les autorités publiques. Il privilégie l'intérêt général sur le marché et est dès lors attentif à la situation des consommateurs. Le régulateur approuve la tarification mise en œuvre par les GRT et met en place les réglementations au niveau du réseau de transport fédéral d'électricité. Il est également tenu de maintenir la compétitivité et la transparence au sein du marché.

#### *2.3.2.7.2 La CWaPE*

C'est le régulateur de la Région wallonne : Commission wallonne pour l'énergie. Celui-ci exerce majoritairement deux missions. D'une part, il conseille les autorités wallonnes au sujet du marché énergétique. D'autre part, il surveille le respect des réglementations mises en œuvre par les autorités régionales. Par exemple, il valide les tarifs appliqués par les GRD wallons.

#### *2.3.2.7.3 Brugel*

Ce régulateur s'occupe de la région Bruxelles-Capitale. En parallèle aux missions équivalentes à celles de la CWaPE que Brugel exerce, il se charge également du marché de l'eau et en contrôle les prix (Comparteur Energie, 2022).

#### *2.3.2.7.4 La VREG*

Le régulateur du territoire flamand occupe également un rôle de contrôle et de conseil. Parallèlement, il octroie des licences aux GRD et aux fournisseurs désireux d'approvisionner les clients et émet des certificats d'origine pour les producteurs d'énergies vertes.

## *2.4 Le cadre photovoltaïque en Belgique*

La Belgique a mis en place des mesures de soutien en favorisant l'adoption d'installations photovoltaïques pour les gares ferroviaires nationales, les bâtiments publics et même les systèmes flottants. En réponse à l'invasion russe de l'Ukraine, le gouvernement belge a attribué un budget de 1,2 milliard à l'accélération de la transition énergétique.

Dans le cadre d'un projet photovoltaïque flottant à Ostende, un budget de deux millions d'euros a été débloqué. Celui-ci sera le premier parc photovoltaïque maritime en Belgique et a pour objectif d'étendre les connaissances en la matière. Si ce projet de démonstration se déroule bien, une enveloppe de 10,5 millions d'euros sera attribuée à des projets similaires dans les parcs éoliens belges. Selon Vande Weyer (2022), les perspectives de production solaire sont d'un gigawatt pour la première zone offshore belge. Une proposition de projet de panneaux flottants dans la zone éolienne a été approuvée par le conseil des ministres.

Philippe Henry, le ministre wallon de l'Énergie, souhaite encourager les investissements photovoltaïques auprès des agriculteurs : « **Aujourd'hui, ce secteur représente 13% des émissions de gaz à effet de serre en Wallonie.** C'est significatif. Le monde agricole **a donc un rôle à jouer dans la transition climatique** et l'adaptation climatique deviendra de plus en plus un élément important pour le monde agricole » (cité par Lefèvre, 2022, para.2). L'objectif est d'utiliser le plan de relance comme levier dans l'accompagnement des agriculteurs vers ce type d'investissements. Il faut en effet valoriser leur surface de toiture disponible.

Dans son rapport Renewables 2022, l'AIE (cf. supra p.6) estime que le recours au renouvelable pourrait dépasser les 50% en Belgique, avec une dominance du photovoltaïque et de l'éolien. Un élément pouvant expliquer la part importante de production d'électricité photovoltaïque est la combinaison d'incitants fédéraux et régionaux, qui ont favorisé l'adoption d'installations en réduisant le retour sur investissement des particuliers et entreprises (cf. infra p.24).

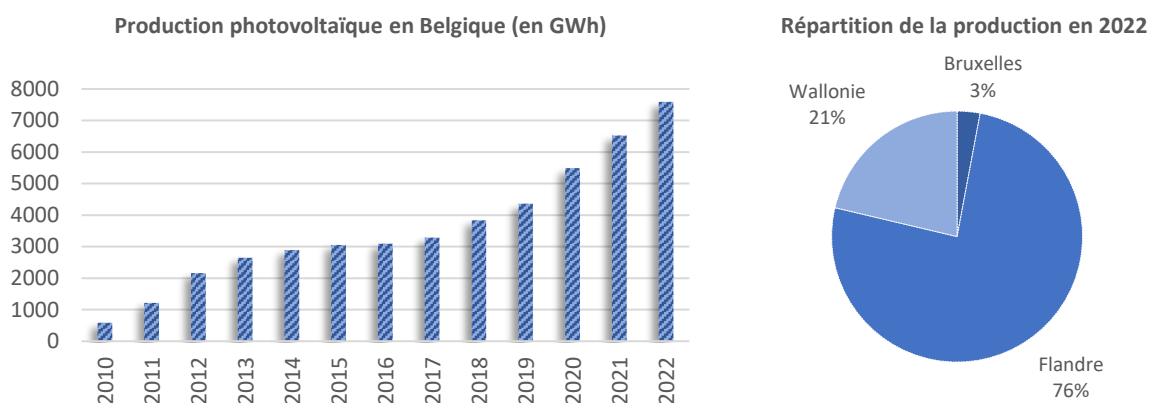
Sans grande surprise, la production belge d'électricité issue du photovoltaïque est en croissance en réponse à l'augmentation de la facture d'énergie. Selon Chavagne (2023), la croissance de la production d'électricité solaire a été de 35% en 2022. En effet, 465.802 foyers ont produit 1630,3 GWh (Gigawattheure) en 2022 contre 1230,1 GWh pour 351.442 foyers en 2021. Nous pouvons comparer ces données avec la consommation totale d'électricité en Belgique en 2022 qui, selon Elia (2023), a atteint 81,7 TWh. La production d'électricité solaire correspondait à 7,3% du mix électrique.

Toujours selon Chavagne (2023), cette augmentation de la capacité de production entraîne des conséquences. En effet, l'arrivée de nouveaux producteurs augmente la quantité d'électricité réinjectée sur le réseau. Durant les pics, cela peut provoquer des surtensions. Lorsque le réseau est saturé, des sécurités se déclenchent automatiquement au niveau de l'onduleur qui se déconnecte. Cela engendre donc des pertes de production, d'autant plus que ces coupures ne sont pas toujours visibles ou alertées dans les applications de suivi. Les prosumers vont donc consommer l'électricité du réseau durant ces périodes et l'acheter alors qu'elle aurait pu être produite par leurs panneaux.

Pour prévenir ces pertes, l'ASBL BeProsumer (2021) accompagne ses membres et défend ses intérêts. La plateforme permet de géolocaliser les installations photovoltaïques ainsi que les décrochages du réseau. Elle conseille de maximiser la consommation d'électricité durant les périodes d'afflux. Cela permet de limiter la quantité réinjectée et par conséquent la surcharge du réseau.

L'observatoire photovoltaïque (2022) recense les données de production en Belgique. En 2022, plus de 7 TWh (térawattheure) ont été produits. Cela représente 9% de la consommation totale d'électricité. La puissance crête cumulée et installée dans le pays équivaut à 8 réacteurs nucléaires. Les figures ci-dessous offrent un aperçu de la répartition et de la production du pays.

Figure III : évolution de la production PV en Belgique (gauche) et répartition selon les régions (droite)



Source : Énergie Commune (2021). *Observatoire photovoltaïque*. Récupéré le 26 mars 2023 de <https://energiecommune.be/statistique/observatoire-photovoltaïque/>

#### 2.4.1 Les réglementations et incitations

Maintenant que nous connaissons le fonctionnement d'un système PV et que nous connaissons les parties prenantes et leur rôle, nous avons toutes les cartes en main pour comprendre les réglementations liées aux systèmes PV.

Nous nous concentrerons ici sur les installations de type « résidentielles » et donc inférieures à 10 kVA, car les règles diffèrent au-dessus de ce niveau. Dans cette partie, nous mettrons en lumière les mécanismes selon chaque région.

L'objectif de cette partie est de déceler les différences applicables entre les régions et plus tard, de comprendre l'impact que cela pourrait avoir dans le cadre de l'investissement dans un système PV. Les incitants mis en place pourraient impacter la rentabilité d'un système PV c'est pourquoi il faut les prendre en considération et anticiper les changements.

#### *2.4.1.1 Au niveau fédéral*

Il n'y aura pas beaucoup à développer dans cette partie, car les réglementations varient selon les régions, mais nous pouvons donner l'exemple de la réduction de TVA comme incitant.

Le gouvernement belge a réduit la TVA à 6% pour le photovoltaïque du premier avril 2022 au 31 décembre 2023. Cette mesure s'applique aux habitations de moins de 10 ans, car le taux de 6% était déjà valable pour les habitations plus anciennes. L'objectif est d'accompagner les ménages dans la transition en rendant les investissements plus attractifs (Istace, 2023).

#### *2.4.1.2 La Wallonie*

##### *2.4.1.2.1 Le système de compensation*

En Wallonie, l'un des incitants les plus importants actuellement est le compteur qui tourne à l'envers, appelé système de compensation. En effet, les surplus de production d'électricité qui sont injectés dans le réseau sont comptabilisés (le compteur tourne en sens inverse), permettant aux producteurs wallons de diminuer leur facture d'électricité grâce à leur installation photovoltaïque.

Pour résumer, ce système a pour objectif de stimuler les investissements dans des systèmes photovoltaïques. Chaque kilowattheure injecté dans le réseau est valorisé pour le propriétaire des panneaux. Selon Comparateur Énergie (2023), la directive européenne « Electricity Market Design » de 2019 conseille aux états membres d'arrêter cette compensation pour rendre l'utilisation des réseaux plus équitable. Ce besoin d'équité de l'utilisation du réseau nous amène au point suivant qui aborde le tarif prosumer.

##### *2.4.1.2.2 Le tarif prosumer*

Afin de faire participer les producteurs d'électricité verte aux frais de gestion du réseau de transport et de distribution, le tarif prosumer a été mis en place. Selon la Wallonie, « il ne s'agit pas d'une taxe, mais d'un tarif pour l'utilisation des réseaux de transport et de distribution de l'électricité » (Wallonie, 2022, para.1).

L'objectif de sa mise en place est donc de rendre l'utilisation du réseau plus équitable entre les utilisateurs. Avant la mise en place du tarif, seuls les consommateurs sans panneaux et les prosumers qui consommaient plus que ce qu'ils ne produisent supportaient les coûts d'utilisation du réseau (Wallonie, 2022). Cela veut dire qu'un prosumer peut injecter gratuitement de l'électricité sur le réseau mais qu'il paye pour son utilisation en fonction de la quantité qu'il prélève. La finalité de ce tarif est d'entretenir la qualité du réseau mais également d'encourager l'autoconsommation. Nous définirons plus en détail ce concept dans le prochain chapitre (cf. infra p. 38). Entré en vigueur en octobre 2020, le tarif prosumer était au départ exonéré à 100%. En 2022 et 2023, l'exonération s'élève à 54,27%.



Le calcul du tarif prosumer se distingue de deux façons selon la CWaPE (2020). D'une part, il y a les personnes munies d'un compteur double flux ou intelligent. Dans ce cas, le tarif est calculé sur base des prélèvements réels bruts et non sur base forfaitaire. Ce tarif proportionnel est possible car le compteur double flux calcule séparément l'énergie prélevée et l'injection.

D'autre part, nous retrouvons les prosumers ne disposant pas de compteur communicant. Pour ces derniers, la CWaPE (2020) a posé l'hypothèse que 37,76% de l'énergie produite était directement consommée. « Le tarif prosumer consiste donc à faire contribuer le prosumer aux coûts du réseau à hauteur de 62,24 % de ce qu'aurait payé un utilisateur du réseau classique, pour les composantes distribution et transport (y inclus les surcharges y relatives), pour une consommation électrique équivalente. » (CWAPE, 2020, p.4).

Le calcul du tarif prosumer se fait sur base de la puissance électrique nette développable (kWe). Pour comprendre cet indicateur, vous trouverez ci-dessous l'exemple donné par la CWaPE.

Figure IV : Explication de la puissance électrique nette développable (kWe)

Puissance installée	Puissance maximale réalisable (sortie onduleur)	Puissance électrique nette développable
3,8 kWc	3,5 kVA	3,5 kWe
3,8 kWc	4 kVA	3,8 kWe

Source : CWaPE. (2023). *Qu'est-ce que la puissance électrique nette développable de mon installation ?* récupéré le 11 avril 2023 de <https://www.cwape.be/node/4198>

La puissance électrique nette développable est la puissance la plus faible entre la puissance crête installée et la puissance de sortie de l'onduleur.

Ces deux modes de calculs nous amènent à nous demander à partir de quand il est intéressant d'opter pour le tarif proportionnel avec un compteur double flux. Dans le cas où le prosumer aurait une autoconsommation de plus de 37,6%, le tarif réel permettrait de payer des coûts de réseau inférieurs à ceux qui seraient payés dans le cadre d'un tarif forfaitaire. Toutefois, la CWaPE (2020) précise que la différence de coût est relativement faible pour les petites installations, car les coûts de distribution et de transport sont faibles, contrairement à une installation importante où il est recommandé de s'équiper d'un compteur double flux.

La CWaPE met à disposition un simulateur pour aider les prosumer dans leur choix entre les deux tarifs (voir annexe 4 : simulateur Prosumer de la CWaPE).

Figure V : coût du tarif prosumer forfaitaire

Tarif prosumer capacitaire TVAC			
exprimé en €/kWe	2021	2022	2023
AIEG	67,43	67,27	65,5
AIESH	86,34	86,5	86,91
ORES NAMUR	88,16	88,5	88,21
ORES HAINAUT	85,47	85,95	84,86
ORES EST	99,39	99,26	98,53
ORES Luxembourg	90,29	90,63	91,63
ORES VERVIERS	98,79	99,07	97,08
ORES BRABANT WALLON	79,24	79,51	79,52
ORES MOUSCRON	79,67	80,31	82,26
RESA	77,06	76,87	77,19
REW	90,75	92,1	88,67

Source : Commission Wallonne pour l'Energie (CWaPE). (2020). *FAQ – Tarif prosumer*. Récupéré de <https://www.cwape.be/sites/default/files/cwape-documents/20e11-FAQ%20Prosumer-mise%20%C3%A0%20jour.pdf>

#### 2.4.1.2.3 Les changements à venir

L'exonération du tarif prosumer (54,27% d'exonération en 2023) est valable jusqu'au 31 décembre 2023. Dès le 1<sup>er</sup> janvier 2024, le tarif sera adapté et passera à un coût prosumer réel avec l'obligation de passer à un compteur double flux. En outre, le système de compensation va disparaître. Pour résumer, il n'y aura plus aucun soutien dès le début de l'année 2024. Toutes les installations photovoltaïques réalisées et certifiées par l'organisme agréé avant le 31 décembre 2023 bénéficieront toutefois du compteur qui tourne à l'envers jusqu'en 2030.

En 2024, c'est donc un tarif différencié qui va être mis en place, c'est-à-dire qu'il sera possible de vendre l'électricité réinjectée. Le surplus de production pourra être vendu au fournisseur d'électricité à un prix moins élevé que celui auquel on l'achète, d'où le terme de tarif différencié. « Le but de ces tarifs différenciés est d'inciter les prosumers à consommer au maximum la production de leurs panneaux. Comme le fournisseur vend l'électricité à un tarif plus élevé qu'il ne l'achète au prosumer, il est plus intéressant de consommer sa propre production (et ainsi de minimiser ses achats) » (Lambrecht, 2022, para.12).

### 2.4.1.3 La Flandre

#### 2.4.1.3.1 Le tarif d'injection

En Flandre, le tarif de compensation n'est plus d'application, mais bien le tarif d'injection. Le principe de ce tarif est que l'on paye pour l'électricité prélevée et en parallèle, on reçoit un montant qui varie selon la quantité réinjectée. Le montant reçu correspond uniquement à la composante électrique, c'est-à-dire qu'il ne prend pas en compte la partie liée au transport et à la distribution. Concrètement, cela veut dire qu'on revend l'électricité à un prix moins élevé que celui auquel on l'achète. Selon Sury (2021), ce tarif a été adopté le 1<sup>er</sup> janvier 2021. C'est également à ce moment que le principe du compteur qui tourne à l'envers a été arrêté.

Le tarif prosumer n'est pas d'application en Flandre. D'ailleurs, il est maintenant obligatoire de se munir d'un compteur communicant pour mesurer le volume d'électricité réinjectée. Depuis le début de l'année 2021, celui-ci est placé automatiquement et gratuitement lors de l'achat d'un système PV.

#### 2.4.1.3.2 Revente et partage des excédents

Une nouveauté intéressante et innovante de 2022 est la revente des surplus de production d'électricité. Selon La Libre Eco (2022), il est possible depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2022 de revendre l'excédent à ses voisins ou à une adresse bien précise. Les conditions sont d'avoir des panneaux PV, un compteur communicant et un surplus à livrer. Dans la pratique, il est possible de livrer l'électricité à une adresse ; cela peut être chez un ami, un voisin, de la famille ou pour une résidence secondaire. Le receveur doit lui aussi disposer d'un compteur numérique. Pour se lancer, il faut faire la demande auprès du GRD flamand Fluvius. Cette nouveauté est possible avec une seule adresse.

#### 2.4.1.3.3 Systèmes de primes

Afin d'encourager les investissements, la Flandre a mis en place un système de primes. Ce dernier a un impact non négligeable sur la rentabilité d'un système PV. Selon Engie (2023), il existe en effet une prime sur l'achat des panneaux PV de même que pour les batteries de stockage. Néanmoins, cette dernière n'est malheureusement plus disponible à ce jour.

Figure VI : Prime sur les panneaux photovoltaïques en Flandre

	2022	2023	2024
Jusqu'à 4 kWc	300€/kWc	150€/kWc	75€/kWc
Au-delà de 4 kWc jusqu'à 6 kWc	+150€/kWcsupp.	+75€/kWcsupp.	+37,5€/kWcsupp.
Plus de 6kWc	-	-	-

Source : Engie. (2023). *Panneaux solaires et batterie : quels montants pour les primes en Flandre ?* Récupéré le 12 avril 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/panneaux-solaires-flandre-investir-2020-2021/>

Le montant de la prime sur les panneaux ne peut pas dépasser les 40% de la valeur totale de l'installation photovoltaïque. Le montant est dégressif jusqu'à la fin 2024 pour disparaître complètement par après.

Figure VII : Prime sur les batteries en Flandre

	2022	2023 (jusqu'au 31 mars)
0 à 4 kWh	225€/kWh	150€/kWh
4 à 6 kWh	187,50€/kWh	125€/kWh
6 à 9 kWh	150€/kWh	Aucun supplément
+ de 9 kWh	Aucun supplément	Aucun supplément
Montant max.	1725€ 40% de la facture	850€ 40% de la facture

Source : Solvari. (2023). *Prime pour la batterie domestique en 2023 : Aperçu complet*. Récupéré le 12 avril 2023 de <https://www.batteriedomestique.be/prime#:~:text=Le%20gouvernement%20flamand%20a%20d%C3%A9cid%C3%A9,plus%20%C3%A9ligible%20%C3%A0%20la%20prime.>

Comme vous pouvez le voir dans le tableau, la prime sur les batteries n'était disponible que jusqu'au 31 mars 2023. Initialement, celle-ci devait être d'application jusqu'à la fin de l'année 2024 de manière dégressive. Cependant, le gouvernement a mis fin à cette prime de manière anticipée. Toute installation réceptionnée après la fin mars ne sera donc plus éligible. Selon Sury (2022), 18.000 demandes de primes ont été réalisées en 2021, alors que 30.000 en sont prévues pour 2022, soit un budget de 45 millions d'euros. L'arrêt de la prime a pour conséquence de doubler la prime disponible pour les chauffe-eaux thermodynamiques, qui eux aussi permettent l'économie d'énergie.

Avec l'aperçu que nous avons du montant des primes octroyées par la Flandre, il est intéressant de donner l'exemple d'une installation résidentielle afin de se faire une idée du montant qui peut être espéré en 2023.

Prenons par exemple le cas d'une installation de 6 kWc avec une batterie de 10 kWh. Au niveau de la prime sur les panneaux, nous avons une première tranche jusqu'à 4kWc équivalant à 150€ par unité et 75€ par kWc additionnel. Nous avons donc  $(4 \times 150\text{€}) + (2 \times 75\text{€}) = 750\text{€}$  de prime. Ensuite, pour la batterie, la prime n'est plus disponible ; elle aurait été de 850€ dans le cadre d'une réception avant la fin du mois de mars.

#### 2.4.1.3.4 Procédure de demande de prime pour les panneaux

Pour obtenir la prime, il est nécessaire de suivre des étapes bien précises. Fluvius, le GRD flamand (2023) détaille ces étapes.

Tout d'abord, la date de la réception par l'organisme agréé détermine le montant qui sera valable pour la prime.

Ensuite, le propriétaire de l'installation introduit les documents et fiches techniques auprès de Fluvius pour notifier son installation. Si cette déclaration n'est pas faite dans les 3 mois suivants la date de réception, le droit à la prime est perdu.

Une fois que cette déclaration est traitée par Fluvius, ces derniers attribuent un « numéro G » qui identifie l'installation PV. Si le propriétaire ne dispose pas encore d'un compteur intelligent, Fluvius viendra l'installer automatiquement.

Lorsque ces étapes sont réalisées et si les conditions sont remplies, la demande de prime peut être achevée sur le site de Fluvius.

L'une des conditions pour être éligible à la prime en Flandre est de passer par un installateur qui dispose d'une agrégation RESCert. C'est un système de certification pour les installateurs dans le secteur du renouvelable. L'installateur suit une formation, passe un examen et doit remplir certaines conditions pour l'obtenir. Cette agrégation offre à l'installateur une preuve de qualité et fait office de certificat de compétences. Il existe une liste des installateurs certifiés RESCert et chacun d'entre eux dispose d'un numéro que Fluvius demande durant la demande de prime (RESCert, 2023).

