

Haute école
Groupe ICHEC – ECAM – IFSFC



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

**Étude d'un système d'interconnexion d'outils
énergétiques visant à optimiser économiquement et
techniquement la consommation globale
d'électricité d'un ménage ou d'une entreprise**

Mémoire présenté par :
Lucas DECLERCK

Pour l'obtention du diplôme :
Master – Ingénieur commercial
Année académique 2021-2022

Promoteur :
Jacqueline BOUCHER

Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

Haute école
Groupe ICHEC – ECAM – IFSFC



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

**Étude d'un système d'interconnexion d'outils
énergétiques visant à optimiser économiquement et
techniquement la consommation globale
d'électricité d'un ménage ou d'une entreprise**

Mémoire présenté par :
Lucas DECLERCK

Pour l'obtention du diplôme :
Master – Ingénieur commercial
Année académique 2021-2022

Promoteur :
Jacqueline BOUCHER

Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

En préambule, je voudrais remercier certaines personnes qui ont pu m'aider à bâtir ce mémoire tel qu'il est aujourd'hui.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon Promoteur, Madame Jacqueline BOUCHER, pour sa disponibilité et ses conseils qui m'ont permis d'étendre les pistes de ma réflexion.

Merci à ma maitre de stage, Laure TUERLINCKX, pour l'opportunité octroyée par ce stage, pour l'écoute et les conseils apportés et aussi pour m'avoir accompagné tout au long de ce stage en gestion de projet.

Merci à Maxime VANHORICK, gérant de l'entreprise DEFI ELEC, pour m'avoir aidé tout au long de ce projet. Sa disponibilité, sa confiance, ses conseils et les différentes mises en relation avec les personnes compétentes ont été de précieux atouts pour la réflexion autour de ce mémoire.

Merci aussi à toute l'équipe DEFI ELEC pour leur accueil, leur bienveillance, leurs conseils et leur partage d'expérience. Pouvoir aller sur le terrain avec des électriciens qualifiés m'a réellement permis de comprendre la réalité et de combiner celle-ci avec les notions théoriques acquises.

Enfin, je remercie mes proches et en particulier mes parents pour toute l'aide apportée au cours de mes études. Vincent DECLERCK, pour son aide de relecture de ce mémoire et pour ses conseils. Et Sabrina Sauro, pour son soutien inconditionnel.

Engagement anti-plagiat

« Je soussigné, DECLERCK, Lucas, étudiant en Master 2 – Ingénieur Commercial, 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.

“ A revolution doesn’t happen when society adopts new tool, it happens when society adopts new behaviors.” (Clay Shirky, Us Now)

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Liste des figures et tableaux..... | 8 |
| Introduction | 9 |
| Méthodologie | 11 |
| Chapitre 1 – Une nouvelle manière de consommer | 12 |
| Le contexte théorique | 13 |
| Le double impératif | 15 |
| L’intermittence des énergies renouvelables | 16 |
| Pistes de solution | 18 |
| L’autoconsommation..... | 21 |
| Les gestionnaires de réseau | 22 |
| Conclusion | 24 |
| Chapitre 2 : Description du projet et approche méthodologique | 25 |
| Présentation du projet, de ses objectifs, de son cadre et de ses limites | 26 |
| L’environnement de projet..... | 26 |
| Nature du projet | 27 |
| Analyse de la concurrence..... | 27 |
| Analyse des contraintes..... | 28 |
| Chapitre 3 : Mise en œuvre du projet | 29 |
| Phase 1 : les différentes technologies du projet | 30 |
| Aspect général des technologies actuelles | 30 |
| Pompe à chaleur..... | 30 |
| Panneaux photovoltaïque (PV) | 32 |
| Onduleur | 34 |
| Batterie domestique..... | 35 |
| Borne de recharge électrique..... | 37 |
| Gestion des flux..... | 39 |
| Combinaison des technologies | 40 |
| Conclusion | 42 |
| Phase 2 : Données techniques et économiques | 43 |
| Tarifs électriques..... | 43 |
| Mono-horaire | 43 |
| Bihoraire | 44 |
| Exclusif nuit | 44 |
| Tarif capacitaire | 45 |
| Les compteurs | 45 |
| Le compteur mécanique..... | 45 |
| Le compteur digital..... | 46 |
| Le compteur « double flux »..... | 48 |
| Puissance disponible et raccordement | 48 |
| Fiscalité et incitants..... | 49 |
| Flandre..... | 49 |
| Wallonie | 50 |
| Bruxelles | 50 |

| | |
|--|-----------|
| Conclusion | 50 |
| Phase 3 : Exploitation des données..... | 52 |
| L'autoconsommation et ses technologies | 52 |
| B2C | 52 |
| B2B | 54 |
| Limites et contraintes | 55 |
| Exploitation du système | 55 |
| Conclusion | 56 |
| Phase 4 : Présentation et discussion du résultat théorique obtenu | 58 |
| Compatibilité et interconnexion des systèmes énergétiques | 58 |
| Point d'entrée sur le marché | 59 |
| Variables influençant le résultat théorique..... | 60 |
| Résultats théoriques | 61 |
| Rentabilité et influence sur l'autoconsommation de l'installation de panneaux photovoltaïques..... | 62 |
| Rentabilité et influence sur l'autoconsommation de l'installation d'une batterie | 62 |
| Rentabilité et influence d'une borne de recharge sur l'autoconsommation | 63 |
| Rentabilité et influence d'une pompe à chaleur sur l'autoconsommation | 64 |
| Tableaux récapitulatifs | 64 |
| Approche B2B..... | 66 |
| Résumé et conclusion..... | 67 |
| Phase 5 : présentation et discussion du résultat réel obtenu..... | 70 |
| Chapitre 4 : Bilan et perspectives du projet | 75 |
| Analyse critique et mise en perspective..... | 75 |
| Perspectives futures du projet..... | 76 |
| Le partage d'énergie..... | 76 |
| L'étendue au B2I..... | 78 |
| Conclusion générale | 81 |
| Bibliographie | 83 |
| Annexes | 87 |

Liste des figures et tableaux

| | |
|--|----|
| Figure 1(Boucher, 2021) | 18 |
| Figure 2 (Boucher, 2021)..... | 20 |
| Figure 3 (Boucher, 2021)..... | 20 |
| Figure 4 (de Boer, et al., 2020)..... | 31 |
| Figure 5 (Green, 2021) | 49 |
| Figure 6 (Declerck Lucas, 2022) | 52 |
| Figure 7 (Engie, 2022) | 60 |
| Figure 8 (Engie, 2022) | 60 |
| Tableau 9 (Declerck Lucas, 2022)..... | 65 |
| Tableau 10 (Declerck Lucas, 2022)..... | 66 |
| Figure 11 (LEWIZ, 2022)..... | 70 |
| Figure 12 (LEWIZ, 2022) | 72 |
| Figure 13 (LEWIZ, 2022) | 73 |
| Figure 14 (LEWIZ, 2022) | 73 |
| Figure 15 (LEWIZ, 2022) | 74 |
| Figure 16 (ORES, 2022) | 77 |
| Figure 17 (ORES, 2022) | 77 |
| Figure 18(AMS, 2021) | 79 |

Introduction

«Avec 75 % des émissions de gaz à effet de serre de l'UE provenant de l'énergie, nous avons besoin de changer de paradigme pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés pour 2030 et 2050. Le système énergétique de l'UE doit devenir mieux intégré, plus flexible et plus à même d'intégrer les solutions les plus propres et les plus rentables. » Kadri Simson, European Commissioner for Energy, 8 juillet 2020 (Commission EU, 2020)

Le marché de l'énergie est en pleine mutation. L'Europe, par ses engagements, a décidé d'établir un plan audacieux dans le but d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Chaque pays y va alors de sa propre initiative pour atteindre ces objectifs. Ils transposent les directives européennes afin de les faire correspondre au climat social et politique national. En fonction des atouts et des contraintes, chacun crée des sous-objectifs et confectionne ses propres plans de transition énergétique. Tous ces efforts individuels participent au but commun, européen.

Le système énergétique est donc crucial pour atteindre ces objectifs. La baisse des coûts des technologies liées aux énergies renouvelables, l'évolution du marché, l'innovation rapide en matière de systèmes de stockage, les véhicules électriques ainsi que la numérisation sont autant de facteurs qui conduisent naturellement à une plus grande intégration des systèmes énergétiques en Europe.

Un système énergétique intégré permettra de minimiser les coûts de la transition vers la neutralité climatique pour les consommateurs et d'ouvrir de nouvelles possibilités de réduction de leur facture énergétique et de participation active au marché. Un système plus intégré sera aussi un système 'multidirectionnel' dans lequel les consommateurs joueront un rôle important dans la production d'énergie (Commission EU, 2020).