#### *2.4.1.4 Bruxelles*

##### *2.4.1.4.1 Le tarif d'injection*

Le système de compensation n'est plus disponible depuis novembre 2021. Il a été remplacé par un tarif d'injection. Selon Engie (2023), le principe de fonctionnement est le même que dans le cas de la Région flamande. Pour rappel, cela induit que l'on paye pour l'électricité prélevée, cela s'appelle le tarif de prélèvement. D'autre part, un montant est reçu pour l'électricité réinjectée, c'est le tarif d'injection. Ce dernier est toujours moins élevé que le tarif de prélèvement, car il ne prend pas en compte les composants de distribution et de transport. Les tarifs de prélèvement et d'injection varient également selon le contrat et le fournisseur d'énergie.

Dans la pratique, la différence est qu'avec le tarif de compensation, « les propriétaires de panneaux solaires payaient, pour la partie énergie de leur facture, la différence entre l'électricité prélevée du réseau et celle injectée, alors que les frais de distribution et de transport étaient eux calculés sur la totalité du prélèvement. » (Engie, 2023, para.3). Le tarif d'injection scinde les calculs et opère des tarifs différents.

#### *2.4.1.4.2 Les certificats verts*

La Région de Bruxelles-Capitale offre des certificats verts en guise de soutien à l'investissement PV. Selon Brugel (2021), les producteurs d'électricité verte peuvent obtenir des certificats verts (CV) en fonction de leur production. En parallèle, les fournisseurs d'électricité doivent déclarer annuellement un certain nombre de CV. En effet, la région bruxelloise a mis en place un quota de CV à atteindre par les fournisseurs pour stimuler la production d'électricité solaire. « Le quota est de 14,7% en 2022 et de 18,5% pour 2023. À titre d'exemple, si la fourniture est de 8.000 MWh en 2022, il faudra remettre à BRUGEL 1.176 CV. » (Brugel, 2021, para.2). Les fournisseurs achètent donc des CV aux producteurs pour atteindre les objectifs fixés par la région ; on parle d'un marché de certificats verts. En fin de compte, les fournisseurs répercutent les coûts induits par les quotas sur tous les consommateurs finaux.

Brugel, le régulateur bruxellois, joue un rôle central dans l'organisation de ce marché car ils y gèrent les transactions, l'octroi ou encore les calculs (annexe 5 : schéma représentant le mécanisme des certificats verts).

Le nombre de CV octroyé dépend de plusieurs facteurs. Tout d'abord, le taux d'octroi évolue au fil du temps et de manière dégressive. Ensuite, cela dépend de la capacité de l'installation (kWe). Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2023, le nombre de CV octroyé a diminué pour les nouvelles installations. Selon Sury (2022), le nouveau taux sera de 1,9 CV par MWh alors qu'il était auparavant de 2,7 CV/MWh pour les installations d'une capacité inférieure ou égale à 5kW. Au niveau de la durée des CV, celle-ci est de 10 ans pour les installations certifiées. Ce système de soutien est calculé de façon à assurer un retour sur investissement (ROI) d'environ 7 ans.

Au niveau du calcul, Brugel octroie un taux de 1,81 certificat par mégawattheure ; appelé le taux d'octroi de base. Pour stimuler la demande, des coefficients multiplicateurs (CM) peuvent être appliqués à ce taux de base (Brugel, 2021).

Figure VIII : Taux d'octroi des CV à Bruxelles pour le photovoltaïque

	Coefficient multiplicateur	Taux d'octroi (CV/MWh)
<b>Taux de base</b>	<b>1,000</b>	<b>1,81</b>
0-5 kWc	1,045	1,90
5-36 kWc	0,990	1,80
36-100 kWc	0,935	1,70
100-250 kWc	0,770	1,40
>250 kWc	0,660	1,20

Source : Brugel. (2021). *Mécanisme des certificats verts*. Récupéré le 13 avril 2023 de <https://www.brugel.brussels/themes/energies-renouvelables-11/mecanisme-des-certificats-verts-35>

Pour valoriser la production d'énergie, il est obligatoire d'installer un compteur vert. Ce dernier mesure la production totale de l'installation sur laquelle sera calculé l'octroi des CV. L'ensemble de la production est comptabilisé, même le volume réinjecté dans le réseau.

En date du 13 avril 2023, le prix moyen d'un certificat vert est de 91,84€ selon les données de Brugel (2021). Un propriétaire d'une installation PV qui comptabilise une production annuelle de 4.000 kWh pourrait donc espérer obtenir 4MWh x 1,9 = 7,6 certificats verts. Au prix actuel, ce propriétaire pourrait espérer en tirer un peu moins de 700 euros. Attention, ce montant est donné à titre d'exemple et est susceptible de varier en fonction du taux d'octroi, du prix d'un CV, ainsi que de la quantité d'électricité produite.

L'octroi des certificats verts a permis l'apparition d'un nouveau modèle d'affaires encore visible à Bruxelles ; le tiers investisseur. Pour résumer, les entreprises installent gratuitement les panneaux chez l'habitant (ou auprès d'une autre entreprise) et restent propriétaires de l'installation pendant une certaine durée, généralement de 25 ans.

Selon la RTBF (2022), l'entreprise s'occupe également de l'entretien de l'installation durant cette période. D'une certaine manière, c'est comme si l'installateur des panneaux PV louait la surface de toiture à son client. Il se rémunère ensuite avec les CV qui remboursent progressivement son investissement. De son côté, le client n'a rien à gérer d'un point de vue administratif, logistique ou encore au niveau du service après-vente. Il bénéficie de la production d'électricité issue des panneaux durant les périodes d'ensoleillement. Lorsque les panneaux ne produisent pas, il prélève son électricité du réseau qu'il achète de manière conventionnelle. Le client est donc incité à consommer au maximum la production PV.

Ce modèle de tiers investisseur est fortement dépendant du taux d'octroi des certificats verts et de leur prix de vente. Il n'y a donc pas de certitude sur la viabilité à long terme de ce modèle et nous voyons déjà certains installateurs arrêter l'offre gratuite en réponse à la diminution du taux d'octroi des CV décidée par le ministre de l'Énergie et Brugel (Brusol, 2022).

#### *2.4.1.4.3 Procédure à suivre pour obtenir les certificats verts*

Pour être éligible aux CV, il faut passer par certaines procédures que nous allons détailler dans cette partie. Dans un premier temps, il est nécessaire de faire certifier l'installation par un organisme agréé, le fameux contrôle RGIE. Pour que l'installation soit validée, il est obligatoire d'installer un compteur vert à Bruxelles afin de mesurer la production solaire (Sibelga, 2023).

Une fois l'installation conforme, il faut faire la demande de changement de compteur auprès de Sibelga qui viendra installer un compteur double flux. Ces derniers délivrent ensuite « l'attestation Sibelga ».

Ensuite, c'est l'organisme agréé qui rassemble les documents techniques et informations demandées par Brugel et qui leur transmettent. Lorsque Brugel valide les documents et traite le dossier, ce dernier donne l'accès à la plateforme Greenmeter au client. Cette plateforme permet ensuite de gérer l'installation, d'encoder les index de production et d'obtenir les CV (Brugel, 2021).

Pour vendre ses CV, il est demandé de prendre contact avec les fournisseurs. À cet effet, Brugel met à disposition une liste des acheteurs. Brugel n'intervient pas dans la vente, la négociation ou toute autre étape liée à la vente, mais demande d'encoder la transaction sur leur plateforme.

Il est également possible de revendre ses CV à Elia, le gestionnaire du réseau de transport de l'électricité belge. Ceux-ci appliquent un prix minimum garanti de 65 euros par CV (Brugel, 2021).

#### *2.4.1.4.4 Revente et partage des excédents*

Selon la RTBF (2022), les communautés d'énergie ont été mises en place en 2022 à Bruxelles. Il est donc possible de revendre ses excédents de production. Pour cela, il faut que le receveur dispose également d'un compteur communicant. Il sera ensuite en mesure de bénéficier de cette énergie renouvelable à un prix avantageux. Des communautés naissent à Bruxelles et cela permet aux participants du voisinage d'acheter l'électricité à un tarif trois fois moins élevé que celui du marché.



## 2.4.2 Comparatif de la situation entre les trois régions

Afin d’avoir une vision synthétique et comparative du cadre réglementaire, il m’a semblé intéressant de rassembler les éléments clés discutés ci-dessus dans un tableau. Comme ces éléments sont changeants et impactent la rentabilité d’une installation, celui-ci nous servira dans le cadre de nos questionnements liés à la rentabilité de l’autoconsommation.

Figure IX : Tableau comparatif du cadre photovoltaïque pour les installations inférieures à 10 kVA

	Wallonie	Bruxelles	Flandre
<b>Système de compensation</b>	Actif jusqu'au 31/12/2023	Non actif depuis 2021	Non actif depuis 2021
<b>Tarif d'injection</b>	Commence le 01/01/2024 sous le nom de tarif différencié	Actif	Actif
<b>Tarif prosumer</b>	Actif avec une exonération de 54,27%. Dès 2024, l'exonération disparaît -> tarif prosumer réel	Non existant	Non existant
<b>Existence de primes</b>	Non	Non	Oui, prime sur les panneaux. La prime batterie n'est plus disponible depuis mars.
<b>Certificats verts</b>	Pas disponible pour les installations <10kVA	Oui	Non
<b>Revente des excédents</b>	En validation	Oui	Oui

Source : cf. supra p.24. Les réglementations et incitations

## 2.5 Conclusion du chapitre

Pour clore ce chapitre, il convient de réaliser une conclusion intermédiaire qui fait le point des aspects abordés et qui sert de liant vers le chapitre suivant.

Tout d’abord, nous nous sommes intéressés au contexte de crise énergétique en essayant de comprendre les origines de l’augmentation des prix ainsi que l’arrivée des inquiétudes liées à l’approvisionnement. Nous avons réalisé que l’augmentation de la demande à la suite de la reprise post-covid, combinée à des niveaux de stocks bas et des tensions géopolitiques, a exacerbé l’augmentation des prix.

Cette contextualisation a permis de mettre en lumière l’avènement des énergies renouvelables et notamment le recours au photovoltaïque. Nous comprenons dès lors que la situation de crise représente un incitant considérable dans les initiatives et l’engouement vers les énergies vertes.

Après avoir fait l’état des lieux, nous avons défini un système photovoltaïque dans le but d’avoir une représentation visuelle d’une installation dans sa globalité. Vu le cadre du mémoire, nous nous sommes concentrés sur les systèmes résidentiels en nous arrêtant à des puissances de 10 kVA. Nous avons fait ce choix pour cadrer les recherches et ne pas nous éparpiller dans nos questionnements, car la réglementation et les équipements diffèrent dans le cadre d’installations plus importantes. Nous nous sommes intéressés aux rôles de chacun des éléments, les différentes déclinaisons possibles ou encore les avantages et limites de ces technologies. Nous avons découvert les panneaux PV, les onduleurs, les optimiseurs, les batteries de stockage ainsi que les différents modèles de compteurs. Cette partie définit les fondements de la recherche et a montré l’intérêt de comprendre chacun des éléments individuellement pour découvrir comment ils agissent sur le système complet pour produire de l’électricité verte.

La compréhension d’un système PV requiert également de connaître les parties prenantes. Nous avons donc défini les intervenants et leur rôle. Cette étape est importante pour les recherches, car elle permet de comprendre l’intérêt de chacun d’entre eux et de pouvoir les situer chronologiquement dans le processus d’installation d’un système PV. Nous avons découvert les installateurs, les prosumers, les gestionnaires de réseau de distribution (GRD) et de transport (GRT), les organismes agréés (OA), les régulateurs, les fournisseurs d’électricité ou encore les assureurs.

Avec ces éléments, nous avons toutes les informations à disposition pour la suite. Nous étions donc prêts à découvrir le cadre photovoltaïque en Belgique. Nous avons commencé par la situation générale du marché en nous intéressant à quelques projets et nouveautés, au contexte et aux tendances.

Ensuite, nous avons scindé les aspects réglementaires entre les trois régions. Cela a permis de mettre en lumière les divergences de procédures, de soutien et de règles entre celles-ci. En effet, les régulateurs diffèrent selon la région, ce qui impacte la chronologie et induit un cadre hétérogène dans le pays. Nous avons construit un tableau comparatif qui synthétise ces divergences, celui-ci sera utile pour comprendre l'impact des réglementations sur la rentabilité des installations.

En nous intéressant aux règles mises en place, nous avons découvert le principe du tarif d'injection qui est appliqué en Flandre et à Bruxelles, ainsi que le tarif différencié qui va être appliqué dès 2024 en Wallonie. Nous avons également vu que le tarif de compensation ne serait plus appliqué en Wallonie pour les installations réalisées à partir de 2024. L'objectif de ces changements est d'équilibrer les frais d'utilisation du réseau, mais aussi de motiver les prosumers à consommer leur électricité directement pour limiter les injections sur le réseau et augmenter leur indépendance énergétique. Nous comprenons donc qu'il y a tout intérêt pour eux à adapter leur consommation d'électricité pour faire face à ces changements. Cela nous amène au chapitre suivant qui va s'intéresser à la thématique de l'autoconsommation.

## 3 L'autoconsommation photovoltaïque : concepts et applications

### 3.1 Introduction au chapitre

L'intérêt de ce chapitre est de fournir des pistes de compréhension de l'autoconsommation. Nous allons nous familiariser avec le concept afin de disposer des connaissances théoriques nécessaires pour la suite des recherches.

Dans un premier temps, nous allons définir le cadre et nous intéresser à la différence entre l'autoconsommation individuelle et collective.

Une fois le concept défini, il convient d'apprendre à le mesurer. Pour ce faire, nous allons découvrir le taux d'autoconsommation (TAC) et d'autoproduction (TAP).

Nous pourrons ensuite présenter des exemples de solutions d'autoconsommation individuelle et collective. Cela offrira une vue précise de ce qui est possible sur le marché et des perspectives. Pour la partie individuelle, nous présenterons les habitudes de consommation, l'éclairage LED, le boiler thermodynamique, le boiler électrique et les solutions de stockage de l'électricité. Pour la partie collective, nous nous intéresserons aux communautés énergétiques et au partage d'électricité.

Ces solutions d'autoconsommation, en combinaison avec l'arrivée de nouveaux acteurs sur le réseau électrique, nous amènent à découvrir le concept de réseau électrique intelligent, également dénommé « smart grid ». Celui-ci intègre les nouvelles technologies et coordonne les besoins entre les acteurs du réseau.

La blockchain, le smartphone, le big data ou encore l'internet des objets (IoT) sont des technologies ayant un rôle à jouer au sein des réseaux intelligents et dans le développement de solutions d'autoconsommation. Nous allons les présenter pour comprendre leur intérêt.

À travers la présentation de ces concepts, la finalité du chapitre est de fournir des pistes de réponses à la question suivante : en quoi l'autoconsommation photovoltaïque peut-elle contribuer à la réduction de la consommation électrique en Belgique ?

Pour répondre à cette question, nous prendrons un recul critique vis-à-vis de l'ensemble des solutions présentées, ce qui permettra de relever les avantages et les limites, mais aussi les barrières techniques.

## 3.2 Présentation du concept d'autoconsommation

### 3.2.1 Pourquoi s'intéresser à ce concept ?

Nous avons observé dans le chapitre précédent l'avènement des énergies renouvelables. Leur caractère d'énergie primaire permet une proximité de la production qui est bénéfique et écologique, mais qui présente certaines limites ; la principale étant l'intermittence de la production d'énergie.

Nous pouvons reprendre cet extrait pour définir le caractère des énergies intermittentes : « la disponibilité, au niveau de la ressource primaire, varie sans possibilité de contrôle : le solaire, l'éolien et les énergies des courants de marée. Le solaire et l'éolien ont l'avantage d'offrir un potentiel considérable, mais n'offrent pas l'assurance de leur disponibilité au moment où l'on en aurait normalement besoin. Valorisées au travers de l'énergie électrique, elles répondent donc mal à l'impératif des réseaux électriques d'assurer en permanence l'équilibre entre la production et la demande. » (Hauet, 2019, p.25).

Lorsqu'on divise le terme autoconsommation, nous comprenons facilement qu'il s'agit de consommer soi-même la production d'électricité. Dans le cas du photovoltaïque résidentiel, il s'agit de maximiser l'utilisation de la production du système en limitant les réinjections dans le réseau.

Comme nous le mentionnons ci-dessus, le solaire photovoltaïque a un caractère intermittent qui impacte potentiellement l'équilibre du réseau. Nous souhaitons comprendre dans cette partie ce qu'est l'autoconsommation à travers des exemples concrets et déterminer l'impact que ce concept peut avoir de manière globale. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les réglementations sont changeantes et que le prosumer a visiblement tout intérêt à consommer sa propre production.

### 3.2.2 Définitions

Engie définit le concept de la façon suivante : « L'autoconsommation est un concept qui désigne le fait de consommer une ressource (alimentation ou énergie) qui a été produite par une entité, pour elle-même. Cette entité peut être un individu, un foyer ou un groupe restreint. L'autoconsommation photovoltaïque, quant à elle, désigne le fait de consommer soi-même l'énergie que l'on a produite sur place, généralement grâce à des panneaux solaires » (Engie, 2023, para.1). Pour faire simple, nous pouvons parler d'autoconsommation lorsque l'électricité n'est pas réinjectée.

Il existe deux formes d'autoconsommation que nous allons aborder ci-dessous.

### *3.2.2.1 L'autoconsommation individuelle*

Ce type d'autoconsommation est le plus répandu selon Engie (2023). Il s'agit de consommer individuellement la production de sa propre installation. Dans le cadre d'une installation résidentielle, nous pouvons imaginer rediriger cette production vers les récepteurs ou par exemple dans la charge d'une batterie de stockage ou d'une batterie de voiture électrique.

### *3.2.2.2 L'autoconsommation collective*

Nous pouvons définir ce concept comme suit : « L'autoconsommation collective consiste à partager la production d'électricité à des fins d'autoconsommation entre plusieurs consommateurs et producteurs. » (Demars, 2023, para.5).

L'objectif est donc d'autoconsommer en groupe une partie ou l'entièreté de la production. Ce modèle permet à plusieurs personnes de bénéficier de la production d'électricité verte. Cela se fait généralement en collectivité regroupée sous forme de personne morale.

Selon TotalEnergies (2023), ce mode d'autoconsommation est d'autant plus intéressant lorsque des consommateurs tertiaires et résidentiels s'assemblent. Cela permet de diversifier la répartition entre la production et la consommation et donc la création de synergies.

La possibilité de revente et de partage d'électricité verte qui est mise en œuvre en Région de Bruxelles-Capitale, en Flandre et bientôt en Wallonie peut être vue comme de l'autoconsommation collective (cf. supra p. 28).

Demars (2023) met en avant l'intérêt de l'autoconsommation collective en présentant le mécanisme de foisonnement. Grâce à la mise en relation d'une variété d'acteurs, chacun d'entre eux y trouve son compte ; consommer de l'électricité verte ou s'en délester. Le rassemblement de différents profils de consommateurs sur le réseau électrique permet d'aplatir la courbe de consommation globale. Ce mécanisme de foisonnement se produit grâce aux différences de temporalité de la consommation entre les acteurs.

Selon la commission de régulation de l'énergie (CRE), le foisonnement permet : « la réduction des fluctuations temporelles de l'intermittence et de la variabilité de la production d'énergie par la multiplication de sources éloignées. (...). Les fluctuations aléatoires de la production des sources d'énergies (...) sont statistiquement réduites lorsque ces productions sont injectées sur un même réseau électrique maillé. Plus les sources d'énergie sont nombreuses et différentes, plus la puissance moyenne dégagée est lissée. » (CRE, s.d, para.1).

### 3.2.3 Calculs et indicateurs

Nous nous intéressons ici à la mesure du niveau d'autoconsommation et d'autoproduction. Ces méthodes de calculs ont été présentées par Jouin et Poize (2022).

Les données nécessaires pour faire les calculs ci-dessous nécessitent de disposer d'un compteur double flux pour mesurer la quantité d'électricité réinjectée et tracer l'utilisation de la production.

#### 3.2.3.1 *Le taux d'autoconsommation (TAC)*

Ce taux a pour objectif de connaître la part de production autoconsommée et donc de production utilisée vis-à-vis de la production totale du système PV. Pour obtenir ce pourcentage, il faut donc prendre la production utilisée et la diviser par la production PV globale.

Par exemple, un TAC de 0,41 nous dit que 41% de la production du système PV a été utilisée par les récepteurs et n'a donc pas été réinjectée dans le réseau. Dans ce mémoire, nous cherchons à comprendre comment maximiser ce taux afin de couvrir un maximum la consommation d'un particulier.

Il faut rester vigilant dans l'interprétation de ce taux, car le dénominateur correspond à la production PV et non à la consommation électrique globale. Dans le cas de notre exemple, les 59% restants qui n'ont pas été autoconsommés ne couvrent pas forcément les besoins en électricité de l'habitation.

Selon Engie (2023), le TAC varie généralement entre 20 et 40% sans système de stockage. Ce taux relativement faible est expliqué par le niveau de soleil qui est généralement élevé entre 12h et 16h, tranche horaire durant laquelle les logements ont tendance à être vides.

#### 3.2.3.2 *Le taux d'autoproduction (TAP)*

Ce dernier n'est pas à confondre avec le TAC. En effet, le taux d'autoproduction mesure la quantité de production utilisée par rapport à la consommation électrique totale. Pour l'obtenir, il faut donc diviser la production utilisée (autoconsommée) par la consommation totale.