La neutralité carbone est une notion qui est encore assez abstraite pour nombre de personnes. Selon le parlement Européen, c'est "l'équilibre entre les émissions de carbone et l'absorption du carbone de l'atmosphère par les puits de carbone" (Commission EU, 2020). La neutralité ne veut donc pas dire l'arrêt de toute émission de gaz à effet de serre mais désigne bien cet équilibre entre émis et absorbé. Et même si tout le monde est parfaitement capable de comprendre cette explication, les enjeux qui se cachent derrière sont parfois plus compliqués à appréhender. En effet, malgré que la neutralité carbone soit un concept général, elle se manifeste de manière différente dans chaque domaine d'activité.

Parmi toutes les stratégies proposées par l'Europe, nous retiendrons, ici, la « stratégie de l'UE pour l'intégration du système énergétique ». Elle repose sur trois piliers (Eu commission , 8.7.2020) :

- **Un système énergétique plus «circulaire». Notamment, par l'utilisation plus efficace des sources d'énergies locales.**
- **Une électrification directe accrue des secteurs d'utilisation finale, en privilégiant l'utilisation de l'électricité partout où cela est possible (pompes à chaleur, véhicule électrique, ...)**
- Pour les secteurs où l'électrification est difficile, la stratégie promeut des combustibles plus propres, notamment de l'hydrogène renouvelable

Bien que chaque point mériterait un développement complet, dans le cadre de ce mémoire, se concentrer sur deux de ceux-ci sera amplement suffisant. Une exploration, en profondeur d' « un système énergétique plus circulaire » et d'« une électrification directe » sera donc réalisée, avec un focus particulier sur le concept d'autoconsommation.

En effet, et je suis sûr que vous l'aurez compris, il est nullement défendable d'aller vers une électrification massive, qui tendrait vers une augmentation de la consommation générale d'électricité, sans penser aux conséquences. Comme tout le monde le sait, l'électricité, avant d'être consommée doit être produite par différentes manières, dont des moyens accusant une source de rejet de CO2 et qui ont à chaque fois des avantages et désavantages spécifiques inhérents à la technologie employée. Mais n'entrons pas dans le débat du bien-fondé ou non de chaque technologie de production mais concentrons-nous donc sur l'objectif général de consommer de manière optimale ce que nous pouvons auto-produire, individuellement ou ensemble, via des moyens de production d'électricité qui annule ou minimise le rejet de CO2.

D'un point de vue micro-économique, il est certain que la meilleure économie d'énergie est de pas utiliser d'énergie. Mais dans notre monde moderne, impossible de s'en passer.

Dès lors, il est nécessaire que chaque consommateur, qui en a la possibilité et les moyens, de manière centralisée ou de manière décentralisée, puisse utiliser la quantité d'énergie qu'il a lui-même produite ET idéalement que la consommation s'effectue simultanément au moment de la production de cette énergie. On parle alors dans ce cas d'autoconsommation. Ce concept est assez récent mais sera, pour sûr, un des facteurs clés dans cette indispensable transition énergétique.

C'est bien dans cette optique que mon projet mémoire s'inscrit et que le titre de ce mémoire est en parfaite adéquation avec un objectif commun nécessaire indispensable à la poursuite de la vie sur notre globe ; « Étude d'un système d'interconnexion d'outils énergétiques visant à optimiser économiquement et techniquement la consommation globale d'électricité d'un ménage ou d'une entreprise »

Méthodologie

Pendant près de 5 mois, j'ai eu la chance et l'opportunité de réaliser un stage auprès de l'entreprise DEFI ELEC. J'ai pu y exercer le rôle de responsable du projet d'autoconsommation. Grâce à ce stage, j'ai pu développer mes connaissances au sujet de plusieurs domaines dont l'électricité générale et l'électrification de la consommation générale (mobilité, chauffage, chargement des véhicules électriques, ...). Et cet apprentissage théorique a été accompagné d'une approche pratique. J'ai pu suivre des techniciens directement sur chantier pour mieux comprendre les défis et opportunités qui résident dans ce secteur. DEFI ELEC m'a également apporté une liste de contacts nécessaires et utiles au bon déroulement de mes recherches. J'ai pu trouver les personnes ressources pour m'aiguiller et m'aider à comprendre, aux niveaux technique et commercial, quelles étaient les tendances du marché et où résidaient les enjeux. J'ai pu participer à de nombreux salons, conférences et événements divers où se mêlaient producteurs, fournisseurs, installateurs et clients.