Dans ce cas-ci, un TAP de 0,35 voudrait dire que 35% de la consommation électrique provient du système PV et que les 65% restants doivent être prélevés du réseau. Ce taux est donc lui aussi lié à l'autoconsommation, mais au regard de la consommation globale et non du volume produit par le système.

### 3.2.3.3 Exemple de calcul

Tout d'abord, vous trouverez en annexe n°6 un graphique représentant les courbes de consommation et de production pour visualiser le TAP et le TAC.

Prenons un exemple fictif à l'aide d'un scénario pour mieux comprendre ces taux. Un ménage habite dans une maison et consomme 4860 kWh annuellement. Leur surface disponible en toiture a permis d'installer 12 panneaux PV d'une puissance unitaire de 395W. La puissance crête de l'installation est de  $395 \times 12 = 4740$  kWc. Grâce au compteur double flux qui a été installé dans l'habitation, nous pouvons connaître la part d'électricité qui a été réinjectée dans le réseau ainsi que la production totale. Sur l'année, 4120 kWh ont été produits par le système et 1600 kWh d'entre eux ont pu être autoconsommés.

- $TAC = 1600/4120 \text{ kWh} = 38,83\%$
- $TAP = 1600/4860 \text{ kWh} = 32,92\%$

Le TAP est inférieur au TAC, car la production est inférieure à la consommation annuelle. Nous pouvons interpréter ces taux en concluant que 38,83% de la production PV a pu être autoconsommée. Quant à la consommation annuelle, elle a pu être couverte à hauteur de 32,92% par le système. Les 67,08% restants ont dû être prélevés du réseau.

Il est important de préciser que ces taux peuvent aussi être calculés pour des situations d'autoconsommation collective. Pour cela, il faut considérer la collectivité comme étant un seul et même prosumer au regard du réseau électrique. Dès lors, pour calculer le TAP, il faudra additionner la quantité totale utilisée par chacune des parties prenantes et diviser ce montant par la somme des consommations de chacun (Demars, 2023).

## 3.3 Les solutions d'autoconsommation

Maintenant que nous comprenons le concept et que nous avons déterminé comment le mesurer, intéressons-nous aux solutions permettant d'augmenter ces taux.

Dans cette partie, nous nous attarderons tant aux solutions d'autoconsommation individuelles que collectives.

### 3.3.1 Les solutions d'autoconsommation individuelles

#### 3.3.1.1 L'intérêt de réaliser un bon dimensionnement en autoconsommation

Nous l'avons vu, maximiser l'autoconsommation nécessite de bien dimensionner son installation PV pour valoriser au maximum les kilowattheures produits. Selon Engie (2023), la première étape est de déterminer les données de consommation et le profil de consommateur.



Par exemple, le profil type sera différent entre un couple retraité et un ménage avec des enfants scolarisés. Ces informations sont essentielles et impacteront les besoins de l'habitation.

Avec ces informations, il pourrait être intéressant dans la suite du travail de déterminer des modèles types de profils de consommation qui serviront aux études de rentabilité et au dimensionnement d'installations types par segment de consommateur.

Un bon dimensionnement nécessite également la prise en compte d'éléments externes, comme la surface disponible en toiture, les obstacles comme les cheminées ou les velux, l'ensoleillement, l'orientation des pans de la toiture, la présence d'arbre ou d'éléments apportant de l'ombre, les réglementations et soutiens financiers, etc.

Selon TotalEnergies (2020), un bon dimensionnement implique une inclinaison des panneaux se situant entre 30 et 40 degrés. L'orientation doit être idéalement au sud ou à l'est-ouest, ou les deux réunies si cela est possible. En effet, une orientation nord implique peu d'irradiance. D'ailleurs, une orientation des panneaux en est-ouest permet un lissage de la production sur la journée, car cette double orientation permet de profiter des rayons du soleil du matin au soir. À l'inverse, une orientation sud permet plutôt un pic important, mais limité au début de l'après-midi.

Plus tard dans ce mémoire, nous construirons des modèles prenant en compte ces éléments dans le but de comprendre l'intérêt de maximiser l'autoconsommation et d'en mesurer les impacts.

### *3.3.1.2 Adapter sa consommation d'électricité*

Cette solution est probablement la moins onéreuse à mettre en place puisqu'il s'agit de fournir un effort et de revoir sa façon de consommer l'électricité. L'intérêt est de maximiser la consommation durant les heures d'ensoleillement ; il est donc intéressant de connaître l'orientation des panneaux et de privilégier certaines tranches horaires. Assez logiquement, il est recommandé de consommer lorsqu'il y a du soleil.

TotalEnergies (2020) fournit quelques conseils applicables au quotidien. Tout d'abord, il est recommandé d'utiliser les appareils électroménagers entre 12h et 16h. Les pics de productivité des panneaux s'observent durant ces horaires. Si cela est possible, autant en profiter par exemple pour faire tourner une machine à laver, un séchoir, etc.

Éviter au maximum la consommation le soir et la nuit représente également un intérêt. À cet effet, il faut être vigilant et débrancher les appareils non utilisés, privilégier la charge des smartphones et ordinateurs en journée, éteindre les lumières, etc.

Repenser ses achats d'équipements et de produits électroménagers est important. Pour cela, il faut favoriser les appareils alimentés à l'électricité pour maximiser l'utilisation de la production PV. Par exemple, à l'achat d'une cuisinière, il faudra opter pour un modèle électrique plutôt qu'au gaz.

Enfin, il est conseillé de chauffer son eau chaude sanitaire en journée. Par exemple, la configuration d'un chauffe-eau électrique est possible afin de privilégier une chauffe durant les heures ensoleillées plutôt qu'en soirée comme prévu habituellement sur ce type d'appareils.

Ces adaptations ne coûtent rien mais sont parfois difficiles à mettre en œuvre en raison de l'agenda de chacun. Un ménage qui travaille toute la journée aura plus de difficultés à programmer une machine à laver en journée qu'un couple retraité par exemple. Un peu plus tard dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux technologies disponibles afin de déterminer les solutions permettant d'optimiser la consommation.

#### *3.3.1.3 L'éclairage LED*

L'ampoule LED ne permet pas d'augmenter le taux d'autoconsommation de manière directe. En revanche, opter pour ce type d'éclairage en combinaison avec un système PV présente des bienfaits. Bien que ces ampoules soient plus onéreuses, ces dernières ne nécessitent que quelques watts contrairement à d'autres modèles. Au-delà d'être moins énergivore, elles ont une durée de vie bien plus importante, jusqu'à vingt fois plus élevée (TotalEnergies, 2020).

Passer à un éclairage LED pour une habitation permettra d'une part de limiter la consommation d'électricité durant les heures moins ensoleillées, puisqu'on éclaire généralement en soirée. D'autre part, une consommation réduite pour l'éclairage va libérer des kilowattheures de production PV pour d'autres appareils électroménagers.

#### *3.3.1.4 Le chauffe-eau thermodynamique*

Ce système est un chauffe-eau avec une pompe à chaleur, que l'on appelle également un boiler thermodynamique. Il a pour objectif de chauffer l'eau chaude sanitaire. Idéalement, il doit être placé dans une pièce non chauffée et qui comporte peu de variations de température. Ensuite, il va se servir de l'air ambiant pour chauffer l'eau. « Dans les faits, la pompe va comprimer un gaz présent dans l'air ambiant et en comprimant ce gaz, de la chaleur sera produite, chauffant alors l'eau. » (Dero, 2023, para.5).

Le boiler nécessite uniquement de l'électricité pour être alimenté et est environ trois fois moins énergivore qu'un boiler classique. De plus, il existe des primes en Belgique, mais nous n'allons pas rentrer dans les détails sur ce sujet. Pour obtenir une bonne performance, il faut chauffer un certain volume, c'est pourquoi ce système convient aux ménages de quatre personnes au minimum (Dero, 2023).

L'objectif est donc d'une part de limiter la consommation d'électricité pour chauffer l'eau, mais également d'utiliser la production PV pour alimenter le boiler.

#### *3.3.1.5 Le boiler électrique*

Toujours selon Dero (2023), une autre solution en combinaison avec les panneaux PV est d'opter pour un boiler électrique classique. Ce système peut être avantageux s'il est combiné avec un boîtier intelligent qui pilote la résistance électrique du chauffe-eau.

Concrètement, cela permet d'alimenter le chauffe-eau lorsque l'installation PV produit un excédent. Le boîtier se déclenche et permet de rediriger ce surplus vers le boiler plutôt que de le réinjecter dans le réseau. L'électricité qui est utilisée pour chauffer l'eau ne sera pas réinjectée dans le réseau, augmentant l'autoconsommation.

#### *3.3.1.6 La batterie de stockage*

##### *3.3.1.6.1 L'intérêt de stocker les excédents*

La batterie de stockage permet de reporter l'utilisation de la production qui ne peut pas être directement autoconsommée. Elle absorbe donc le surplus de la production et lui évite d'être réinjecté dans le réseau. Cela offre la possibilité de reporter la consommation de l'électricité autoproduite.

Selon TotalEnergies (2020), installer une batterie de stockage permet d'augmenter le TAC de 50%, voire jusqu'à 70%. Cela est possible car l'énergie qui n'est pas consommée en journée pourra l'être le soir ou la nuit.

##### *3.3.1.6.2 Dimensionnement*

Pour optimiser l'autoconsommation, il convient de s'intéresser au dimensionnement de la batterie. Engie (2023) fournit des conseils pour choisir la bonne capacité en fonction de son installation PV. Actuellement, les batteries proposées sur le marché varient entre 2,2 et 14 kWh. La prise en compte de la puissance crête et de la consommation annuelle de l'habitation sera de mise.

Il ne faut pas opter pour une batterie trop petite, car durant les pics de production, celle-ci pourrait ne pas être suffisamment grande pour stocker toute la production. Par exemple, prenons le cas d'une production de 15 kWh durant l'été. Si l'on se base sur l'hypothèse d'autoconsommation de 37,76% de la CWaPE, nous autoconsommons 5,66 kWh. En choisissant une batterie de 5 kWh, nous aurions un reste de 4,34 kWh ne pouvant être stockés. Cependant, une batterie de 10 kWh permettrait de stocker l'ensemble de la production et ainsi éviter toute réinjection.

La batterie de stockage est plus efficace durant les saisons où l'ensoleillement est important, car elle se recharge plus rapidement. En hiver, il est plus compliqué de remplir la batterie à sa

capacité maximale, car les journées sont plus courtes. Les perspectives d'autonomie complète sont donc faibles avec la technologie actuelle. En outre, le rendement de la batterie dépend de son niveau de charge.

#### *3.3.1.6.3 Avantages et limites*

Au-delà de contribuer à la réduction de la facture annuelle, le stockage par batterie permet de soulager le réseau électrique : « Le stockage permettrait d'avoir un surplus d'énergie sur un laps de temps relativement court, et ce laps de temps relativement court, c'est ce qu'on appelle des pics de puissance. Si vous résorbez ce pic de puissance, on n'a pas besoin de dimensionner les réseaux et les centrales nucléaires pour répondre à ce pic de puissance ». (Gigout, Mayer & Dumez, 2021, p.9).

Selon Gigout et al. (2021), le stockage est une innovation qui a joué un rôle essentiel dans le cadre du développement de la question de l'autoconsommation. Le fait de stocker l'électricité pourrait permettre la création d'économies de coûts d'infrastructure réseau en évitant des travaux de renforcement. Cela est également avantageux pour sécuriser l'approvisionnement électrique de certaines zones.

Nous avons vu que les onduleurs se coupent en cas de surtensions sur le réseau, engendrant ainsi des pertes de production pour les prosumers. Comme les batteries se chargent en courant continu, elles peuvent continuer à alimenter une habitation pendant les décrochages et par conséquent conserver l'électricité produite. (De Bruyn, 2023).

Cependant, le développement de l'utilisation de batteries de stockage est soumis à une contrainte majeure ; le coût de la technologie. Selon Liegeois (2023), il faut compter un budget qui varie entre 6000€ et 9000€ pour une batterie domestique, en fonction de la capacité de stockage. Les réglementations en place jouent donc un rôle majeur dans leur déploiement, car elles influencent l'investissement. Par exemple, l'achat de batteries domestiques a été plus important en Région flamande grâce aux primes, qui ne sont d'ailleurs plus disponibles comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (cf. supra p. 29).

Le tarif d'injection a lui aussi un caractère incitant l'autoconsommation. Comme le compteur ne tourne plus à l'envers en Flandre et à Bruxelles, les achats de batteries ont été plus conséquents, car les prosumers ont tout intérêt à limiter les réinjections.

En Wallonie, la situation est différente car le système de compensation est toujours actif jusqu'à la fin de l'année 2023. Les clients installés et réceptionnés avant cette échéance bénéficieront du compteur qui tourne à l'envers jusqu'en 2030. Selon Liegeois (2023), le réseau électrique fait office de batterie, au sens figuré. Les prosumers concernés n'ont donc pas d'intérêt financier à investir immédiatement. Pour les personnes qui seront installées d'un système PV après 2024, l'investissement dans une batterie a du sens en raison de l'application du tarif différencié et du tarif prosumer réel.

En règle générale, la durée de vie d'une batterie domestique varie de 10 à 15 ans. Vu les prix actuels, la question de la rentabilité est soulevée et il pourrait être intéressant de déterminer dans quels cas il est intéressant de s'en équiper.

Pour conclure, la batterie de stockage est un choix évident pour les personnes souhaitant augmenter leur autoconsommation. Son coût reste toutefois élevé et son intérêt dépendra de la région dans laquelle le prosumer se situe. Investir dans une batterie requiert la prise en compte des habitudes de consommation à long terme et dépend des caractéristiques de l'installation.

### *3.3.1.7 La batterie d'une voiture électrique*

#### *3.3.1.7.1 Utilisation classique*

Dans un premier temps, nous allons parler du fait de charger la batterie de sa voiture électrique grâce à la production PV.

La charge d'un véhicule électrique requiert en moyenne 2000 à 3000 kWh par année. Ces informations sont susceptibles de varier selon l'utilisation de la voiture. En comparaison, la consommation annuelle moyenne d'un ménage avec deux enfants varie entre 4000 et 5000 kWh. La charge d'un tel véhicule demande donc, si cela est possible, d'augmenter la capacité de l'installation PV (Engie, 2022).

Le dimensionnement est donc impacté par ce véhicule, qu'il faut prendre en considération dès le début du projet. Lors de l'investissement dans un système PV, il est important de penser à long terme en essayant d'anticiper les changements de consommation d'électricité.

Pour bénéficier de la production PV dans le cadre de la charge d'un véhicule, il faut pouvoir le brancher durant le pic en milieu de journée, ce qui s'avère parfois compliqué. Une batterie solaire domestique pourrait par exemple permettre de recharger la voiture en soirée ou durant la nuit.

Pour charger son véhicule directement grâce à la production, il existe des boîtiers chargeurs de véhicules électriques, appelés « chargeurs VE ». SolarEdge (s.d) est une société israélienne qui fournit des onduleurs, des solutions de stockage d'électricité, de domotique, en combinaison avec une plateforme de surveillance et de gestion de la consommation. Ils proposent notamment un boîtier VE qui permet la charge d'une voiture grâce à la production solaire. Combiner la puissance solaire à celle du réseau permet également des fonctionnalités de charge rapide. Un point intéressant à noter est que ce type de technologie est intégrée dans l'application de suivi de la consommation. Il est donc possible de contrôler la charge à distance et ainsi d'augmenter l'autoconsommation en chargeant le véhicule au bon moment.

### *3.3.1.7.2 Utilisation bidirectionnelle*

Un véhicule électrique dispose d'une batterie interne qui pourrait être utilisée de manière bidirectionnelle, c'est-à-dire qu'elle peut d'une part être chargée par le système PV, et d'autre part alimenter l'habitation en électricité lors des heures où le système ne produit pas.

Les batteries de véhicules électriques disposent d'une capacité oscillant entre 50 et 100 kWh. Sachant que la consommation quotidienne d'un véhicule est en moyenne de 10 kWh, nous pourrions imaginer que la batterie de la voiture a été chargée durant la journée et alimente la maison le soir (Engie, 2022).

En résumé, la batterie du véhicule serait capable de recevoir et de renvoyer l'électricité. Le volume excédentaire peut être renvoyé dans la maison ou dans le réseau.

Par exemple, Volvo va rendre son modèle de SUV EX90 compatible avec les systèmes bidirectionnels en réponse à l'intermittence des énergies renouvelables. Toutefois, le cadre réglementaire actuel ne permet pas encore de profiter de la technologie (Everaert, 2022).

EDI, le fournisseur de bornes de recharge du groupe D'leteren (s.d) met en lumière les avantages de cette technologie. Pour les gestionnaires de réseau, ces batteries pourraient servir de tampon durant les pics de consommation ou encore pendant les coupures de réseau. Les particuliers pourraient quant à eux charger leur voiture grâce à leurs panneaux PV en journée et ensuite décharger cette dernière le soir pour limiter les prélèvements.

L'énergie est stockée en courant continu dans la batterie du véhicule et nécessite d'être convertie en courant alternatif pour être renvoyée. Une homologation est nécessaire pour permettre la décharge des batteries de véhicules électriques.

Synergrid, la fédération des gestionnaires de réseau en Belgique, doit passer par des phases d'analyse et de contrôle pour valider ce système bidirectionnel et s'assurer de la conformité de l'électricité renvoyée. Pour le moment, la fédération est dans l'attente de normes européennes avant de mettre en place une homologation au niveau national. Tant que les systèmes de bornes bidirectionnelles ne seront validés, il n'est pas possible de renvoyer de l'électricité sur le réseau.

Au niveau de la compatibilité, il n'existe pas encore de solution uniforme en Belgique. En effet, il faut veiller à ce que la batterie du véhicule permette la décharge, mais également à disposer d'une prise fonctionnelle et répondant aux normes européennes.

Il existe également des barrières fiscales. Certaines entreprises mettent à disposition à leurs employés des bornes de recharge sur l'espace de travail. Une question se pose donc si cette électricité, stockée dans la batterie des véhicules, est ensuite utilisée le soir pour l'habitation des employés (Everaert, 2022).

La question de l'impact sur la durée de vie de la batterie du véhicule intervient également. Vu le caractère récent de la technologie, les effets de la décharge sont incertains et nécessitent l'introduction d'un cadre réglementaire, par exemple pour les véhicules en leasing.

En résumé, il existe un flou réglementaire qui constitue pour le moment une barrière pour l'investissement dans un tel système. L'évolution de la situation est à surveiller, car ces systèmes sont prometteurs. Combinés à une application de gestion et de suivi, un système bidirectionnel pourrait optimiser l'autoconsommation et répondre à la problématique de l'intermittence de l'électricité solaire.

### 3.3.2 Les solutions d'autoconsommation collectives

Le concept d'autoconsommation s'étend au-delà de la maison quatre façades avec des panneaux photovoltaïques et une batterie de stockage. Heureusement d'ailleurs, car installer des panneaux PV demande de la surface disponible en toiture ainsi qu'une certaine faisabilité technique.

L'aspect collectif sous-entend le partage et la revente d'électricité verte entre les participants. Dans cette partie, nous allons essayer de comprendre les solutions existantes afin de déterminer comment valoriser la production en la rendant accessible aux zones moins privilégiées au regard du photovoltaïque.

Prenons l'exemple d'un immeuble à appartement à Bruxelles, il est parfois difficile d'installer des panneaux PV et de partager la production, car la surface en toiture est trop faible par rapport au nombre d'appartements. De la même manière, il n'y a pas d'intérêt à investir dans un système PV pour une maison mitoyenne avec une toiture ombragée par les maisons des voisins, une mauvaise orientation et un velux au centre de la surface. Nous allons voir comment ces particuliers peuvent bénéficier de l'autoconsommation bien qu'ils ne disposent pas d'un système PV.

#### 3.3.2.1 Les communautés énergétiques

##### 3.3.2.1.1 Définition

Dans cette partie, nous nous intéressons aux communautés énergétiques locales à l'échelle d'un quartier ou d'une commune au sein de villes et villages.

La Commission européenne fournit la définition suivante : « Une communauté locale d'énergie est définie comme une association, une coopérative, un partenariat, une organisation ou une autre entité juridique contrôlée (e) par des actionnaires ou membres locaux, généralement à but non lucratif, impliqués dans la production décentralisée et les activités d'un opérateur de système de distribution, fournisseur ou agrégateur au niveau local. » (Cité par Wild, 2019, para.4).

Il existe trois principaux modèles de communautés énergétiques. D'une part, nous retrouvons les projets réalisés en collectivités locales qui souhaitent autoconsommer leur production sur les bâtiments communaux et lorsqu'il y a un excédent, le partager avec les acteurs locaux comme les commerces ou les ménages. Nous observons également des bailleurs sociaux désirant mettre à disposition une électricité verte et peu coûteuse à leurs locataires. Enfin, il y a les promoteurs immobiliers qui souhaitent proposer un modèle d'autoconsommation sous forme de micro-réseau (Fontenau, 2021).

#### *3.3.2.1.2 Les acteurs dans une communauté d'énergie*

Selon Ores (2022), une communauté énergétique regroupe différents acteurs :

- Les producteurs, qui autoconsomment et partagent leurs excédents de production avec les participants.
- Les consommateurs, qui bénéficient des surplus d'énergie produits par les propriétaires d'installations PV.
- Le représentant de la communauté d'énergie ; ce dernier peut être tant producteur que consommateur.
- Le gestionnaire de réseau de distribution, chargé de la gestion des index de la communauté. Ce dernier transmet ensuite les données au responsable de la communauté pour la facturation.
- Le régulateur énergétique, qui donne son accord pour le partage d'énergie.

#### *3.3.2.1.3 Les objectifs derrière les communautés énergétiques*

Les éléments pouvant inciter les individus à s'inscrire dans une communauté énergétique sont variés. Wild (2019) nous en explique certains que nous allons détailler ci-après.

Cette motivation peut être justifiée par une envie d'engagement écologique ou social. Cela se traduit par le recours aux énergies renouvelables étant produites localement, ou encore l'envie d'améliorer les conditions d'un quartier en privilégiant un circuit court de l'énergie et une dimension collective.

En outre, les personnes qui participent à ce type de communauté ont plus d'avantages à être dans une situation collective plutôt qu'individuelle ; on parle dès lors d'une situation gagnant-gagnant. La finalité est de mutualiser le risque, la technologie ou l'investissement afin d'en tirer une valeur supérieure à ce qui aurait été obtenu individuellement. Il y a donc un incitant économique à prendre en considération.

Augmenter son indépendance énergétique permet de sécuriser l'approvisionnement et constitue dès lors également une motivation en faveur des communautés énergétiques. Le rapprochement des acteurs locaux peut être bénéfique en cas de panne réseau.



#### *3.3.2.1.4 Quels sont les avantages de ces communautés ?*

Les communautés énergétiques permettent de créer des impacts bénéfiques sur le plan environnemental, économique et social. L'agrégation des profils de consommateurs permet d'augmenter l'autoconsommation et de limiter la mobilisation du réseau. Cela a un effet direct sur les factures des participants. En outre, ces projets sont ouverts à tous et favorisent l'inclusion. Par exemple, des ménages précarisés qui n'ont pas les moyens d'investir individuellement dans un système de production décentralisée peuvent bénéficier d'électricité verte (Service Public de la Wallonie, s.d.).

Les avantages économiques, sociaux et environnementaux découlent de la diversification des acteurs locaux et de la décentralisation créée sur le marché de l'électricité (Gobert, 2023).

Pour illustrer ces avantages, nous pouvons prendre l'exemple d'un projet pilote qui a vu le jour à Stembert, en province de Liège. Ores, l'un des gestionnaires de réseau wallon a financé une cinquantaine de panneaux PV pour des logements sociaux. Le potentiel économique offert par ce type de projet est élevé ; les bénéficiaires jouissent d'un tarif au kilowattheure qui peut être jusqu'à dix fois moins élevé que celui du marché.

Les communautés énergétiques permettent d'obtenir « une différence de 200 euros du Mwh entre le prix de production locale et ce que paie le citoyen [sur le marché de l'électricité]. Le fait de permettre aux gens de consommer directement l'énergie produite localement permet de répartir cette différence de 200 euros entre producteurs et consommateur ». (Cité par Lefèvre, 2022, para.2).

Pour résumer, les communautés énergétiques offrent la possibilité de consommer une énergie locale tout en ayant une meilleure maîtrise des coûts. Ces avantages s'expliquent par la valorisation maximale de la production, engendrée par le mécanisme de foisonnement et le rassemblement de différents profils de consommation (Jouin et Poize, 2022).

#### *3.3.2.2 Le partage d'électricité*

Cette forme d'autoconsommation collective n'est pas à confondre avec les communautés énergétiques. Il s'agit ici du partage d'électricité verte entre deux acteurs. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. supra p.28), il est déjà possible en Belgique de partager l'excédent de production d'un système PV avec un bénéficiaire au choix. L'électricité qui n'est pas autoconsommée pourra dès lors l'être ailleurs.

Pour simplifier le partage d'énergie et les initiatives d'autoconsommation, nous observons l'avènement du concept de « smart grid ».

### 3.3.3 Les « smart grids »

#### 3.3.3.1 Définition

Tout d'abord, il convient de définir ce qu'est un réseau électrique intelligent, également appelé smart grid : « Un réseau électrique intelligent est un réseau d'électricité qui peut intelligemment intégrer les actions de tous les utilisateurs qui y sont connectés - les générateurs, les consommateurs, et ceux qui font les deux à la fois - afin d'offrir un approvisionnement en électricité durable, économique et fiable. » (Ionescu, 2019, p.110).

Après avoir découvert les communautés énergétiques et la notion d'autoconsommation collective, nous comprenons l'intérêt des réseaux intelligents. Avec l'arrivée de nouveaux acteurs, concepts et technologies sur le marché de l'électricité, le réseau intelligent dispose d'un rôle d'agrégateur et nous nous intéressons dans cette partie à son intérêt.

#### 3.3.3.2 Avantages et limites

Les avantages de ces réseaux sont multiples. Ils contribuent à la stabilité des réseaux, à l'optimisation des investissements grâce au lissage des pics, et à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Ils permettent la réduction de la consommation des ménages et dès lors, diminuent la demande d'énergie carbonée durant les pics. Ils sont bénéfiques pour tous les acteurs ; les propriétaires des réseaux de transport, fournisseurs d'énergie, producteurs d'énergie ainsi que le consommateur final (Ionescu, 2019).

Si les consommateurs sont prêts à adopter les nouvelles technologies et à investir, les fournisseurs et opérateurs de réseaux prendront le tournant également.

En revanche, certaines incertitudes liées aux réseaux électriques intelligents peuvent être un frein à l'investissement : les coûts de consommation de l'électricité, de production, des équipements, l'évolution de la consommation, la réglementation ou encore la fiabilité des infrastructures réseau.

Le stockage de l'électricité pourrait s'intégrer au réseau afin d'optimiser la consommation électrique. Malgré des coûts encore peu démocratiques, les avantages sont multiples si ces dispositifs sont combinés au photovoltaïque. Ceux-ci apportent de la flexibilité au réseau, car ils permettent de répondre en cas de fluctuation de la demande et servent de sécurité en cas de mauvaises prévisions.

Les applications domotiques peuvent elles aussi être associées aux réseaux intelligents. De nombreux acteurs rentrent dans le marché énergétique et une multitude de solutions sont développées. Comme nous l'avons vu précédemment, il est possible de piloter à distance la charge d'un véhicule électrique ou encore la gestion de l'eau chaude sanitaire.

D'autres solutions peuvent être citées, comme le protocole OpenHAN. Celui-ci assure une communication entre les appareils électriques des clients et leurs compteurs, l'intérêt étant d'adapter la consommation en fonction des périodes de la journée où l'électricité est plus ou moins chère.

Au vu de la situation actuelle et des solutions ayant déjà été présentées dans ce mémoire, nous comprenons que nous sommes dans une transition se dirigeant vers ces réseaux électriques intelligents.

Les réglementations en place vont dans ce sens avec la mise en place du tarif d'injection, l'arrivée des compteurs intelligents, des primes pour les batteries, etc. Nous sentons clairement que l'autoconsommation est favorisée et que le réseau souhaite intégrer les prosumers. Nous allons voir que de nouvelles technologies se développent pour faciliter et moderniser l'utilisation du réseau.

### 3.3.4 Technologies, digital et autoconsommation

L'organisation « classique » de la chaîne de valeur électrique telle que nous la connaissons est bouleversée par l'arrivée de nouvelles fonctions : le pilotage de la demande d'énergie, la notion de consommateur-producteur, le stockage d'électricité ou encore l'équilibrage des réseaux. L'objectif du numérique est dès lors de faciliter ces changements (Popiolek, 2018).

Une combinaison d'outils technologiques est nécessaire au bon fonctionnement des systèmes d'autoconsommation collective et permet de matérialiser la notion de kilowattheure par le numérique. En effet, les acteurs de ces systèmes ont besoin d'outils de gestion, d'analyse et de surveillance.

Les réseaux électriques intelligents intègrent les technologies afin de coordonner les besoins entre les parties prenantes. Leur finalité est de limiter les coûts et impacts environnementaux tout en augmentant la fiabilité et la stabilité du réseau. Dans cette partie, nous cherchons à comprendre le rôle et l'intérêt de ces technologies pour soutenir ces objectifs.

#### 3.3.4.1 La Blockchain

Intéressons-nous ici au rôle que la blockchain peut avoir dans le cadre de la transition énergétique. Nous allons voir en quoi cette technologie est liée au concept de réseau électrique intelligent.

##### 3.3.4.1.1 Définition

La blockchain est définie comme étant : « une technologie de transmission et de stockage d'informations qui garantit des transactions particulièrement sécurisées sans intermédiaire, et peut s'adapter à de nombreuses situations » (cité par Désaunay, 2018, p. 95).

#### *3.3.4.1.2 Intérêts de lier la blockchain et les smart grids*

Cette technologie peut être utilisée dans le développement de réseaux décentralisés d'électricité renouvelable. À l'aide de contrats intelligents, elle peut servir à la décentralisation de contrats d'achat et de vente d'électricité (Désaunay, 2018).

La gestion des réseaux intelligents est complexifiée, notamment car de nombreux acteurs sont impliqués et que les sources de production d'électricité sont diversifiées. Ces contrats intelligents contribuent donc à faciliter la gestion de ces réseaux grâce à des processus automatisés.

Les contrats intelligents peuvent aussi permettre aux consommateurs de changer de fournisseur sur base des tarifs exercés. La start-up Electron est citée comme exemple. Celle-ci enregistre les données clés liées à la consommation des particuliers à l'aide de la blockchain.

Des échanges décentralisés d'électricité entre particuliers peuvent être réalisés. Afin de faciliter ces échanges, de nombreux projets voient le jour dans le monde, avec pour objectif d'augmenter l'autoconsommation entre les bâtiments.

Au-delà de ces avantages, la blockchain comporte des limites et est notamment critiquée pour la consommation électrique dont elle a besoin. De plus, les nombreux projets développés sont encore au stade exploratoire et les technologies sont coûteuses.

La question de la réglementation est également soulevée. À ce jour, il n'existe pas de régulation concrète vis-à-vis de l'utilisation de la technologie. Pour l'intégrer aux réseaux, il faudrait recevoir l'aval des régulateurs énergétiques.

#### *3.3.4.2 Le big data*

Le big data permet l'étude et la réalisation de rapports énergétiques en temps réel, permettant ainsi de détecter les tendances du réseau ou encore d'anticiper les pannes et de faciliter le partage de données.

#### *3.3.4.3 Le smartphone*

Le smartphone permet la surveillance et le pilotage intelligent de la consommation électrique. Les applications de suivi de la production offrent une visibilité précise de la production du système ou encore de l'état de la charge d'une batterie. Certaines de ces applications émettent par exemple des alertes en cas de panne.

#### 3.3.4.4 L'internet des objets (IoT)

L'internet des objets (IoT) permet une communication avec les objets, facilitant la maintenance des appareils ou encore la réalisation de mises à jour. En combinaison avec un smartphone ou un ordinateur, il est par exemple possible de contrôler la charge d'un véhicule à distance, la chauffe de l'eau chaude sanitaire, etc.

### 3.4 Recul critique de l'autoconsommation

Dans cette partie, nous allons prendre un recul critique nécessaire pour nuancer les solutions d'autoconsommation présentées ci-dessus.

#### 3.4.1 Autoconsommation individuelle

L'autoconsommation individuelle comporte plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet aux propriétaires de maisons et d'appartements d'augmenter leur indépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie traditionnels. En produisant leur propre électricité, les particuliers limitent les prélèvements et peuvent ainsi réduire leur facture d'électricité, surtout si leurs habitudes de consommation sont compatibles avec la production d'énergie solaire (De Bruyn, 2023).

L'utilisation de l'éclairage LED et de solutions de stockage d'énergie, comme les batteries domestiques, permet de maximiser l'utilisation de l'électricité produite, ce qui peut réduire la dépendance envers les réseaux électriques.

La charge d'un véhicule électrique permet également d'optimiser l'utilisation de la production. Les systèmes bidirectionnels permettent notamment d'utiliser la batterie de la voiture comme batterie domestique. Ainsi, il est possible d'augmenter l'autoconsommation en alimentant les éléments électroménagers durant la soirée.

Les technologies de chauffage électrique, comme le boiler thermodynamique et le boiler électrique, peuvent être combinées avec la production d'énergie solaire pour réduire considérablement la facture d'électricité.

Pour optimiser l'autoconsommation, une installation photovoltaïque doit être bien dimensionnée, c'est-à-dire prendre en compte les données d'implantation, le profil de consommation et anticiper les changements.

Maximiser l'utilisation de la production requiert une concentration de la consommation durant les heures ensoleillées. Bien que cela ne soit pas possible pour tous les profils de consommation, des outils technologiques existent pour faciliter le pilotage de la consommation. En effet, nous avons vu que la chauffe de l'eau sanitaire pouvait être réglable à distance, de même que la charge d'un véhicule électrique.

L'autoconsommation individuelle comporte également des limites. Tout d'abord, la production d'énergie solaire dépend des conditions météorologiques, ce qui peut rendre difficile la production suffisante d'énergie en hiver ou par temps nuageux. Le dimensionnement d'une batterie peut s'avérer compliqué pour ces mêmes raisons. Il faut veiller à opter pour une capacité qui soit suffisante pour l'été, mais pas trop importante pour la saison hivernale, afin de ne pas impacter la productivité de la batterie.

Les coûts initiaux d'installation des panneaux solaires et des équipements de stockage peuvent être élevés, ce qui peut décourager les particuliers d'investir dans un système photovoltaïque en autoconsommation. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les primes et incitations fiscales vont diminuer, voir disparaître selon les régions. Ces changements vont augmenter la durée nécessaire à l'atteinte du seuil de rentabilité de l'investissement.

### 3.4.2 Autoconsommation collective

L'atout majeur de l'autoconsommation collective est que ce système s'ouvre à tous. Les personnes n'ayant pas les moyens financiers ou techniques de se munir d'une installation photovoltaïque ont l'opportunité de consommer de l'électricité verte et locale, grâce à la communauté et au partage.

Les communautés énergétiques produisent de l'électricité en commun, ce qui réduit les coûts et facilite la gestion de l'énergie. Les producteurs y gagnent à travers la valorisation de leurs excédents de production et les consommateurs bénéficient d'un tarif réduit.

En outre, le partage d'électricité peut permettre aux communautés de devenir plus résilientes en cas de pannes de courant.

L'arrivée de nouvelles technologies contribue au développement des réseaux intelligents, notamment grâce à l'intégration des acteurs et des données. Cela offre de nombreux avantages à l'ensemble des utilisateurs du réseau ; transparence, traçabilité, simplification des processus, disponibilité de l'information, etc.

En revanche, autoconsommer collectivement nécessite une coordination entre les membres de la communauté pour gérer l'énergie produite et utilisée. Ces systèmes peuvent nécessiter des investissements initiaux importants pour l'installation d'équipements de production et de stockage. En effet, les solutions de stockage à plus grande échelle sont coûteuses et encore compliquées à mettre en œuvre.

Le développement technologique autour du concept de réseau intelligent et des communautés énergétiques n'est pas homogène, c'est-à-dire qu'il est compliqué d'arriver à un système global « tout-en-un » en rassemblant plusieurs technologies. L'utilisation de la blockchain est encore peu règlementée et rend donc une utilisation imminente de la technologie compliquée.

Il existe également des barrières dans la création d'une communauté énergétique. Au-delà de la création d'une personne morale, il est nécessaire de répondre à une série de critères et de rendre certains documents au gestionnaire de réseau ainsi qu'au régulateur énergétique. En Wallonie par exemple, il est nécessaire de respecter certaines délimitations géographiques, il faut disposer d'un compteur double flux, ou encore renoncer au tarif de compensation (Wallonie énergie, 2023). En annexe n°7, vous trouverez le schéma de la procédure à suivre pour créer une communauté énergétique.

### 3.5 Conclusion du chapitre

En conclusion, ce chapitre a permis de définir le concept et de comprendre les différences entre l'autoconsommation individuelle et collective. Nous avons également appris à mesurer le taux d'autoconsommation et d'autoproduction, et avons découvert des exemples de solutions d'autoconsommation. En outre, nous avons exploré le concept de réseau électrique intelligent, qui intègre les nouvelles technologies et coordonne les besoins entre les acteurs du réseau. La blockchain, le smartphone, le big data et l'internet des objets ont également été présentés comme ayant un rôle à jouer dans le développement de solutions d'autoconsommation.

Enfin, en prenant un recul critique vis-à-vis des solutions présentées, nous avons pu relever les avantages et les limites ainsi que les barrières techniques liées à l'autoconsommation photovoltaïque. Dans l'ensemble, ce chapitre fournit des pistes de réponses à la question de savoir comment l'autoconsommation photovoltaïque peut contribuer à la réduction de la consommation électrique. Pour aller plus en détail dans notre réponse, nous allons construire la méthodologie de la recherche.

## 4 Méthodologie : approche micro-économique

Pour rappel, ce mémoire est scindé en deux parties ; l'une dite « macro », et l'autre « micro ». L'objectif derrière cette scission est d'aborder la thématique de l'autoconsommation dans sa globalité, tout en ayant une partie dédiée à un sujet plus précis.

La partie macro qui a été réalisée dans les chapitres précédents a permis de présenter les concepts et d'en établir les effets. Nous avons pu comprendre l'autoconsommation photovoltaïque au sens large.

Dans la partie qui va suivre, nous nous intéressons plus en détail à la batterie de stockage en combinaison avec un système photovoltaïque. Nous essayerons d'identifier l'intérêt d'investir dans une batterie en fonction du profil de consommation, du niveau d'autoconsommation et d'autres facteurs externes. À cet effet, nous construirons un modèle de tableau d'analyse de rentabilité personnalisable.

### 4.1 Étapes de la construction du tableau d'analyse de rentabilité

#### 4.1.1 Définition des objectifs

Dans un premier temps, il convient d'identifier les objectifs à remplir. En précisant les éléments de réponse recherchés à travers ce tableau, nous aurons une idée plus précise sur la façon de procéder. De plus, ces objectifs serviront d'indicateurs clés de performance, c'est-à-dire que nous pourrions évaluer et tester l'efficacité du modèle en vérifiant s'il répond aux objectifs initiaux.

#### 4.1.2 Identification des facteurs clés

Cette partie sert à identifier les éléments devant figurer dans le tableau et/ou devant être pris en compte durant la construction du modèle. Nous nous demanderons donc quels sont les facteurs impactant la rentabilité de la batterie de stockage. Après cette partie, nous aurons une meilleure idée d'où et comment chercher l'information.

#### 4.1.3 Collecte de données

Il est important d'avoir des données fiables et précises pour construire un modèle pertinent. Les sources de données peuvent inclure les relevés de consommation électrique, les tarifs de l'électricité, les coûts d'investissement et de fonctionnement de la batterie de stockage, etc.

Nous nous baserons sur des recueils de données existantes, qui donneront l'accès à des informations compliquées à récolter seul. Ces dernières permettront ensuite de construire des hypothèses de travail, constituant la base du modèle construit.



#### 4.1.4 Construction du modèle

Le modèle sera créé sur un tableur Excel. Les étapes de la construction seront détaillées textuellement et le tableau final sera présenté. Les autres étapes et variantes seront indiquées en annexe (voir annexes 10 à 23). L'objectif sera de rendre le tableau personnalisable tout en incluant les facteurs clés identifiés.

#### 4.1.5 Validation du modèle

Une fois le modèle construit, nous le validerons en le comparant à des données réelles. Cela peut inclure des données de projets similaires, des analyses de rentabilité publiées, etc.

#### 4.1.6 Utilisation et évaluation

Nous utiliserons le modèle afin d'effectuer des analyses de rentabilité pour différents scénarios et dès lors identifier les cas où l'investissement dans une batterie de stockage est rentable.

Ensuite, nous prendrons un recul critique du modèle présenté en mettant en lumière les avantages et les limites. Nous vérifierons également s'il répond aux objectifs initialement définis.

## 5 De l'innovation à l'impact : la batterie de stockage

### 5.1 Introduction au chapitre

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, nous passons désormais à la partie micro dans laquelle nous allons nous intéresser à la batterie de stockage, et plus particulièrement à sa rentabilité.

Nous avons vu que le stockage de l'électricité permettait d'augmenter le taux d'autoconsommation. Dans quelle mesure est-ce que cette augmentation du TAC est-elle rentable, compte tenu des prix actuels des batteries de stockage ? Quels sont les éléments à prendre en considération pour mesurer la rentabilité de la batterie ?

Bien que ces questions soient à traiter au « cas par cas », nous tenterons dans ce chapitre d'homogénéiser les réponses à ces interrogations grâce à la création d'un tableau d'analyse de rentabilité type.

Dans un premier temps, nous définirons les objectifs et les questions auxquelles le tableau doit répondre. Cela nous donnera une direction à suivre durant la construction du modèle et facilitera son évaluation. Ces objectifs permettront d'identifier des indicateurs clés de performance, qui serviront à évaluer la méthodologie.

Ensuite, nous identifierons les facteurs clés. Nous nous pencherons sur le prix moyen d'une batterie, les tarifs de l'électricité, les données de consommation et de production, le profil de consommation, le coût de l'installation photovoltaïque, le dimensionnement et les autres facteurs externes impactant la rentabilité. Pour récolter ces informations, nous nous baserons sur la littérature existante et sur l'outil de dimensionnement de SolarEdge.

Pour la construction du tableau, nous utiliserons une analyse de rentabilité d'un système photovoltaïque inférieur à 10 kVA. Nous y ajouterons la batterie et les modifications qu'elle engendre. Le tableau final comprendra dès lors le système dans son ensemble.

Afin de valider le tableau, nous réaliserons des tests en lien avec des exemples concrets. Cela permettra de vérifier sa pertinence durant les études de cas. Nous l'utiliserons pour tirer des conclusions vis-à-vis de la batterie de stockage.