En terme de sources, et pour la rédaction de ce mémoire, j'ai tenté de diversifier mes apports en utilisant Internet, des textes européens, mais aussi et surtout, des documents de différentes entreprises du secteur, accompagnées d'explications verbales, pour avoir une information de qualité.

Ce mémoire se construira donc de tous ces apports avec une méthode incrémentale. En effet, avec le temps et l'expérience, mes croyances et idées ont évolué et donnent naissance à de nouvelles réflexions. Il me paraissait important de ne pas occulter ce cheminement car il est l'explication même des conclusions finales par rapport à ce système d'interconnexion d'outils énergétiques.

L'idée dans ce cheminement sera donc de travailler partie par partie, technologie par technologie, système par système, pour bien comprendre le fonctionnement et tous les rouages de chaque élément. Ce n'est qu'une fois que cette analyse en profondeur aura été réalisée que nous pourrons alors assembler, de manière optimale, tous ces éléments. Forcément, vu la situation, au niveau économique et légal de la Belgique, il n'existera pas de solution parfaite mais plutôt une déclinaison de solutions, adaptables à chaque cas pratique.

Je vous souhaite une agréable lecture...

Chapitre 1 – Une nouvelle manière de consommer

Le contexte théorique

Le secteur de l'énergie en Belgique n'est pas le domaine le plus facile à comprendre. Il ne déroge d'ailleurs pas à la règle de la régionalisation, spécialité bien connue de notre chère Belgique. Dans le cadre ce travail, il existe donc des règles fédérales, et d'autres, laissées libres pour la transposition région par région. Que ce soit au niveau des incitants fiscaux, des visions à long terme ou même au sujet des mécanismes de soutien, chaque région prend ses propres décisions. Ce manque d'harmonisation rend donc la tâche ardue pour tous les acteurs du secteur énergétique. En plus de devoir être laborieusement au courant des différences régionales, il faut être prêt à s'adapter à tout changement inopiné de législation. La commission européenne soulevait notamment cette problématique en 2020 dans un document réalisant l'évaluation du plan national belge en matière d'énergie et de climat, sous ces mots : « *Cette répartition des compétences est la raison pour laquelle la version définitive n'est pas intégrée et bien structurée, car les entités fédérées ne communiquent pas les informations de manière cohérente.* » (Commission Européenne, 14.10.2020)

Et pour le consommateur, cela devient vite alambiqué. Avec le développement rapide de nouvelles technologies, les solutions pour économiser l'énergie se multiplient et il devient vite compliqué de s'y retrouver. D'abord au niveau technique, car on peut entendre tout et son contraire et ensuite, au niveau réglementaire et législatif, les réglementations, aides ou subsides peuvent soit être inexistants, soit être modifiés à n'importe quel moment.

Face à ce double défi, il est donc capital de comprendre, construire, et surtout vulgariser ces différentes solutions énergétiques pour, ensuite, évaluer leur potentiel en matière d'optimale combinaison.

Le consommateur est donc, à la fois, acteur et client de cette transition énergétique.

Acteur, car il influe sur le réseau de par sa consommation ainsi que via sa production d'énergie. Ces deux facteurs vont très fortement évoluer à l'avenir avec, d'une part, une augmentation de la consommation due à l'électrification des besoins en énergie, et d'autre part, une augmentation de la production d'électricité due à l'explosion de la demande photovoltaïque. Cette demande en autoproduction se voit également renforcée de par l'augmentation fulgurante des prix de l'énergie.

Au niveau du client aussi, car, pour se prémunir des hausses de prix, des pénuries, ou pour se rendre indépendant, il se doit d'investir dans de nouvelles technologies. Il faut dire que les technologies ont beaucoup évolué avec le temps et présentent maintenant des rendements nettement supérieurs aux technologies classiques. Mais outre cet investissement, il convient de rappeler que la meilleure manière de réduire ce problème de demande croissante d'énergie est de diminuer, d'autant que possible, la consommation énergétique de chacun d'entre nous. Comme pour les déchets, la meilleure énergie est celle qu'on ne consomme pas.

Pour beaucoup, il est donc aujourd'hui impensable de ne pas amorcer, voire d'accélérer cette transition énergétique. Que ce soit pour raisons économiques ou écologiques, il est

maintenant nécessaire de développer ces solutions, à grande échelle. Mais ce déploiement peut également amener son lot de problèmes. Un de ceux-ci, qui nous intéressera tout particulièrement dans ce mémoire, est l'influence réciproque qui existe entre le client et les gestionnaires de réseaux électrique. Nous verrons ensemble en quoi un consommateur lambda peut influencer sur le réseau de par sa consommation et sa production.

Un simple exemple micro-économique vous permettra de comprendre l'importance et la portée de cette problématique. Prenez une rue en cul-de-sac dont 50 maisons y sont construites et qui sont munies de panneaux photovoltaïques afin de produire de l'électricité. Au moment où la luminosité est maximale, vers midi donc, les panneaux produisent à plein régime mais personne ne consomme de l'énergie par exemple puisque tout le monde est parti par exemple travailler dans des bureaux installés en ville. Dans ce cas, le réseau, ici limitée à la rue, ne peut en aucun cas absorber la production commune et simultanée des 50 maisons et malheureusement, la production des panneaux est mise en arrêt pour des raisons de sécurité. Le réseau électrique est donc dans ce cas le maillon faible qui empêche une évolution technologique tendant à auto-produire de manière individuelle et neutre en CO₂.

Par contre, si par des moyens technologiques, ces 50 maisons pouvaient à la fois consommer leur énergie au moment de leur production ET/OU stocker leur électricité afin de l'utiliser en dehors de ces moments de pics de consommation, le réseau ne serait plus alors une entrave au développement de sources de production d'énergie renouvelable.

Par ce simple exemple, il ne sert à rien de lister et d'analyser les différentes technologies si nous ne connaissons pas les limites et contraintes du réseau énergétique au niveau local, régional, belge, voir européen.

Dans cette optique, une approche théorique en entonnoir sera donc développée dans les pages suivantes pour, peu à peu, se recentrer sur le cœur du problème et évaluer les défis et conséquences qui en découlent. Il faudra d'abord bien établir le contexte qui pousse, aujourd'hui, les consommateurs à changer leurs habitudes et à investir dans de nouvelles solutions. Ensuite, en analysant le fonctionnement du réseau électrique global, il sera plus aisé de comprendre la difficulté grandissante que connaissent les gestionnaires de réseaux face à l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans notre mix énergétique. Un point sera d'ailleurs dédié à ces acteurs que sont les gestionnaires de réseaux afin de mieux comprendre leurs droits, devoirs et contraintes. Nous verrons donc plus en détail que l'électrification de la consommation générale amplifie également cette problématique de gestion. Une fois le problème explicité, il convient d'analyser les potentielles solutions, actuelles ou futures, qui permettraient de contrer cette évolution inéluctable. Un intérêt particulier sera donc logiquement mis sur le concept d'autoconsommation comme piste de solution.

Les actions à entreprendre afin d'augmenter cette autoconsommation peuvent être prises à grande échelle, aux niveaux fédéral et régionaux, mais aussi à plus petite échelle, au niveau des entreprises et enfin, des particuliers. C'est l'effort commun qui permettra d'atteindre cet

objectif d'amélioration et d'équilibre constant du réseau électrique et marquera alors une avancée quant au développement d'un meilleur système énergétique.

Le double impératif

Afin de cerner le contexte économique qui pousse le consommateur à une évolution de la manière de consommer son énergie, il faut expliquer que pour celui-ci, il existe un double impératif qui le pousse à modifier son comportement. En effet, les caractères économiques et écologiques se complètent et amènent une envie et un besoin de changement, en lien avec les réalités actuelles.

D'abord, d'un point de vue économique, l'augmentation des prix de l'énergie rend indispensable une modification de la consommation énergétique. Et bien que personne ne puisse prédire le futur concernant les prix de l'énergie, et en particulier, celui de l'électricité, il est maintenant impossible de ne pas prendre en compte l'augmentation de cette composante. Cette hausse, que certains pensaient passagère, se montre durable et est maintenant, presque, acceptée comme nouveau seuil de normalité. Rares sont aujourd'hui les personnes convaincues que les prix pourraient revenir à leur valeurs minimales. C'est une des raisons qui poussent d'ailleurs les habitants à se tourner vers des sources d'énergies renouvelables et à investir dans de nouvelles technologies. Et cet aspect économique se voit renforcé par la récente insécurité énergétique, provoquée par la guerre en Ukraine. Le gaz devient une source d'énergie dont on se méfie et beaucoup tentent de se prémunir d'une possible pénurie. On pense alors directement au plus gros poste de consommation d'une maison, le chauffage. L'électrification de celui-ci est alors envisagée à l'aide de nouvelles technologies comme les pompes à chaleur car elles apportent un double avantage. Elles permettent de ne plus dépendre du gaz mais apportent aussi des économies substantielles, dans son mode de fonctionnement, comparées à une chaudière à gaz classique de par son rendement bien supérieur.