Enfin, nous pourrions évaluer la méthodologie utilisée et prendre un recul à l'égard du modèle construit. Pour ce faire, nous allons confronter les avantages, les limites et les perspectives de la batterie de stockage aux données financières et aux simulations réalisées.

## 5.2 Objectifs du tableau

Dans un premier temps, nous avons pour objectif de définir des profils de consommation cohérents. Cela demandera dans un premier temps d'identifier les facteurs clés. Pour cette étape, nous nous baserons sur la littérature existante ainsi que sur l'outil de dimensionnement de SolarEdge que j'ai la chance d'avoir à ma disposition durant ce mémoire.

Ensuite, il sera nécessaire de comprendre comment intégrer la batterie au tableau d'analyse de rentabilité. Pour cela, nous chercherons des cas illustrant l'augmentation du TAC et du TAP engendrée par la batterie. Si les informations récoltées le permettent, nous essayerons de réaliser une moyenne d'autoconsommation avec batterie selon les profils de consommation.

Pour chaque profil, il faudra déterminer le TAC et/ou le TAP avec et sans la batterie. Cela est nécessaire pour pouvoir comparer la rentabilité du système photovoltaïque avec et sans la batterie.

Afin d'être le plus précis possible dans l'analyse de la rentabilité, nous allons réaliser trois modèles de tableaux différents en fonction des régions. En effet, les aspects réglementaires et les incitants fiscaux diffèrent et sont importants à prendre en compte : taxe prosumer, tarif d'injection, primes, certificats verts, etc. L'objectif est que l'analyse soit à la page avec la situation actuelle.

Le rôle de ces tableaux est de pouvoir déterminer les conditions à remplir pour que l'investissement dans une batterie soit intéressant pour un particulier. Nous cherchons dès lors à avoir des modèles de tableaux entièrement personnalisables, faciles d'utilisation et capables d'évoluer dans le temps.

Le simple encodage de certaines données que nous aurons déterminé dans les facteurs clés doit permettre une adaptation automatique du tableau, offrant une vue d'ensemble sur les aspects financiers de l'installation. La finalité est que les données qui en ressortent soient personnalisées selon le profil du consommateur et sa position géographique.

### 5.2.1 Identification d'indicateurs clés de performance

Nous identifions ici les indicateurs clés de performance, que nous appellerons également KPI, faisant référence au terme en anglais : « key performance indicator ».

Ces derniers sont liés aux objectifs détaillés ci-dessus et permettront l'établissement d'une auto-évaluation du tableau construit.

#### *5.2.1.1 Profils de consommation cohérents*

Nous devons nous assurer de la cohérence des profils de consommation choisis. En effet, chaque type de consommateur particulier susceptible d'investir dans un système photovoltaïque doit être pris en compte. Pour ce faire, nous évaluerons les aspects suivants :

- Le nombre de facteurs clés identifiés pour définir les profils de consommation.
- La cohérence des profils de consommation identifiés.
- La précision de l'outil de dimensionnement de SolarEdge dans la définition des profils de consommation.

#### *5.2.1.2 Intégration de la batterie et comparaison de la rentabilité du système*

Il convient d'être pertinent lors de l'intégration de la batterie dans le tableau. En effet, les données à encoder devraient varier selon les différents profils de consommateur. Il est important de prendre en considération certaines caractéristiques propres à la batterie. Nous serons donc vigilants à ces points :

- Le taux d'autoconsommation (TAC) avec batterie : ce KPI mesure le pourcentage d'énergie produite par le système PV qui est autoconsommée grâce à l'utilisation de la batterie. Plus ce taux est élevé, plus l'installation est efficace et engendre des économies sur la facture d'électricité.
- Le taux d'autoproduction (TAP) avec batterie : qui représente le pourcentage d'énergie autoconsommée avec l'aide de la batterie et au regard de la production globale. Un taux élevé traduit une réduction de la dépendance envers le réseau électrique et donc des coûts d'approvisionnement réduits.
- Le temps de retour sur investissement (ROI) avec et sans batterie : il faut pouvoir observer le temps nécessaire au remboursement de l'investissement initial. Pour déterminer l'intérêt de la batterie, il est important de comparer le temps de ROI avec et sans cette dernière.
- Le coût du kWh avec et sans batterie : afin de mesurer le coût de l'électricité produite par le système, en prenant en compte l'investissement initial.
- La durée de vie de la batterie : afin d'obtenir un ROI réaliste, il est judicieux de prendre en compte la longévité de la batterie, sachant que cette dernière est moins élevée que le reste de l'installation.

#### *5.2.1.3 Modèles de tableaux différents en fonction des régions*

Comme précisé dans les objectifs, nous souhaitons des tableaux différents en fonctions des mécanismes existants selon les régions. Nous vérifierons donc :

- Les différences de ROI entre les régions pour les mêmes cas d'études (s'il y en a).
- Le nombre d'aspects réglementaires et d'incitants fiscaux pris en compte.

- L'adéquation des tableaux avec la situation actuelle de chaque région.

#### *5.2.1.4 Conditions à remplir pour que l'investissement dans une batterie soit intéressant pour un particulier*

La finalité de cette étude de rentabilité est de déterminer dans quelle mesure l'investissement dans une batterie a de l'intérêt pour un particulier. Cet outil a donc un double intérêt ; pour le particulier désireux d'augmenter son autoconsommation tout en étant rentable, mais également pour le discours commercial du fournisseur. Afin de vérifier la pertinence des données de réponses du tableau, nous nous intéresserons aux éléments suivants :

- Le nombre de conditions à remplir pour qu'un investissement dans une batterie soit rentable pour un particulier.
- Le nombre d'études de cas réalisées pour répondre à la question.
- Le nombre de données à encoder pour permettre une adaptation automatique du tableau.
- Le coût d'énergie d'une configuration de système PV + batterie en confrontation avec le coût de l'énergie prélevée du réseau électrique.

#### *5.2.1.5 Note sur les KPI*

Avant de commencer la récolte et de rentrer dans le vif de sujet ; il convient de préciser que ces KPI's ont pour objectif de s'auto-évaluer en fin de chapitre. Il est dès lors possible que nous ne puissions pas répondre à l'ensemble de ces derniers, car ils sont liés aux objectifs initiaux. Dans ce cas, nous préciserons pourquoi cela n'a pas été réalisable.

Nous construirons un tableau de suivi reprenant les résultats obtenus vis-à-vis de ces KPI's. Ce suivi permettra de conclure en relevant les difficultés rencontrées et les limites du tableau d'analyse de rentabilité (voir annexe 23 : tableau d'auto-évaluation et KPI's).

### 5.3 Identification des facteurs clés et récolte de données

Les facteurs ci-dessous devront être pris en compte dans le cadre de la construction du tableau. Durant la récolte de ces données, nous mettrons tout en œuvre pour bénéficier de l'information la plus récente possible.

Les informations prises en compte dans les tableaux et les analyses seront basées sur l'instant présent (mai 2023). La volatilité des données induit que le tableau soit évolutif.

### 5.3.1 Les profils de consommation

Nous cherchons dans cette partie à segmenter le marché belge du photovoltaïque en différents profils de consommation. Cela permettra de déterminer des modèles qui serviront aux analyses.

#### 5.3.1.1 *L'outil de dimensionnement de SolarEdge*

SolarEdge propose une plateforme de dimensionnement pour estimer les données de production des clients, faire de la conception et de la simulation (SolarEdge, s.d).

Cette plateforme sera utilisée pour l'étude de cas et les analyses. De plus, elle propose divers profils de consommation que nous allons présenter ci-dessous. En effet, il est possible d'y dessiner une installation depuis une vue satellite. L'outil fournit ensuite une aide pour dimensionner l'onduleur ainsi qu'une éventuelle batterie.

Une fois l'installation dimensionnée, un rapport est généré et indique les estimations de production et du temps de retour sur investissement (sans montrer les détails des calculs). Les données générées par le rapport prennent en compte les divers facteurs externes tels que l'orientation, l'irradiance, l'ombrage, l'inclinaison des panneaux, etc. Vous trouverez en annexe n°8 un exemple de rapport issu de cet outil.

Durant l'encodage des données clients au sein de leur plateforme, il est possible de créer un profil de consommation personnalisé, mais également de choisir un modèle préétabli. SolarEdge propose les profils suivants (SolarEdge, s.d) :

- Famille avec enfants scolarisés
- Famille avec enfants d'âge préscolaire
- Ménage avec une ou deux personnes
- Retraités ou travail à domicile
- Consommation concentrée la nuit

L'annexe n°9 montre le visuel affiché lors du choix du profil de consommation au sein de la plateforme.

Le choix du profil de consommation impactera le taux d'autoconsommation et d'autoproduction. Ce dernier est toutefois compliqué à estimer par profil de consommation, car ces taux varient selon des éléments : consommation, mode de vie, orientation des panneaux, ombrage, conditions météorologiques, etc.

Dans le point suivant, nous allons tenter de déterminer une consommation moyenne par type de profil.

## 5.3.2 Les données de consommation de l'électricité

### 5.3.2.1 Les facteurs influençant la consommation d'électricité

La situation et la composition familiale, le type de chauffage de l'habitation, l'isolation, le choix des équipements électroménagers, le type de compteur et le mode de vie déterminent la consommation annuelle d'électricité.

### 5.3.2.2 Consommation électrique des ménages

D'après le régulateur fédéral du marché du gaz et de l'électricité, la consommation moyenne des ménages se situe à 3500 kWh en Belgique. Si ces derniers disposent d'une voiture électrique, la moyenne annuelle s'élève à 8000 kWh. (CREG, 2018). Ces données varient selon la région et le nombre de personnes par ménage.

Figure X : consommation électrique moyenne selon le nombre de personnes (Belgique)

Ménage	Consommation annuelle
1 personne	1200 kWh
2 personnes	2350 kWh
Famille de (3 - 4 personnes)	3500 kWh
Famille de (4 - 5 personnes)	7500 kWh

Source : Eneco. (s.d.). La consommation d'électricité. Récupéré le 7 mai 2023 de <https://eneco.be/fr/consommation-denergie/electricite>

Les familles qui chauffent leur habitation à l'électricité atteignent en moyenne des consommations de 12500 kWh (Engie, 2019).

### 5.3.2.3 Consommation d'une voiture électrique

Afin d'ajouter l'option d'un véhicule électrique dans nos analyses, intéressons-nous à la consommation annuelle moyenne nécessaire à sa charge.

La consommation en usage réel est d'environ 20 kWh pour 100 km parcourus (July, 2023). Cette moyenne dépend toutefois du type du véhicule, du type de conduite, du poids, de la température ambiante ou encore de la typologie de la route (Renault, 2023).

### 5.3.2.4 Consommation pour l'eau chaude sanitaire

Nous avons précédemment évoqué la possibilité de gérer l'eau chaude sanitaire grâce à un chauffe-eau électrique et thermodynamique en nous intéressant à leur potentiel impact sur l'autoconsommation (cf. supra p. 43).

En s'intéressant à la consommation électrique qu'ils nécessitent, nous pourrions les inclure dans la consommation annuelle globale et voir si la rentabilité de la batterie est impactée.

La production d'eau chaude sanitaire représente entre 20 et 30% de la facture annuelle des ménages. Pour une famille de 4 personnes, un boiler électrique requiert environ 3500 kWh par an, alors qu'un boiler thermodynamique aura besoin de 900 kWh (Sury, 2022).

Pour un boiler électrique, il faut compter une consommation d'en moyenne 800 kWh par personne et par an (Mega, 2021).

### 5.3.3 Le coût d'une installation PV

Le coût d'une installation photovoltaïque dépend de plusieurs variables que nous allons préciser dans cette partie. Afin d'encoder le prix exact de l'installation, il faut idéalement être muni d'un devis adapté à l'implantation et aux désirs de production du consommateur.

Il existe 5 principaux facteurs influençant le coût d'une installation : la consommation électrique, la puissance crête de l'installation, les marques des panneaux et de l'onduleur, le type de structure et/ou de toiture, et enfin le contexte macro-économique (Bobex, 2023).

Pour comparer les prix d'une installation PV, un bon indicateur auquel se référer est le coût par watt crête (Wc). Pour rappel, cet indicateur de référence est basé sur des conditions précises qui permettent une comparaison homogène selon la capacité désirée (cf. supra p. 7).

Le prix d'une installation varie généralement entre 1,3 et 2 par Wc. Cependant, ce coût est susceptible d'évoluer selon la puissance installée. En théorie, le prix au watt-crête diminue lorsque la capacité de l'installation augmente. Une installation de 5 kWc devrait coûter environ 9000€ HTVA (Sury, 2022).

Pour calculer le coût par watt crête, il faut prendre le coût total hors TVA de l'installation et le diviser par la puissance crête qui va être installée. Reprenons l'exemple ci-dessus ; si l'on divise 9000€ par 5000 Wc, nous obtenons un prix de 1,8€/Wc.

Dans le cadre des analyses que nous réaliserons grâce au tableau, nous nous baserons sur un coût moyen de 1,8€/Wc. Ce choix s'explique par les conditions de marché actuelles mais aussi par notre cible, représentée par les particuliers qui optent pour des installations inférieures à 10 kVA. Ce tarif est le plus pertinent si les différents profils de consommation sont pris compte (Horizon Energie, 2023).

### 5.3.4 Le coût moyen d'une batterie

Nous avons vu précédemment qu'il fallait dépenser un budget allant de 5000 à 9000€ pour une batterie domestique (cf. supra p. 15).



Sachant qu'un ménage moyen consomme environ 9,6 kWh par jour, nous nous intéressons dans le cas de nos recherches aux batteries d'une capacité de 10 kWh. Cette capacité est la plus pertinente pour une configuration résidentielle type. En ce qui concerne l'installation, il convient de prévoir un budget pouvant aller de 500 à 1000€ hors TVA (Livios, 2022).

### 5.3.5 Les tarifs de l'électricité

Nous cherchons ici à déterminer un prix par kilowattheure. Ce prix est défini par les fournisseurs d'énergie et peut donc varier. En outre, le tarif que paie le consommateur final dépend des prix sur les marchés de gros. Le prix par kilowattheure comprend le facteur électricité, la redevance ainsi que les autres frais supportés par les fournisseurs (Comparateur énergie, 2023).

#### 5.3.5.1 Tarifs d'achat

La CREG fournit un tableau de bord mensuel avec les tarifs de l'électricité, classés par région. Pour notre tableau d'analyse de rentabilité, nous utiliserons les tarifs du mois d'avril 2023 (voir annexe 10 : tarifs de l'électricité en avril 2023).

En Belgique, le prix moyen était de 36,57 centimes/kWh. Voici les tarifs selon les régions :

- Wallonie : 38,94 centimes/kWh
- Bruxelles : 36,16 centimes/kWh
- Flandre : 34,61 centimes/kWh

Au vu des divergences de tarif moyen selon les régions, nous utiliserons un tarif différent selon la localisation.

#### 5.3.5.2 Tarif d'injection

Nous cherchons à déterminer à quel prix les prosumers peuvent espérer revendre leurs surplus de production. Ce tarif est valable en Flandre et à Bruxelles pour les prosumers équipés d'un compteur intelligent et varient selon les fournisseurs. Le montant obtenu va également dépendre du nombre de kWh réinjectés dans le réseau.

Comme nous l'avons vu, le montant reçu par kilowattheure ne correspond qu'à la composante électrique. Le prosumer reçoit toujours un montant inférieur pour l'électricité réinjectée que ce qu'il paierait pour la prélever (cf. supra p. 30).

Afin de déterminer le tarif d'injection le plus récent possible, nous retenons le prix d'injection moyen issu d'un comparateur énergétique. Cette moyenne se base sur les tarifs de 28 fournisseurs différents en Région flamande et bruxelloise. En mai 2023, la moyenne est de 6,73 centimes/kWh.

### 5.3.5.3 Tarif de compensation

Le compteur tourne à l'envers pour valoriser les réinjections en Wallonie. Pour la composante électricité de la facture, les prosumers payent pour la différence entre les prélèvements et les réinjections. En revanche, le transport et les taxes sont payées sur l'ensemble des prélèvements.

Afin d'estimer le gain financier obtenu grâce au tarif de compensation, nous allons nous baser sur le tarif wallon de 38,94 centimes/kWh du mois d'avril 2023. Grâce au rapport du régulateur fédéral, nous savons que 44,49% du prix correspond à la composante énergétique. Nous pouvons donc déterminer le coût de la composante électrique à 17,32 centimes/kWh (CREG, 2023).

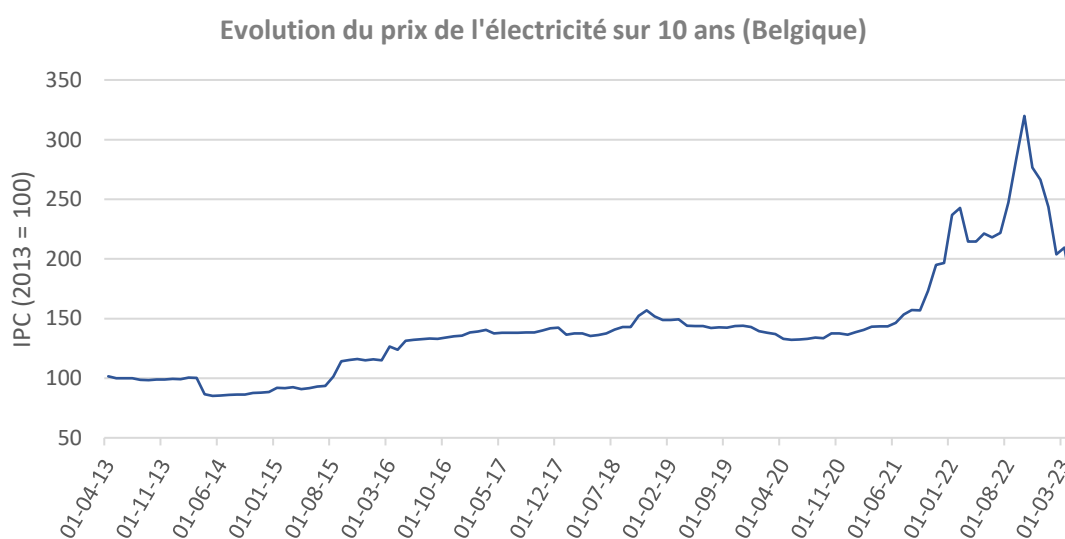
En connaissant le volume d'électricité prélevé et réinjecté dans le réseau, il est possible d'estimer le gain financier obtenu grâce au mécanisme. Pour ce faire, il faut soustraire les réinjections des prélèvements et multiplier le nombre de kilowattheures obtenu par 17,32 centimes.

### 5.3.5.4 Variation de prix de l'électricité sur les 10 dernières années

Afin de prendre en compte l'évolution du tarif de l'électricité dans notre étude de rentabilité, il convient d'analyser les variations du prix sur le marché belge résidentiel.

Pour cela, nous allons prendre en compte les variations de prix sur les 10 dernières années en exportant les données de l'inflation énergétique issues de Statbel.

Figure XI : Indice des prix à la consommation de l'électricité



Source : Statbel. (2023). L'inflation s'élève à 5,60%. Récupéré le 8 mai 2023 de <https://statbel.fgov.be/fr/themes/prix-la-consommation/indice-des-prix-la-consommation>

Entre avril 2013 et avril 2023, la variation du prix de l'électricité s'élève à 68%. Nous pouvons annualiser cette croissance en utilisant la formule du taux de croissance annuel composé (CAGR). Nous arrivons ainsi à une croissance annuelle de 5% (voir annexe 12 : calcul de la variation du prix de l'électricité et du CAGR).

L'avantage du calcul du CAGR est qu'il permet de représenter une croissance moyenne sur plusieurs années. Dans le cadre de nos analyses, nous retiendrons une croissance de 5% par an du prix de l'électricité.

En revanche, il est important de nuancer ce choix. Comme le CAGR calcule un taux de croissance lissé sur une période donnée (10 ans ici), il ne prend pas en considération la volatilité (Investopedia, 2023).

Dans notre cas, cela veut dire que nous supposons que la croissance de 5% sera constante or, nous le savons, l'évolution des prix de sur le marché de l'électricité est volatile. Il est toutefois difficile d'anticiper les variations de prix, qui dépendent de l'environnement externe.

#### 5.3.6 Délai de récupération

Le but du tableau est de calculer les cash-flows cumulés générés par l'installation photovoltaïque, afin de déterminer à partir de quand l'installation est rentabilisée.

Pour cela, nous calculerons le délai de récupération, qui représente le temps nécessaire pour que la somme des flux présents et futurs s'annule. Au-delà de ce délai, l'investissement initial est remboursé (Kinon, 2022).

#### 5.3.7 Dégradation de la production solaire

Au fil des années, la performance des panneaux diminue pour diverses raisons ; variations de température, rayonnement, encrassement, etc. La productivité des panneaux se voit donc dégradée. Afin d'être le plus précis possible dans l'analyse de rentabilité, nous allons prendre en compte ces effets.

Pour mesurer le taux de dégradation, une étude a été réalisée durant 5 ans sur 834 modules de 7 différents fabricants. Il en ressort que la dégradation annuelle moyenne est de -0,62% (Theristis, Stein, Deline, 2022).

#### 5.3.8 Le dimensionnement et les autres facteurs externes

Dans cette partie, nous cherchons à comprendre comment estimer la production annuelle que pourrait générer une installation.

Bien qu'il existe des outils de dimensionnement comme nous l'avons vu avec SolarEdge, il est intéressant de pouvoir estimer soi-même le potentiel d'une installation en fonction des caractéristiques d'implantation. Cela est possible en appliquant un facteur de correction.