Ensuite, d'un point de vue écologique, il devient maintenant presque impossible de passer outre l'urgence climatique. Et même si le débat sur les nouvelles technologies, et tout ce qu'elles impliquent, est encore d'actualité, on ne peut plus passer à côté des énergies renouvelables comme source de production. À grande échelle, elles peuvent utiliser l'énergie éolienne, hydraulique ou solaire, mais à petite échelle, c'est bien le solaire qui est devenu l'énergie propre de référence. Et ce caractère écologique est renforcé par un changement profond des mentalités. L'économie des ressources comme l'eau, l'électricité ou la nourriture est devenue, dans nos pays, monnaie courante. Beaucoup d'initiatives sont mises en place pour améliorer et réduire notre empreinte carbone dans de nombreux domaines de la vie quotidienne. Et si il y a bien un domaine où cette empreinte est importante, c'est le domaine de l'énergie. D'ailleurs, dans une habitation classique, le chauffage peut représenter jusqu'à 70% de la consommation énergétique globale du ménage. Et quand on sait que la majorité

des ménages se chauffent aujourd'hui au gaz, il est grand temps d'amorcer le changement vers des modes plus économiques et écologiques.

Si l'on prend donc en compte ce double impératif, il est aisé alors de comprendre pourquoi le carnet de commande des installateurs de photovoltaïque a explosé. Les délais d'attentes sont aujourd'hui parfois de 6 mois avant une potentielle installation. Et cela ne va pas en s'arrangeant avec les pénuries de matières premières et les problèmes d'approvisionnements qui en découlent. Produire son énergie propre est donc une partie de la solution. Mais la solution complémentaire est également de consommer de manière plus responsable. Que ce soit grâce à de nouvelles technologies disposant d'un meilleur rendement ou par un changement des habitudes. Il est important de ne plus se comporter comme dans une période d'abondance énergétique où la consommation n'est pas régulée. Et de petits changements, dans les habitudes de chauffage par exemple, peuvent amener de grandes conséquences sur la facture finale. Le citoyen est donc, aujourd'hui plus que jamais, amené à participer à la transition énergétique. Les moyens sont aujourd'hui nombreux et les solutions se développent davantage chaque jour.

L'intermittence des énergies renouvelables

Maintenant que le contexte économique et écologique entourant l'indispensable transition énergétique est établi, il faut s'attarder davantage sur les conséquences, problèmes actuels et futurs qui découlent de celle-ci. Mais avant d'analyser ces problèmes, nous devons savoir où nous sommes aujourd'hui au niveau de l'objectif européen de neutralité carbone ?

Si l'on se replonge dans les capacités de production en Belgique, on se rend compte qu'on est encore loin de la neutralité carbone. Cependant, je reste optimiste quand on voit l'évolution qui s'est produite ces dernières années.

Pour l'instant, l'effort s'est surtout concentré sur une réduction des émissions carbone de par l'utilisation d'énergies renouvelables (ER).

Néanmoins, il ne faut pas négliger une autre façon de diminuer notre empreinte carbone via l'absorption de carbone. Ces puits de carbone, comme on les appelle, peuvent se manifester de plusieurs manières. Ils peuvent être naturels comme les écosystèmes continentaux et l'océan (Jancovici, 2007) ou artificiels avec des procédés novateurs comme la séquestration du CO₂. Malgré le fait que ces techniques restent encore expérimentales, elles font l'objet de recherches accrues dans le cadre de la lutte contre le changement climatique (Futura Science, 2021). Et la Belgique n'est pas sans reste. En effet, dans un article publié par « Digital Wallonia », on peut y lire : « La Wallonie dispose géologiquement de terres limoneuses parmi les plus fertiles et les productives d'Europe. C'est aussi l'un des meilleurs laboratoires à ciel ouvert pour le développement de nouvelles solutions agro-numériques rencontrant simultanément les objectifs des stratégies Green Deal et Numérique (...) La Wallonie a donc l'opportunité de se positionner en leader dans ce domaine et d'exporter son expertise vers d'autres pays européens » (Digital Wallonia, 2021).