En Belgique et dans des conditions optimales (orientation sud et inclinaison de 35° des panneaux), la production annuelle est de 900 kWh par kWc installé. Dès lors, il est possible de calculer sa production annuelle d'électricité en réalisant ce calcul (Energie facteur 4, s.d.) :

$$900 \times \text{Facteur de correction} \times \text{Puissance crête du système}$$

Le facteur de correction à appliquer dépend de l'orientation des panneaux et de leur inclinaison. Un tableau reprenant ces données se trouve en annexe n°13.

Pour illustrer ce calcul, prenons l'exemple d'un particulier qui dispose d'une toiture inclinée à 25 degrés et exposée vers l'ouest. Dans ce cas, le facteur de correction sera de 85%. Désireux d'installer une puissance crête totale de 8 kWc sur ce pan de toiture, ce dernier se demande quelle production espérer.

$$900 \times 0,85 \times 8 = 6120$$

Avec cette implantation, la production annuelle est estimée à 6120 kWh. Nous sommes maintenant capables d'estimer une production annuelle.

Selon le tableau reprenant les facteurs de correction, les implantations les plus productives sont orientées entre le sud-est et le sud-ouest et disposent de panneaux inclinés entre 15° et 50° (Energie facteur 4, s.d.).

La commission européenne propose également un outil interactif qui estime la production. Pour l'utiliser, il suffit d'encoder les coordonnées géographiques et certaines données d'implantation. Un exemple se trouve en annexe n°14.

### 5.3.9 Le taux d'autoconsommation avec et sans la batterie

Afin de prendre en compte la batterie de stockage dans l'analyse de rentabilité, il convient d'estimer le taux d'autoconsommation et/ou d'autoproduction réalisé avec et sans cette dernière.

Cette estimation permettra d'avoir une vue sur les potentiels volumes prélevés et réinjectés dans le réseau. L'objectif est de comprendre dans quelle mesure l'augmentation de ces taux est rentable pour l'acheteur de la batterie.

Sans le recours à une batterie de stockage, la CWaPE donne l'hypothèse que le TAC est de 37,76% (cf supra p. 26).

D'autres sources parlent d'un taux d'autoconsommation moyen de 35%, pouvant passer à 70% à la suite de l'acquisition d'une batterie domestique (Flahaut, 2018).

L'outil de dimensionnement de SolarEdge permet d'estimer le TAC et le TAP au cas par cas, selon les données d'implantation (voir annexe 15 : Dimensionnement SolarEdge – estimation du TAC/TAP).

#### 5.3.10 Tarif prosumer

Pour le cas de la Wallonie, nous prendrons en compte le tarif prosumer réel (basé sur le volume prélevé) et non forfaitaire. En effet, ce dernier prendra fin cette année.

Pour estimer le volume prélevé du réseau, nous calculerons le taux d'autoproduction, basé sur la consommation annuelle. Le pourcentage restant correspondra à la part des prélèvements.

Nous ne tiendrons pas compte de l'exonération car elle prend fin en décembre 2023. Les calculs seront basés sur le prix moyen de 2023 qui est de 85€ par kWe (cf. supra p. 27).

Nous posons l'hypothèse que le paiement annuel évoluera selon le taux d'inflation.

#### 5.3.11 Certificats verts

En Région bruxelloise, nous tiendrons compte de la durée d'éligibilité de 10 ans des certificats verts et de leur prix moyen unitaire de 91,84 €/CV. Le taux d'octroi sera calculé en fonction de la production annuelle estimée.

#### 5.3.12 Primes

Les primes de la Région flamande sur les panneaux seront calculées sur base de la puissance crête installée. Le montant obtenu sera déduit de l'investissement initial.

#### 5.3.13 Coût de remplacement de la batterie et de l'onduleur

Nous avons vu que la durée de vie de l'onduleur et de la batterie était plus faible que celle des panneaux. Afin d'anticiper le besoin de remplacer ces éléments, nous prendrons en compte une durée de vie de 12 ans après laquelle nous imputerons des coûts de remplacement.

Pour projeter le prix futur de l'onduleur, nous prendrons en compte une inflation annuelle de 2% correspondant à l'objectif de la Banque Centrale Européenne. Nous appliquerons ce taux au coût moyen d'un onduleur résidentiel qui est de 1350€ (Bobex, 2023).

Ce taux d'inflation sera pris en compte pour la batterie également. Toutefois, vu les prix peu démocratiques et les évolutions technologiques, nous allons analyser les prix historiques des batteries lithium-ion auxquelles nous nous intéressons. Cela nous permettra d'estimer une potentielle décote par rapport aux prix actuels. À cet effet, vous trouverez en annexe n°16 un graphique représentant l'évolution du coût des batteries.

Entre 2010 et 2020, le coût des batteries au kilowattheure a diminué de 89% grâce aux progrès technologiques et à des processus de production optimisés (Deboutte, 2021).

Si l'on calcule le CAGR sur base de ces informations, nous arrivons à une diminution annuelle de 19% du prix de la batterie.

Il faut toutefois rester vigilant vis-à-vis de ces estimations, car le prix des batteries dépend également de l'environnement externe. En outre, les variations de prix sur le marché du lithium sont volatiles, ce qui rend les estimations délicates (Gaudiaut, 2022).

## 5.4 Construction du tableau

Maintenant que nous avons identifié et récolté les données nécessaires, nous pouvons construire le modèle et y appliquer ces informations.

### 5.4.1 Avant d'entamer le tableau

Avant de commencer le tableau, certaines informations sont à compléter. Celles-ci seront inscrites dans des feuilles séparées au sein du tableur.

Commençons par créer une feuille qui servira à estimer la production annuelle. Celle-ci comprends le tableau des facteurs de corrections selon l'inclinaison et l'orientation des panneaux. En sélectionnant le facteur de correction correspondant à l'implantation, la production estimée s'ajustera dans les données.

Ensuite, il convient de créer une feuille dédiée à la consommation. Celle-ci reprend un tableau avec des listes déroulantes. Tout d'abord, il faut sélectionner le nombre de personnes dans le ménage. Ce choix donne une première idée de la consommation annuelle. Nous pouvons ensuite sélectionner des variantes telles que la présence d'une voiture électrique ou encore la production d'eau chaude sanitaire via un boiler électrique ou thermodynamique. La sélection de ces informations est dictée par une condition qui ajuste la consommation annuelle globale.

Une feuille reprenant les différents tarifs est créée ; tarifs d'achat, de réinjection, de compensation. Il est judicieux de la tenir à jour selon l'évolution des prix sur le marché de l'électricité.

### 5.4.2 Colonne du tableau

Nous expliquons dans cette partie comment arriver à déterminer les flux de trésorerie générés par l'installation.

Nous allons d'abord construire un modèle général sur 20 ans qui sera ensuite ajusté selon les régions et incitants fiscaux.

Premièrement, nous calculons année après année la production photovoltaïque en prenant en compte la dégradation de la production annuelle de -0,62%. En connaissant le prix d'achat au kilowattheure, nous pouvons connaître le montant d'économie sur la facture en multipliant la production par le prix auquel nous aurions payé le prélèvement sans l'installation PV (De Bruyn, 2023).

Ensuite, nous pouvons calculer le montant perçu en compensation de l'électricité réinjectée dans le réseau. Pour cela, nous prenons le tarif de réinjection au kilowattheure que nous multiplions au volume réinjecté, égal à 1 moins le TAC.

En additionnant l'économie réalisée sur la facture et le montant perçu pour les réinjections dans le réseau, nous arrivons au flux de trésorerie annuel.

Sur base des investissements réalisés et des flux de trésorerie annuels, nous pouvons calculer les flux de trésorerie cumulés. Ainsi, nous prenons en compte l'investissement initial (TVA comprise) en année 1, auquel nous ajoutons année après année les flux générés par l'installation. Nous soustrayons au flux de trésorerie de l'année 11 les coûts de remplacement de l'onduleur et de la batterie, installation comprise.

L'année à partir de laquelle les flux de trésorerie cumulés sont égaux ou supérieurs à zéro correspond à l'année de remboursement de l'investissement et sert donc à calculer le délai de récupération (De Bruyn, 2023).

Voilà donc le tableau construit. Il ne reste plus qu'à créer les variantes selon les régions et à encoder les données.

En sélectionnant le facteur de correction, les données de consommation, le nombre de panneaux et leur puissance, le tableau s'adapte automatiquement. Voici le résultat ci-dessous pour une orientation sud-est, un ménage de 4 personnes avec voiture électrique, 16 panneaux de 415W et une batterie.

Figure XII : Tableau général d'analyse de rentabilité photovoltaïque

Tableau d'analyse de rentabilité photovoltaïque							
TVA 6%							
<b>Données relatives à l'installation PV</b>							
Puissance crête de l'installation				6,64 kWc			
Production PV annuelle				5677,20 kWh			
Investissement initial				22.209,12 € TVAC			
Présence d'une batterie				Oui			
Taux d'autoconsommation (TAC)				60% TAC			
Année	Production PV (kWh)	Prix d'achat /kWh	Economie réalisée sur la facture	Prix de vente / kWh	Valeur électricité réinjectée	Flux de trésorerie annuel	Flux de trésorerie cumulé
1	5677,20	0,3616	2052,88	0,0673	152,83	2205,71	-20003,41
2	5642,00	0,3797	2142,16	0,0707	159,48	2301,63	-17701,78
3	5607,02	0,3987	2235,32	0,0742	166,41	2401,73	-15300,05
4	5572,26	0,4186	2332,53	0,0779	173,65	2506,18	-12793,87
5	5537,71	0,4395	2433,97	0,0818	181,20	2615,17	-10178,70
6	5503,38	0,4615	2539,83	0,0859	189,08	2728,91	-7449,79
7	5469,25	0,4846	2650,28	0,0902	197,31	2847,59	-4602,20
8	5435,35	0,5088	2765,54	0,0947	205,89	2971,43	-1630,77
9	5401,65	0,5342	2885,82	0,0994	214,84	3100,66	1469,89
10	5368,16	0,5610	3011,32	0,1044	224,18	3235,51	4705,40
11	5334,87	0,5890	3142,28	0,1096	233,93	-822,23	3883,17
12	5301,80	0,6185	3278,94	0,1151	244,11	3523,05	7406,22
13	5268,93	0,6494	3421,54	0,1209	254,72	3676,27	11082,48
14	5236,26	0,6819	3570,35	0,1269	265,80	3836,15	14918,63
15	5203,79	0,7159	3725,62	0,1332	277,36	4002,98	18921,61
16	5171,53	0,7517	3887,65	0,1399	289,42	4177,07	23098,69
17	5139,47	0,7893	4056,72	0,1469	302,01	4358,73	27457,42
18	5107,60	0,8288	4233,15	0,1543	315,14	4548,29	32005,71
19	5075,94	0,8702	4417,25	0,1620	328,85	4746,10	36751,81
20	5044,46	0,9137	4609,35	0,1701	343,15	4952,51	41704,32
<b>Total</b>			<b>63.392,51 €</b>		<b>63.913,44 €</b>		

Les variantes de ce tableau avec la prise en compte des certificats verts, du tarif prosumer et des autres incitations se trouvent dans les annexes n°17 à 22.



## 5.5 Étude de cas selon divers scénarios

Maintenant que les différents modèles sont construits, nous allons créer des scénarios et les comparer afin de tirer des conclusions et de déceler dans quels cas la batterie s'avère intéressante.

### 5.5.1 Différences de rentabilité selon les régions

Pour des cas similaires, nous allons voir s'il y a des différences de rentabilité entre les régions.

Commençons par le cas de figure d'un ménage de 4 personnes avec une consommation annuelle de 3500 kWh. La puissance crête installée est de 4,98 kWc, ce qui correspond à 12 panneaux. Selon les tableaux, la région la plus intéressante actuellement est Bruxelles, où le remboursement de l'investissement se fait durant la 7<sup>ème</sup> année. En Wallonie et en Flandre, l'investissement initial est récupéré endéans les 8 et les 9 ans respectivement.

La tendance selon les régions est la même pour les plus petites installations (8 panneaux). Toutefois, nous observons que ces installations sont moins vite rentabilisées que les précédentes. Il faut compter entre 1 et 3 ans supplémentaires pour atteindre le seuil de rentabilité.

Pour résumer, c'est à Bruxelles que l'investissement dans une batterie est le plus rentable. Les certificats verts ont un rôle important à jouer car ils permettent d'augmenter les flux de trésorerie de 28% à 45% en comparaison à la Wallonie et à la Flandre. En revanche, nous avons vu que le remboursement de l'installation était plus rapide dans le cas de grandes installations. Cela nuance dès lors l'intérêt de la batterie dans la capitale, car les surfaces disponibles en toitures sont généralement assez faibles et il y est plus compliqué d'installer des capacités importantes pour le résidentiel.

Pour le cas de la Wallonie, l'intérêt de la batterie s'explique par le tarif de compensation qui est très intéressant à ce jour. En comparaison au tarif d'injection, ce dernier est deux fois plus élevé. Vu la valorisation intéressante des réinjections dans le réseau, il est peut-être plus intéressant pour les prosumers wallons équipés avant la fin de l'année 2023 de retarder l'achat de la batterie. Pour rappel, ces derniers bénéficieront du mécanisme de compensation jusqu'en 2030 (cf. supra p. 27). Il pourrait dès lors être judicieux de reporter l'achat de la batterie et ainsi éviter les frais de remplacement en 11<sup>ème</sup> année. Pour les autres, la batterie aura un intérêt, car le tarif prosumer sera basé sur les prélèvements et il ne sera plus exonéré. De plus, c'est le tarif d'injection qui sera en place.

Le tarif d'injection en Flandre rend l'achat d'une batterie cohérent puisqu'il y a de l'intérêt à augmenter l'autoconsommation pour limiter les réinjections. La prime disponible sur les panneaux n'a pas d'impact considérable sur la rentabilité de l'installation globale.

### 5.5.2 Quels profils de consommation pour une batterie ?

Nous l'avons vu grâce à la comparaison selon les régions, l'achat d'une batterie est rentable pour les ménages de 4 personnes pouvant s'équiper d'une dizaine de panneaux. Intéressons-nous maintenant aux potentielles différences de rentabilité selon les profils.

Pour un ménage de 2 personnes qui s'équiperait de quoi couvrir sa consommation annuelle de 2350 kWh, le délai de récupération varie entre 9 et 14 ans. Dans cette configuration, le TAP est de 63%.

En comparaison, un ménage de 4 personnes avec une voiture électrique qui consomme 8000 kWh par an n'aura besoin que de 5 à 7 ans pour rentabiliser son installation. Pour ce cas de figure, le TAP est de 64%.

Si l'on rajoute une production d'eau chaude sanitaire avec un boiler électrique, la consommation augmente et passe à 11200 kWh. Pour couvrir cette consommation, nous augmentons la puissance crête et le délai de récupération passe à 7 ans pour la Flandre et la Wallonie et 5 ans pour Bruxelles. Le TAP s'élève à 49%.

On observe que l'installation est plus rentable lorsque la production photovoltaïque augmente. Malgré cela, une batterie peut être intéressante pour les plus petites consommations si elle est bien dimensionnée et qu'elle permet d'augmenter le TAC.

Nous pouvons également observer une diminution du TAP lorsque la consommation du ménage augmente. Cela s'explique par le fait que l'ensemble de la consommation ne peut être couverte par la production des panneaux. Dans une approche réaliste, la plupart des habitations résidentielles n'ont pas suffisamment de place en toiture pour accueillir une trentaine de panneaux nécessaires à couvrir de grandes consommations.

Il est important de prendre en considération le mode de vie et les habitudes de consommation du ménage avant de faire le choix d'investir dans une batterie. Si le ménage est absent en journée et que la consommation de l'habitation est inférieure à la production solaire, la batterie aura plus de sens que pour un couple ayant une installation qui ne génère pas d'excédent de production. Il donc compliqué d'affirmer un profil type à qui la batterie correspond mieux qu'à un autre, car les données à prendre en compte varient selon les cas.

Pour conclure, la batterie reste rentable pour les différents profils que nous avons explorés ci-dessus, même s'il existe des variations au niveau du délai de récupération.

### 5.5.3 Avec et sans batterie, quel impact sur la rentabilité ?

Dans cette partie, nous cherchons à déterminer dans quelle mesure la batterie impacte la rentabilité d'une installation photovoltaïque. Nous allons donc sélectionner différents cas et comparer le délai de récupération avec et sans la batterie.

Pour un ménage avec une consommation annuelle de 4400 kWh, l'installation hors batterie est remboursée la 4<sup>ème</sup> année en Flandre et en Wallonie. À Bruxelles, le délai de récupération est de 3 ans. Lorsqu'on rajoute la batterie, le délai de récupération double dans chacune des régions.

Pour une consommation de 2350 kWh, le délai de récupération varie également entre 3 et 4 ans. Une fois la batterie rajoutée, l'écart se creuse et triple.

Les installations plus importantes, de 24 panneaux par exemple, ont un écart moins élevé. En rajoutant la batterie, nous observons 2 à 3 années supplémentaires pour atteindre le seuil.

De manière générale, l'écart entre l'installation avec et sans batterie est plus important lorsque la capacité de l'installation est faible, et inversement. Pour un prosumer, il peut donc être intéressant de comparer la rentabilité des deux options et prendre du recul par rapport aux habitudes de consommation.

## 5.6 Auto-évaluation selon les KPI's

Afin de prendre du recul vis-à-vis des résultats qui viennent d'être présentés, un tableau d'auto-évaluation a été créé (voir annexe 23). Celui-ci reprend les objectifs, les KPI's sous-jacents et présente le résultat obtenu ainsi qu'un recul critique.

### 5.6.1 Profils de consommation

Le premier objectif visait à établir des profils de consommation cohérents. Dans le tableau, nous devons encoder ces données pour définir les profils ; le dimensionnement, les informations relatives à la consommation et la localisation.

Les profils se sont révélés cohérents, mais nous n'avons pas pris en compte la contrainte de la surface disponible en toiture. Il est judicieux de prendre du recul face à certaines conclusions, car dans la pratique, tous les ménages n'ont pas la possibilité technique d'installer suffisamment de panneaux pour couvrir leur consommation.

### 5.6.2 Intégration de la batterie

Concernant l'intégration de la batterie et la comparaison de la rentabilité du système, nous avons utilisé le TAC avec batterie, qui a été estimé à 60%. Ce taux varie en fonction du dimensionnement et de nombreuses données externes (conditions météorologiques, consommation de l'habitation, mode de vie, etc.), ce qui rend son estimation délicate. Le TAP a également été utilisé pour des comparaisons et pour estimer les prélèvements du réseau. Ce dernier est lié au TAC du fait de sa formule et dépend donc du taux choisi.

Nous avons également réalisé une comparaison des délais de récupération avec et sans batterie, en prenant en compte un budget moyen de 9000€ pour la batterie et son installation. La comparaison du coût du kWh avec et sans batterie n'a pas été possible par manque de temps et pour des raisons de faisabilité.

La durée de vie de la batterie, fixée à 10 ans, a été prise en compte. Nous avons ainsi estimé son coût de remplacement, en considérant une décote annuelle de 19%. Celle-ci est estimée sur base d'hypothèses et de données issues du passé. Cette décision d'appliquer une « décote technologique » pourrait être critiquée en fonction de l'environnement externe et du marché des batteries.

### 5.6.3 Adaptation en fonction des régions

Nous avons réalisé trois tableaux différents en fonctions des régions. Cela a permis de comparer les différences de retour sur investissement (ROI) en analysant les délais de récupération.

Les différences observées se justifient par la prise en compte des primes, des certificats verts, du tarif prosumer réel, etc. Nous avons veillé à l'adéquation entre les tableaux utilisés et la situation actuelle, en nous assurant que les données étaient les plus récentes. Cependant, il faudra effectuer des ajustements en vue des changements qui arrivent en 2024 en Wallonie.

### 5.6.4 Intérêt de l'investissement

Nous souhaitons identifier les conditions à remplir nécessaires à justifier l'intérêt de l'investissement dans une batterie. Il a été difficile de préciser et/ou quantifier ces dernières, car elles dépendent de facteurs externes et varient d'un cas à l'autre.

Au total, nous avons réalisé une dizaine d'études de cas en tenant compte de divers paramètres pour obtenir des réponses automatisées.

## 5.7 Conclusion du chapitre

Grâce à la définition des objectifs, la sélection et la récolte de données cohérentes, nous avons été en mesure de construire trois tableaux d'analyse de rentabilité entièrement personnalisables.

Ces derniers ont permis d'élaborer des études de cas et d'en savoir plus vis-à-vis de la rentabilité de la batterie en Belgique. Nous nous sommes intéressés aux impacts selon les différences régionales, les profils de consommation et l'intégration de la batterie.

Enfin, les KPI's qui ont été identifiés durant la définition des objectifs ont été revus en fin de chapitre, permettant une prise de recul par rapport aux conclusions tirées. Malgré certaines limites rencontrées, ces informations constituent une base solide pour entamer le prochain chapitre, qui présente le recul critique, les limites et les perspectives de ce mémoire.

## 6 Recul critique, limites et perspectives

### 6.1 Recul méthodologique

Commençons par faire le point sur la méthodologie qui a été mise en œuvre pour répondre à la question de recherche : « Face à la crise énergétique en Belgique : l'autoconsommation photovoltaïque peut-elle être une solution pour les particuliers ? ».

Dans un premier temps, nos objectifs ont été de présenter des solutions concrètes d'autoconsommation individuelle et collective et de comprendre leur impact.

La principale limite rencontrée a été la difficulté de mesurer les impacts. En effet, il est compliqué de quantifier ou de chiffrer les avantages des solutions présentées sur une courte période. Pour contrer cette limite, il aurait été nécessaire de sélectionner des particuliers qui disposent de certains des outils présentés et d'observer les données de production et de consommation. De plus, l'accès à de l'information quantitative dans des volumes importants est compliqué vu la cible et les différences entre les régions.

Le caractère récent de la thématique de l'autoconsommation ne permet pas toujours un recul suffisamment lointain pour trouver des données pertinentes et souligner les avantages identifiés.

Dans un second temps, nous avons souhaité déterminer l'intérêt de la batterie de stockage en nous intéressant à sa rentabilité grâce à la construction d'un tableau d'analyse.

Grâce à l'identification des KPI's, nous avons été en mesure de prendre du recul vis-à-vis du modèle construit. Bien que les différents tableaux répondent aux objectifs initiaux et ont permis de relever des conclusions précises, certaines contraintes ont été rencontrées.

Tout d'abord, certaines données n'ont pas pu être prises en compte par manque d'information. Par exemple, la dégradation de la productivité de la batterie n'a pas pu être intégrée dans le modèle. De nombreux facteurs utilisés sont basés sur des moyennes et des données théoriques, mais l'intermittence et les éléments extérieurs à l'installation peuvent également influencer la rentabilité de la batterie. De plus, la subjectivité de certaines hypothèses pourrait également être critiquée, comme la diminution du coût des batteries en raison des évolutions dans les processus de production.

Au travers des éléments de réponse apportés au fil de nos recherches, nous pouvons dire que l'autoconsommation photovoltaïque fait partie des solutions pour les particuliers désireux de contrer les impacts de la crise énergétique. Il faut toutefois nuancer en précisant qu'autoconsommer n'est pas accessible à tout le monde et que l'intermittence de la production photovoltaïque rend la mesure des impacts compliquée.

## 6.2 Perspectives

Pour étayer le travail, il serait intéressant de mesurer l'impact écologique de la batterie et le coût qu'il induit. La confrontation de la rentabilité et des effets sur l'environnement serait intéressante et offrirait une vue plus large et objective sur l'intérêt de la batterie.

Nous pourrions par exemple nous attarder plus en détail à la recyclabilité et à son coût, où encore essayer de chiffrer l'impact écologique en tonnes de CO<sup>2</sup> émises et tenter de l'intégrer dans l'étude de rentabilité.

Les effets de l'autoconsommation photovoltaïque pourraient être pris en compte dans le cadre d'un système d'interconnexion ayant recours à d'autres énergies renouvelables. Nous pourrions ainsi voir en quoi la combinaison d'énergies renouvelables pourrait potentiellement réduire l'intermittence.

Nous avons vu que le réseau n'avait pas toujours la capacité de recevoir les excédents de production. Cela engendre des déconnexions de l'onduleur et donc des pertes de production. Comme la batterie continue de charger malgré ces coupures, il serait intéressant d'estimer le gain financier obtenu grâce à la « sauvegarde » de la production.

## 7 Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons tenté de mettre en lumière les effets de l'autoconsommation photovoltaïque afin de comprendre en quoi ils permettent de lutter contre la crise énergétique pour les particuliers.

Pour la partie macro, nous avons commencé par contextualiser la crise énergétique et les enjeux qui en découlent, puis posé le cadre du photovoltaïque en Belgique. Nous avons défini les éléments présents dans une installation, les parties prenantes et la réglementation. Cela a permis de fonder les bases du travail et de comprendre les concepts clés étant utilisés tout au long des recherches.

Ensuite, nous nous sommes concentrés sur la thématique de l'autoconsommation photovoltaïque tout en distinguant les solutions individuelles et collectives. Nous avons découvert comment mesurer l'autoconsommation, puis présenté des solutions concrètes en relevant les avantages et les limites.

L'autoconsommation individuelle offre aux propriétaires de maisons et d'appartements une plus grande indépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie. En produisant leur propre électricité, les particuliers peuvent réduire leur facture d'électricité, notamment si leur consommation est alignée sur la production solaire.

Cependant, la production dépend des conditions météorologiques, ce qui peut rendre difficile la production suffisante d'énergie en hiver ou par temps nuageux. De plus, autoconsommer individuellement nécessite des ressources techniques et financières pour se munir d'un système photovoltaïque.

Afin de ne pas exclure ces ménages qui n'ont pas la possibilité de s'équiper d'un système, nous avons découvert l'autoconsommation collective à travers les communautés énergétiques. Ces dernières favorisent l'inclusion en offrant la possibilité de consommer de l'électricité verte et locale à ses membres. La mutualisation de la production permet une réduction des coûts, car les producteurs bénéficient de la valorisation de leurs excédents et les consommateurs profitent de tarifs réduits. En outre, le partage d'électricité renforce la résilience des communautés en cas de pannes de courant.

Il existe toutefois certaines barrières face à l'autoconsommation collective. Elle requiert une coordination entre les membres, ainsi que des investissements initiaux importants. Le développement technologique des réseaux intelligents et des communautés énergétiques présente des défis en termes d'interopérabilité et de réglementation, tandis que la création d'une communauté énergétique implique de répondre à des critères et de fournir des documents aux organismes régulateurs.

Pour la partie micro de notre travail, nous nous sommes penchés sur la rentabilité des batteries de stockage en tant qu'outil pour augmenter le taux d'autoconsommation. Nous avons cherché à répondre à la question de savoir si l'investissement dans une batterie de stockage est rentable compte tenu des prix actuels et des incitants en place.

Pour ce faire, nous avons créé un tableau d'analyse de rentabilité personnalisable, décliné selon les trois régions en Belgique. Nous avons défini des objectifs et les indicateurs clés de performance qui en découlent. Cela a permis d'identifier les facteurs à intégrer dans le tableau, puis de récolter les données telles que les tarifs de l'électricité, les données de consommation et de production, le profil de consommation, le coût de l'installation photovoltaïque, le dimensionnement, et d'autres facteurs externes.

En utilisant des exemples concrets, nous avons réalisé des études de cas et tiré des conclusions sur la rentabilité de la batterie de stockage. Ces analyses ont pris en compte les différences régionales, les profils de consommation et l'intégration des batteries. Les indicateurs clés de performance ont été réévalués, offrant une perspective critique au regard des conclusions tirées. Malgré certaines limites rencontrées, les informations récoltées constituent une base solide pour les réflexions critiques, les limites et les perspectives abordées par la suite.

Pour conclure, nous avons construit un recul critique de la méthodologie utilisée et mis en exergue les limites rencontrées. Cela nous a permis d'identifier des perspectives nouvelles telles que l'impact écologique de la batterie et le coût qu'il induit, l'interconnexion avec d'autres énergies renouvelables, ou encore les avantages obtenus grâce à la sauvegarde de la production par les batteries en cas de panne réseau.



## 8 Bibliographie

Aulanier, H. (2016). Le lithium, un métal au cœur des enjeux industriels, économiques et environnementaux du XXI<sup>e</sup> siècle. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 82, 92-96. <https://doi.org/10.3917/re1.082.0092>

Agence internationale de l'énergie (AIE). (2022). *Renewables 2022*. Paris : AIE. Récupéré de <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>

Atelier solaire. *COMMENT FONCTIONNE UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE ?* Récupéré le 04 avril 2023 de <https://ateliersolaire.ch/comment-fonctionne-une-installation-photovoltaïque/>

Atelier solaire. (2019). *ONDULEUR, MICRO-ONDULEUR ET OPTIMISEURS, QUELLE DIFFÉRENCE ET QUE CHOISIR ?* récupéré le 31 mars 2023 de <https://ateliersolaire.ch/onduleur-micro-onduleur-et-optimiseurs-quelle-difference-et-choix-faire/>

Batibouwplus. (2022). *Optimiseurs de panneaux photovoltaïques pour une efficacité maximale*. Récupéré le 31 mars 2023 de <https://www.batibouwplus.be/fr/electricite/optimiseur-panneau-photovoltaïque-article-194#:~:text=Un%20optimiseur%20de%20puissance%20ou,de%20mani%C3%A8re%20optimale%20et%20ind%C3%A9pendante.>

BeProsumer. (2023). *Géolocalisation et décrochages*. Récupéré le 26 mars 2023 de <https://www.beprosumer.be/geolocalisation/>

Bobex. (2023). *Comment bien choisir un onduleur solaire et à quel prix ?* Récupéré le 11 mai 2023 de <https://www.bobex.be/fr-be/panneaux-solaires/onduleur/>

Bobex. (2023). *Comparatif des meilleures sociétés de panneaux solaires en Belgique et technologies photovoltaïques*. Récupéré le 06 avril de <https://www.guide-renovation.be/panneaux-solaires/meilleurs-panneaux-solaires>

Bobex. (2023). *Panneaux solaires en Belgique : Prix en 2023 et Guide Complet*. Récupéré le 7 mai 2023 de <https://www.bobex.be/fr-be/panneaux-solaires/>

Brugel. (2023). *Hausse des prix de l'énergie*. Récupéré le 06 mars 2023 de <https://www.brugel.brussels/actualites/crise-energetique-551>

Brugel. (2021). *Certification d'une installation*. Récupéré le 14 avril 2023 de <https://www.brugel.brussels/themes/energies-renouvelables-11/certification-dune-installation-34>

Brugel. (2021). *Certification d'une installation*. Récupéré le 16 avril 2023 de <https://www.brugel.brussels/themes/energies-renouvelables-11/certification-dune-installation-34>

Brugel. (2021). *Mécanisme des certificats verts*. Récupéré le 13 avril 2023 de <https://www.brugel.brussels/themes/energies-renouvelables-11/mecanisme-des-certificats-verts-35>

Brugel. (2021). *Quota CV*. Récupéré le 13 avril 2023 de <https://www.brugel.brussels/themes/infos-pour-le-secteur-de-l-energie-13/retour-quota-cv-57>

Brugel. (2021). *Vendre les certificats verts*. Récupéré le 13 avril 2023 de <https://www.brugel.brussels/themes/energies-renouvelables-11/vendre-les-certificats-verts-38>

Brusol. (2022). *Fin de la gratuité des panneaux solaires en Région bruxelloise à partir du 01/01/2023*. Récupéré le 13 avril 2023 de [https://www.brusol.be/fr/panneaux-solaires/actualite/fin-de-la-gratuite-des-panneaux-solaires-en-region-bruxelloise-a-partir#:~:text=BRUXELLES%2017%2F10%2F2022%20%2D,drastiquement%20\(avis%20officiel%20ici\)](https://www.brusol.be/fr/panneaux-solaires/actualite/fin-de-la-gratuite-des-panneaux-solaires-en-region-bruxelloise-a-partir#:~:text=BRUXELLES%2017%2F10%2F2022%20%2D,drastiquement%20(avis%20officiel%20ici)).

Bruxelles environnement. (2010). *Le photovoltaïque – dimensionnement d'une installation PV*. Bruxelles : IBGE. Récupéré de [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/electfile/IF%20ENERGIE%20Mod5%20Dimensionnement%20PV%20FR](https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF%20ENERGIE%20Mod5%20Dimensionnement%20PV%20FR)

Callmepower. (2023). *Panneaux solaires et photovoltaïques : prix, tarif prosumer*. Récupéré le 08 avril 2023 de <https://callmepower.be/fr/energie/guides/environnement/panneau-solaire#tarif-prosumer-et-forfait-panneaux-solaires>

Certinerie. (2020). *Qu'est-ce qu'un organisme agréé ?* récupéré le 09 avril de <https://www.certinerie.be/fr/quest-ce-quun-organisme-agree/#:~:text=Un%20organisme%20de%20contr%C3%B4le%20agr%C3%A9%20,le%20C3%A9%20A9%20Gaz%20et%20Electricit%C3%A9>.

Chavagne, M. (2023, 13 mars). *Décrochage d'onduleur : quand le photovoltaïque s'attaque à votre portefeuille*. *Trends Tendances*. Récupéré de <https://trends.levif.be/a-la-une/energie/renouvelable/dcrochage-donduleur-quand-le-photovoltaique-sattaque-a-votre-portefeuille/>

Commission de Régulation de l'électricité et du gaz (CREG). (2018). *Gestionnaire de réseau de distribution*. Récupéré le 08 avril 2023 de <https://www.creg.be/fr/a-z-index/gestionnaire-de-reseau-de-distribution>

Commission de régulation de l'énergie (CRE). *Foisonnement*. Récupéré le 24 avril 2023 de <https://www.cre.fr/Pages-annexes/Glossaire/FOISONNEMENT>

Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG). (2023). *TABLEAU DE BORD MENSUEL ELECTRICITE ET GAZ NATUREL - AVRIL 2023*. Récupéré de <https://www.creg.be/fr/professionnels/fonctionnement-et-monitoring-du-marche/tableau-de-bord#:~:text=Pour%20les%20mois%20de%20novembre,et%20gaz%20naturel%20%3A%20E2%82%AC405>.

Commission européenne. (2022). *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. Récupéré le 11 mai 2023 de [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)

Commission Wallonne pour l'Energie (CWaPE). (2020). *FAQ – Tarif prosumer*. Récupéré de <https://www.cwape.be/sites/default/files/cwape-documents/20e11-FAQ%20Prosumer-mise%20%C3%A0%20jour.pdf>

Comparateur Energie. (2023). *Panneaux photovoltaïques en Belgique : vers la fin du système de compensation ?* Récupéré le 11 avril 2023 de <https://www.comparateur-energie.be/blog/panneaux-photovoltaïques-vers-la-fin-du-systeme-de-compensation/>

Comparateur Energie. (2022). *CWaPE, CREG, Brugel, qui sont les régulateurs du marché de l'énergie ?* Récupéré le 09 avril 2023 de <https://www.comparateur-energie.be/blog/regulateurs-du-marche-de-l-energie/#:~:text=Comme%20son%20nom%20l'indique,%C3%A9galement%20un%20r%C3%B4le%20de%20m%C3%A9diateur>.

Comparateur énergie. (2023). *Comment le tarif de l'électricité (et du gaz) est-il fixé en 2023 ?* Récupéré le 8 mai 2023 de <https://www.comparateur-energie.be/blog/prix-electricite-belgique/#:~:text=Concr%C3%A8tement%2C%20en%20Belgique%2C%20la%20facture,3%20500%20kWh%20Fan>.

Comparateur énergie. (2023). *Quels sont les différents types de compteurs électriques et de gaz ?* récupéré le 01 avril 2023 de <https://www.comparateur-energie.be/blog/compteur-electrique/>

Connaissance des Energies. (2023). *Solaire photovoltaïque*. Récupéré le 28 mars 2023 de <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire->

photovoltaïque#:~:text=Les%20cellules%20photovolta%C3%AFques%20exploitent%20l,conducteur%20transportant%20les%20charges%20%C3%A9lectriques.

CREG. (2018). *Tableau de bord*. Récupéré le 7 mai 2023 de <https://www.creg.be/fr/professionnels/fonctionnement-et-monitoring-du-marche/tableau-de-bord>

CWaPE. (2023). *Je suis un prosumer*. Récupéré le 08 avril de <https://www.cwape.be/conso/prosumer#:~:text=Le%20mot%20prosumer%20est%20la,plus%20souvent%2C%20des%20panneaux%20photovolta%C3%AFques>.

CWaPE. (2023). *kWc, kVA, kWe, kWh – qu'est-ce que c'est ?*. Récupéré le 31 mars 2023 de <https://www.cwape.be/node/4199#:~:text=kVA%20%3D%20kilovoltamp%C3%A8re%20%3A%20C'est,nette%20d%C3%A9veloppable%20de%20l'installation>.

CWaPE. (2023). *Qu'est-ce que la puissance électrique nette développable de mon installation ?* récupéré le 11 avril 2023 de <https://www.cwape.be/node/4198>

CWaPE. (2023). *Simulateur prosumer*. Récupéré le 11 avril 2023 de <https://www.cwape.be/publications/document/3016>

DE BRUYN, J. (2023, 26 avril). Fondateur de Soltis et consultant dans le photovoltaïque. [Entretien]. Bruxelles.

de Ladoucette, P. (2013). Régulation de l'énergie en Europe: Méthode, enjeux, défis. *Géoéconomie*, 66, 65-81. <https://doi.org/10.3917/geoec.066.0065>

Deboutte, G. (2021, 6 décembre). Selon BloombergNEF, le coût des batteries lithium-ion en baisse de 6 % sur 2021. *PV magazine*. Récupéré de <https://www.pv-magazine.fr/2021/12/06/selon-bloombergnef-le-cout-des-batteries-lithium-ion-en-baisse-de-6-sur-2021/>

Demars, P-T. (2023). *AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE, PRINCIPE ET ÉTAT DES LIEUX EN FRANCE EN 2021*. Récupéré le 24 avril 2023 de <https://www.encyclopedie-energie.org/autoconsommation-collective-principe-etat-lieux-france-2021/>

Dero, K. (2023, 7 mars). Prix de l'énergie : comment payer moins cher pour chauffer son eau tout en étant plus écologique ? *RTBF*. Récupéré de <https://www.rtb.be/article/cout-de-lenergie-comment-payer-moins-cher-pour-chauffer-son-eau-tout-en-etant-plus-ecologique-11163309>

Désaunay, C. (2018). Idées & faits porteurs d'avenir. *Futuribles*, 426, 93-105. <https://ezproxy.ichec.be:2098/10.3917/futur.426.0093>

EDF. (2023). *Mise à la terre : l'essentiel à savoir*. Récupéré le 09 avril de <https://izi-by-edf.fr/blog/electricite-mise-a-la-terre-c-est-quoi/>

EDF ENR. (s.d). *Kilowatt-crête (kWc)*. Récupéré le 26 mars 2023 de [https://www.edfenr.com/lexique/kwc/#:~:text=Le%20kilowatt%2Dcr%C3%AAt%20\(kWc\),%2C%20bonnes%20conditions%20d'irradiance%E2%80%A6](https://www.edfenr.com/lexique/kwc/#:~:text=Le%20kilowatt%2Dcr%C3%AAt%20(kWc),%2C%20bonnes%20conditions%20d'irradiance%E2%80%A6)

EDI. (s.d). *"Vehicle-to-grid", votre voiture électrique, une batterie domestique ?* Récupéré le 23 avril 2023 de [https://www.edi.be/fr\\_BE/blog/rouler-en-electrique-5/vehicule-to-grid-votre-voiture-electrique-une-batterie-domestique-52](https://www.edi.be/fr_BE/blog/rouler-en-electrique-5/vehicule-to-grid-votre-voiture-electrique-une-batterie-domestique-52)

Elia Group. (2023). *Mix électrique 2022 pour la Belgique : la progression du renouvelable et la disponibilité du nucléaire maintiennent des exportations élevées*. Récupéré de [https://www.elia.be/fr/actualites/communiques-de-presse/2023/01/20230106\\_EnergyMix2022](https://www.elia.be/fr/actualites/communiques-de-presse/2023/01/20230106_EnergyMix2022)

Eneco. (s.d.). *La consommation d'électricité*. Récupéré le 7 mai 2023 de <https://eneco.be/fr/consommation-denergie/electricite>

Énergie Commune. (2021). *Observatoire photovoltaïque*. Récupéré le 26 mars 2023 de <https://energiecommune.be/statistique/observatoire-photovoltaïque/>

Energieplus. (2021). *Définir le raccordement au réseau de distribution*. Récupéré le 31 mars 2023 de <https://energieplus-lesite.be/concevoir/photovoltaïque/definir-le-raccordement-au-reseau-de-distribution/>

Energuides. (2023). *Est-il intéressant d'investir dans une batterie domestique ?* Récupéré le 03 avril 2023 de <https://www.energuides.be/fr/questions-reponses/est-il-interessant-dinvestir-dans-une-batterie-domestique/2137/>

Engie. (2023). *Batterie domestique : 3 minutes pour comprendre comment ça marche !* Récupéré le 04 avril 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/batterie-domestique-fonctionnement/>

Engie. (2023). *Investir dans une batterie domestique : les plus et les moins*. Récupéré le 04 avril 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/investir-dans-une-batterie-domestique-les-plus-et-les-moins/>

Engie. (2023). *Panneaux solaires à Bruxelles : quel est l'impact du tarif d'injection*. Récupéré le 16 avril 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/panneaux-solaires-traif-injection-bruxelles>

Engie. (2023). *Panneaux solaires et batterie : quels montants pour les primes en Flandre ?* Récupéré le 12 avril 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/panneaux-solaires-flandre-investir-2020-2021/>

Engie. (2023). *Quelle taille de batterie domestique acheter ?* Récupéré le 21 avril 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/pv-batterie-domestique-taille>

Engie. (2022). *Autoconsommation solaire : définition & avantages à découvrir.* Récupéré le 25 avril 2023 de <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/avantages-autoconsommation.html#:~:text=Il%20s'agit%20d'une,autant%20que%20sur%20votre%20p> ortefeuille.

Engie. (2022). *Onduleur solaire : le guide complet pour tout savoir.* Récupéré le 28 mars 2023 de <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/fonctionnement-onduleur-solaire.html>

Engie. (2022). *Quel est le vrai bilan carbone des panneaux photovoltaïques ?* récupéré le 28 mars 2023 de <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/quel-est-le-vrai-bilan-carbone-des-panneaux-photovoltaïques.html#:~:text=usines%20en%20Chine.-,Quel%20est%20le%20bilan%20carbone%20du%20solaire%20photovolta%3AFque%20%C3%A0%20l,ann%C3%A9es%20pour%20amortir%20sa%20fabrication.>

Engie. (2022). *Recyclage panneau solaire : est-ce possible & comment faire ?* Récupéré le 28 mars 2023 de <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/recyclage-panneau-photovoltaïque.html#:~:text=Ils%20permettent%20en%20effet%20de,tous%20les%20%C3%A9l%C3%A9ments%20sont%20r%C3%A9utilisables.>

Engie. (2021). *Micro-onduleur solaire : fonctionnement, avantages, entretien.* Récupéré le 31 mars 2023 de <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/fonctionnement-micro-onduleur-solaire.html>

Engie. (2021). *Votre ballon d'eau chaude consomme-t-il trop d'électricité ?* Récupéré le 8 mai 2023 de <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-chaudiere/consommation-ballon-eau-chaude.html#:~:text=En%20moyenne%2C%20un%20chauffe%2Deau%20consomme%20800%20W%20d',en%20place%20un%20entretien%20r%C3%A9gulier.>

Engie. (2020). *Le tarif prosumer en Wallonie.* Récupéré le 11 avril 2023 de [https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/nouveau-taxe-panneaux-solaires-wallonie-2020/#:~:text=%C3%80%20partir%20de%202024%20%3A%20forfait,des%20montants%20ci%2Ddessous\).](https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/nouveau-taxe-panneaux-solaires-wallonie-2020/#:~:text=%C3%80%20partir%20de%202024%20%3A%20forfait,des%20montants%20ci%2Ddessous).)

Engie. (2019). *Comparez votre consommation électrique moyenne à celle de votre voisin*. Récupéré le 8 mai 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/conseils-energie/consommation-electricite-moyenne-belge/>

Engie (2022). *Recharger la batterie de sa voiture électrique avec ses panneaux solaires*. Récupéré le 23 avril 2023 de <https://www.engie.be/fr/blog/mobilite/recharger-batterie-voiture-electrique-panneaux-solaires-photovoltaiques/>

Everaert, B. (2023, 6 octobre). Volvo ravive le rêve de la voiture alliée de l'énergie renouvelable. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/entreprises/auto/volvo-ravive-le-reve-de-la-voiture-alliee-de-l-energie-renouvelable/10418556.html>

Fernando, J. (2023). *Compound Annual Growth Rate (CAGR) Formula and Calculation*. Récupéré le 8 mai 2023 de <https://www.investopedia.com/terms/c/cagr.asp>

Flahaut, E. (2018, 27 novembre). Autoconsommation : La transition énergétique est entre vos mains. *Les Echos*. Récupéré de <http://ezproxy.ichec.be/login?url=https://www.proquest.com/newspapers/opinion-autoconsommation-la-transition/docview/2138341139/se-2>

Fluvius. (2023). *Prime pour panneaux solaires*. Récupéré le 12 avril 2023 de <https://www.fluvius.be/fr/primes/primes-pour-clients-residentiels/prime-pour-panneaux-solaires>

Fonteneau, T. (2021). Autoconsommation collective ou solidarité nationale ? L'adaptation controversée de la tarification du réseau d'électricité pour les autoconsommateurs. *Flux*, 126, 52-70. <https://ezproxy.ichec.be:2098/10.3917/flux1.126.0052>

Gaudiaut, T. (2022, 3 novembre). Lithium : la flambée de l'or blanc. *Statista*. Récupéré de <https://fr.statista.com/infographie/28659/evolution-du-prix-du-lithium-et-consommation-mondiale/>

Georis, V. (2022, 20 décembre). L'Europe va accélérer les autorisations pour les énergies renouvelables. *L'écho*. Récupéré de <https://www.lecho.be/dossiers/crise-energetique/l-europe-va-acceler-les-autorisations-pour-les-energies-renouvelables/10436026.html>

Gierczak, L. (2019). Chimie: La révolution des batteries au lithium. *Pour la Science*, 505-, 17b-17b. <https://doi.org/10.3917/pls.505.0017b>

Gigout, É., Mayer, J. & Dumez, H. (2021). Les « niches » de transition comme espace de renégociation du système énergétique : le cas de l'autoconsommation. *Annales des Mines - Gérer et comprendre*, 145, 3-12. <https://ezproxy.ichec.be:2098/10.3917/geco1.145.0003>

Gobert, M. (2022, 21 octobre). Et si les communautés d'énergie étaient une solution à la crise actuelle ? *RTBF*. Récupéré de <https://www.rtbef.be/article/et-si-les-communautes-d-energie-etaient-une-solution-a-la-crise-actuelle-11075867>

Green Solar Solutions. (2021). *LES PRIMES EN FLANDRE POUR LE DÉVELOPPEMENT DES BATTERIES RÉSIDENTIELLES*. Récupéré le 12 avril 2023 de <https://www.green.be/actualit/2021/5/19/les-primen-flandre-et-le-dveloppement-des-batteries-rsidentielles>

Greenly. (2022). *Quel est l'impact écologique d'une batterie ?* récupéré le 04 avril 2023 de <https://greenly.earth/fr-fr/blog/actualites-ecologie/empreinte-carbone-batterie>

Hauet, J. (2019). Les énergies intermittentes : jusqu'où ? *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 93, 25-32. <https://doi.org/10.3917/re1.093.0025>

Horizon Energie, (2023, 11 avril). *ETAPES PV-10 WAL*. [Présentation interne]. Bruxelles : Horizon Energie.

Ionescu, O. (2019). Investissement dans les « smart grids » : une approche par options réelles. *Revue française d'économie*, XXXIV, 109-163. <https://ezproxy.ichec.be:2098/10.3917/rfe.192.0109>

Istace, J. (2022, 7 avril). TVA à 6% pour les démolitions/reconstructions, panneaux solaires et pompes à chaleur. *RTBF*. Récupéré de <https://www.rtbef.be/article/tva-a-6-pour-les-demolitionsreconstructions-panneaux-solaires-et-pompes-a-chaleur-10970865>

Jouin, E., Poize, N. (2022, 13 mai). *Autoconsommation individuelle et collective*. [Présentation PowerPoint - webinaire]. Autoconsommation individuelle et collective : Association Centrales Villageoises. Récupéré de [https://energie-partagee.org/wp-content/uploads/2022/05/2022\\_05\\_13\\_Atelier\\_ACI\\_GrappesPV.pdf](https://energie-partagee.org/wp-content/uploads/2022/05/2022_05_13_Atelier_ACI_GrappesPV.pdf)

July, B. (2023, 9 janvier). Voiture électrique : pourrai-je «faire le plein» avec mes panneaux photovoltaïques? *Le Soir*. Récupéré de <https://www.lesoir.be/487736/article/2023-01-09/voiture-electrique-pourrai-je-faire-le-plein-avec-mes-panneaux-photovoltaïques>

KillMyBill. (2023). *CREG, BRUGEL, CWaPE, VREG : qui sont-ils ?* Récupéré le 09 avril 2023 de <https://www.killmybill.be/fr/energie/cwape>

KillMyBill. (2023). *Les missions des GRD en détail*. Récupéré le 08 avril 2023 de <https://www.killmybill.be/fr/energie/gestionnaires-reseau-distribution>

KillMyBill. (2023). *Les principaux producteurs d'électricité en Belgique*. Récupéré le 08 avril 2023 de <https://www.killmybill.be/fr/energie/fournisseurs/producteurs#la-securite-d-approvisionnement-en-jeu>



Kinon, V. (2022). Mathématique Financière et Gestion financière. Syllabus. ICHEC, Bruxelles.

La Libre Eco. (2022, 30 juin). Les propriétaires de panneaux solaires en Flandre peuvent désormais partager leur surplus d'énergie. *La Libre Eco*. Récupéré de <https://www.lalibre.be/economie/conjoncture/2022/06/30/les-proprietaires-de-panneaux-solaires-en-flandre-peuvent-desormais-partager-leur-surplus-denergie-AC4OMIPX7NHM7GHDLTPR46PWKU/>

La Libre Eco (2022, 29 décembre). Certificats verts, compteurs, primes... : ces nouveautés dont il faudra tenir compte en 2023 pour les propriétaires de panneaux photovoltaïques. *La Libre Eco*. Récupéré de <https://www.lalibre.be/economie/conjoncture/2022/12/29/certificats-verts-compteurs-primes-ces-nouveautes-dont-il-faudra-tenir-compte-en-2023-pour-les-proprietaires-de-panneaux-photovoltaïques-J3KBUDHAURDDXMEGM7FTB3LEHA/>

Lambert, X. (2022, 3 septembre). Partager son électricité avec son voisin : les communautés d'énergie, c'est désormais légal, solidaire... et rentable. *RTBF*. Récupéré de <https://www.rtb.be/article/partager-son-electricite-avec-son-voisin-les-communautes-denergie-cest-desormais-legal-solidaire-et-rentable-11059438>

Lambrecht, L. (2022, 9 août). Wallonie : pourquoi il faut investir dans le photovoltaïque avant 2024. *La Libre Eco*. Récupéré de <https://www.lalibre.be/economie/mes-finances/2022/08/09/wallonie-pourquoi-il-faut-investir-dans-le-photovoltaïque-avant-2024-BF4LYH22EJHIPOBEK2T7T7XW5Q/>

Le Soir. (2023, 21 mars). Energies renouvelables : record mondial d'installations en 2022, mais insuffisant face au changement climatique. *Le Soir*. Récupéré de <https://www.lesoir.be/502458/article/2023-03-21/energies-renouvelables-record-mondial-dinstallations-en-2022-mais-insuffisant>

Lefèvre, F-X. (2022, 4 mai). Les communautés d'énergie vont se déployer en Wallonie. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/entreprises/energie/les-communautes-d-energie-vont-se-deployer-en-wallonie/10385639.html>

Lefèvre, X-L. (2022, 29 juillet). Faire du monde agricole un producteur d'énergie. *L'écho*. Récupéré de <https://www.lecho.be/economie-politique/belgique/wallonie/faire-du-monde-agricole-un-producteur-d-energie/10404521.html>

Libow. (2023). *Quels sont les différents types de batteries solaires ?* Récupéré le 04 avril 2023 de <https://www.libow.fr/blog-avis/blog/quels-sont-les-differents-types-de-batteries-solaires-maison/>

Liegeois, C. (2023, 20 janvier). Batterie pour stocker l'énergie des panneaux solaires : un investissement rentable ? *RTBF* Récupéré de <https://www.rtb.be/article/batterie-pour-stocker-l-energie-des-panneaux-solaires-un-investissement-rentable-11133499>

Livos. (2022). *Que coûte une batterie domestique ?* Récupéré le 8 mai 2023 de <https://www.livos.be/fr/article/54384/que-coute-une-batterie-domestique/>

Luminus. (s.d). *J'ai fait installer des panneaux solaires. Dois-je faire clôturer mon compteur nuit ?* récupéré le 01 avril 2023 de <https://www.luminus.be/fr/particuliers/aide-et-support/produits-services-j4OJADhA3KQc6uldOwJB/o502fdAbxeUEwCudyrbumkE/jai-fait-installer-des-panneaux-solaires.-dois-je-faire-cloturer-mon-gvXMDi9gm/>

Luminus. (s.d). *qu'est-ce qu'un prosumer ?* Récupéré le 08 avril de <https://www.luminus.be/fr/particuliers/aide-et-support/demenagement-compteur-reseaux-HjcUCR24xJfGNoPAGsuURXF9clutp0I9jQNo9U/keC6tTfr2Ac8CJBo0kDqmODgtZrQim5QBN7/quest-ce-quun-prosumer--gvXMDi9g7/>

Mega. (2021). *Comment savoir si je consomme trop d'électricité ?* récupéré le 8 mai 2023 de <https://blog.mega.be/comment-savoir-si-je-consomme-trop-deelectricite/>

National Geographic. (2019). *Bolivie : l'extraction du lithium menace le plus grand désert de sel du monde.* Récupéré le 04 avril 2023 de <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/bolivie-lextraction-du-lithium-menace-le-plus-grand-desert-de-sel-du-monde>

Ores. (2022). *Le compteur électrique.* Récupéré le 01 avril 2023 de [https://www.ores.be/particuliers-et-professionnels/compteur-electrique#:~:text=le%20compteur%20mono%2Dhoraire%2C%20avec,aliment%C3%A9s%20uniquement%20en%20p%C3%A9riode%20nocturne\).](https://www.ores.be/particuliers-et-professionnels/compteur-electrique#:~:text=le%20compteur%20mono%2Dhoraire%2C%20avec,aliment%C3%A9s%20uniquement%20en%20p%C3%A9riode%20nocturne).)

Ores. (2022). *Le partage d'énergie.* Récupéré le 27 avril 2023 de <https://www.ores.be/particuliers-et-professionnels/communaut%C3%A9s-d-energie>

Ores. (2018). *Watt, kilowatt et kilowattheure : mieux les comprendre pour maîtriser vos dépenses.* Récupéré le 28 mars 2023 de <https://www.ores.be/particuliers-et-professionnels/faire-economies/watt-kilowatt-et-kilowattheure-mieux-les-comprendre-pour-maitriser-vos-depenses>

Oser Comparer. (2023). *Tarifs d'injection de l'électricité mai 2023.* Récupéré le 8 mai 2023 de <https://www.osercomparer.be/energie/tarifs-injection>

Paquet, G., Bawin, I., Schrooten, V. et Wattier, S. (2019). Séminaire de méthodologie et d'initiation à la démarche scientifique. Syllabus. ICHEC, Bruxelles.

Photovoltaïque.info (2019). *Principe de fonctionnement des onduleurs*. Récupéré le 28 mars 2023 de <https://www.photovoltaïque.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/fonctionnement-et-categories-des-onduleurs-photovoltaïques/principe-de-fonctionnement-des-onduleurs/>

Planas, O. (2021). *Batteries solaires, définition et types pour panneaux solaires*. Récupéré le 04 avril 2023 de <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaïque/elements/batteries-solaires>

Renault. (2023). *Combien consomme une voiture électrique ?* Récupéré le 8 mai 2023 de <https://www.renault.fr/faq-electrique/consommation-vehicule-electrique.html>

RESCert. (2023). *Accueil*. Récupéré le 13 avril 2023 de <https://www.rescert.be/fr>

Rohard, F. (2022, 6 décembre). La guerre en Ukraine a enclenché le turbo pour l'électricité renouvelable. *L'écho*. Récupéré de <https://www.lecho.be/economie-politique/europe/economie/la-guerre-en-ukraine-a-enclenche-le-turbo-pour-l-electricite-renouvelable/10432819.html>

Schmitz, B. (2022, 16 mars). A Bruxelles, le photovoltaïque « gratuit » en plein boom pour faire face aux prix de l'énergie. *RTBF*. Récupéré de <https://www.rtf.be/article/a-bruxelles-le-photovoltaïque-gratuit-en-plein-boom-pour-faire-face-aux-prix-de-lenergie-10955368>

Sibelga. (2023). *Certificats verts*. Récupéré le 16 avril 2023 de <https://www.sibelga.be/fr/raccordements-compteurs/energie-renouvelable/certificats-verts>

Simon, P. (2015). Le stockage électrochimique de l'énergie : principes, applications et futurs défis. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 78, 67-72. <https://doi.org/10.3917/re1.078.0067>

SMA. (2019). *Dimensionnement d'une installation PV*. Récupéré le 31 mars 2023 de <https://www.sma-france.com/centre-de-connaissances/conseils-techniques-avant-installation/dimensionnement-dune-installation-pv>

SolarEdge. (s.d.). *Monitoring platform*. Récupéré le 06 avril 2023 de <https://www.solaredge.com/fr/products/pv-monitoring>

SolarEdge. (s.d.). *mySolarEdge*. Récupéré le 06 avril 2023 de <https://www.solaredge.com/en/products/software-tools/mysolaredge>

SolarEdge. (s.d.). *SolarEdge designer*. Récupéré le 7 mai 2023 de <https://www.solaredge.com/fr/products/installer-tools/designer>

SolarEdge (s.d.). *Roulez à l'énergie solaire*. Récupéré le 23 avril 2023 de <https://www.solaredge.com/fr/ev-charger>

Solvari. (2023). *Prime pour la batterie domestique en 2023 : Aperçu complet*. Récupéré le 12 avril 2023 de <https://www.batteriedomestique.be/prime#:~:text=Le%20gouvernement%20flamand%20a%20d%C3%A9cid%C3%A9,plus%20%C3%A9ligible%20%C3%A0%20la%20prime.>

Statbel. (2023). *L'inflation s'élève à 5,60%*. Récupéré le 8 mai 2023 de <https://statbel.fgov.be/fr/themes/prix-la-consommation/indice-des-prix-la-consommation>

Statbel (2023, 27 février). *L'inflation s'élève à 6,62%*. Récupéré de <https://statbel.fgov.be/fr/themes/prix-la-consommation/indice-des-prix-la-consommation#news>

Sury, C. (2022, 19 octobre). La Région bruxelloise va réduire son niveau de soutien au photovoltaïque. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/monargent/news/immobilier/la-region-bruxelloise-va-reduire-son-niveau-de-soutien-au-photovoltaïque/10421441.html>

Sury, C. (2022, 8 juin). 20 questions avant de vous lancer dans les panneaux photovoltaïques. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/monargent/analyse/immobilier/20-questions-avant-de-vous-lancer-dans-les-panneaux-photovoltaïques/10393460.html>

Sury, C. (2022, 14 décembre). Trois solutions innovantes pour produire de l'eau chaude. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/monargent/analyse/immobilier/trois-solutions-innovantes-pour-produire-de-l-eau-chaude/10433569.html>

Sury, C. (2021, 19 avril). 5 questions sur les panneaux photovoltaïques en Flandre. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/monargent/analyse/immobilier/5-questions-sur-les-panneaux-photovoltaïques-en-flandre/10298647.html>

Sury, C. (2022, 19 septembre). Photovoltaïque : ne tombez pas dans le panneau. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/monargent/analyse/energie/photovoltaïque-ne-tombez-pas-dans-le-panneau/10414198>

Sury, C. (2022, 19 novembre). Quel surplus pourrait vous facturer votre fournisseur pour vos panneaux ? *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/monargent/analyse/immobilier/photovoltaïque-quel-surplus-pourrait-vous-facturer-votre-fournisseur/10428818.html>

Sury, C. (2022, 27 octobre). Fin anticipée pour la prime batterie en Flandre. *L'Echo*. Récupéré de <https://www.lecho.be/monargent/news/immobilier/fin-anticipee-pour-la-prime-batterie-en-flandre/10423619.html>

Theristis, M. Stein, JS. Deline, C. et al. (2022). Onymous early-life performance degradation analysis of recent photovoltaic module technologies. *Prog Photovolt Res Appl*, 31(2), 149-160. doi: <https://doi.org/10.1002/pip.3615>

TotalEnergies. (s.d.). *Le contrôle de la conformité électrique d'une installation photovoltaïque*. Récupéré le 09 avril de <https://totalenergies.be/fr/particuliers/aide-et-contact/questions-frequentes/mes-produits/mes-panneaux-photovoltaïques/l'installation/le-controle-de-la-conformite-electrique-dune-installation-photovoltaïque>

TotalEnergies. (2023). *Stockage de l'énergie solaire : solutions et innovations*. Récupéré le 04 avril 2023 de <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/stockage-de-l-energie-solaire-solutions-et-innovations#:~:text=Aujourd'hui%2C%20la%20meilleure%20solution,camping%2Dcar%20ou%20un%20bateau.>

TotalEnergies. (2020). *Les ampoules LED réduisent-elles votre consommation d'énergie ?* Récupéré le 19 avril 2023 de <https://totalenergies.be/fr/particuliers/blog/lactu/les-ampoules-led-reduisent-elles-votre-consommation-denergie>

TotalEnergies. (2020). *Photovoltaïque : comment augmenter son autoconsommation ?* Récupéré le 25 avril 2023 de <https://totalenergies.be/fr/particuliers/blog/lactu/photovoltaïque-comment-augmenter-son-autoconsommation>

TotalEnergies (2019). *Courant monophasé et triphasé : quelles différences ?* Récupéré le 31 mars 2023 de <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/comprendre-le-marche-de-l-energie/courant-monophasé-et-triphasé-quelles-différences>

Vande Weyer, M. (2022, 18 août). Le potentiel photovoltaïque de la côte belge se dévoile peu à peu. *L'écho*. Récupéré de <https://www.lecho.be/entreprises/energie/le-potentiel-photovoltaïque-de-la-cote-belge-se-devoile-peu-a-peu/10408275.html>

Wallonie. (2022). *Photovoltaïque – s'informer sur le tarif prosumer*. Récupéré le 24 mars 2023 de <https://www.wallonie.be/fr/demarches/photovoltaïque-sinformer-sur-le-tarif-prosumer>

Wallonie. (2022). *Photovoltaïque – S'informer sur le tarif prosumer*. Récupéré le 11 avril 2023 de <https://www.wallonie.be/fr/demarches/photovoltaïque-sinformer-sur-le-tarif-prosumer>

Wallonie Energie. (s.d). *Communautés d'énergie et partage d'énergie au sein d'un même bâtiment (Electricité)*. Récupéré le 26 avril 2023 de

<https://energie.wallonie.be/fr/communautes-d-energie-et-partage-d-energie.html?IDC=10295>

Wallonie énergie. (2023). *Comment créer une Communauté d'Énergie ?* Récupéré le 4 mai 2023 de <https://energie.wallonie.be/fr/02-comment-creeer-une-communaute-d-energie.html?IDD=168453&IDC=10301>

Wild, J. (2019). *COMMUNAUTÉ LOCALE D'ÉNERGIE*. Récupéré le 25 avril 2023 de [https://www.encyclopedie-energie.org/communaute-locale-denergie/#\\_ftn1](https://www.encyclopedie-energie.org/communaute-locale-denergie/#_ftn1)