Le constat est donc, pour l'instant, une prise de conscience de cette nécessité, avec un bel investissement réalisé dans les ER, mais un soutien sans faille reste nécessaire afin de concourir à cet objectif de neutralité carbone.

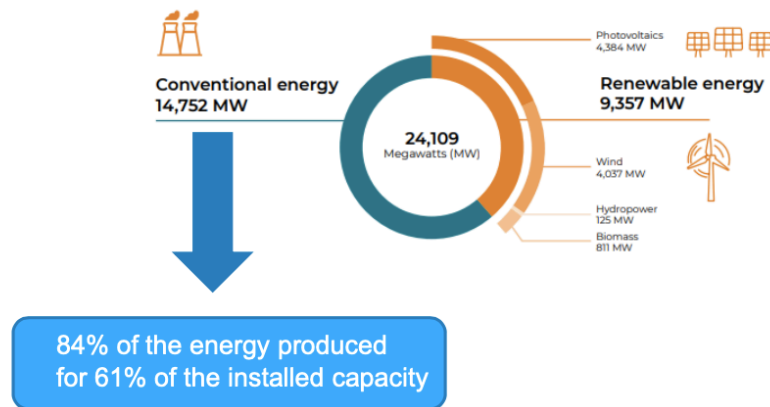
Cependant, ce qui ressort d'interpellant du graphique (figure 1) ci-dessous, c'est que, malgré une capacité installée de production de 39% en énergies renouvelables, celles-ci ne fournissent que 16% de l'énergie produite au total en Belgique (Elia, 2019). La raison est assez évidente et vous en avez sûrement entendu parler, cela est principalement dû à l'intermittence de ces énergies. À l'inverse d'une centrale nucléaire, ces énergies ne produisent de l'électricité que lorsque les ressources (vent, eau, soleil, ...) sont suffisantes.

Pour les gestionnaires de réseau, c'est donc une tâche ardue que de s'occuper de cette intermittence. En effet, il leur faut maintenir une production minimum pour assurer, à la seconde, une offre capable de répondre à la demande mais, en même temps, lorsque les ER produisent à plein régime, le réseau se retrouve parfois en surcharge. Dans ce dernier cas, deux solutions s'offrent alors ; stocker ou consommer. Mais forcément, ce n'est pas aussi simple, le stockage électrique à grande échelle est encore une technique qui demande beaucoup d'améliorations

Et cette tâche se complexifie encore si l'on prend en compte les pics de consommations, de plus en plus importants et fréquents. En effet, rien qu'avec l'électrification de la mobilité, la demande a été considérablement augmentée et celle-ci est majoritairement concentrée sur un laps de temps assez court. Cette tendance de demandes accrues à des moments bien précis ne peut d'ailleurs que se renforcer avec l'augmentation de la part des ER dans notre mix énergétique ainsi qu'avec l'électrification de la consommation générale (chauffage, mobilité, recharges électriques, ...). Rappelons que le chauffage peut représenter jusqu'à 70% de la consommation énergétique finale d'un ménage. La transition du gaz vers l'électricité amènera donc une demande encore supérieure. L'électrification de la mobilité est également un poste de consommation qui n'existait pas il y a encore quelques années et qui est amené à exploser au cours des prochaines années. Il est donc capital de trouver les solutions et d'évaluer quelles alternatives pourraient soulager ce réseau.

Power capacities in Belgium

Renewables represent 39% of the installed capacity



Source = Elia, 2019

Figure 1 (Boucher, 2021)

Pistes de solution

Justement, en parlant de solutions, voici les premières pistes récoltées. Dans un livre traitant de la transition énergétique en France, on peut y lire que : « L'introduction d'électricité intermittente a (...) des limites physiques, faute de disponibilité de moyens de stockage, limites liées à la nécessité d'équilibrer en permanence le réseau. (...) L'introduction de fortes capacités de sources intermittentes : (...) rendrait nécessaire la maîtrise de l'écrtage de la production intermittente et la mise en œuvre d'un stockage/déstockage d'électricité massif qui n'est techniquement qu'hypothétique. (Bruhl, Grenèche, Mazière, & Michaille, 2021)

Pour une meilleure utilisation du réseau, au niveau des ER, trois solutions sont donc avancées, on peut soit :

- **consommer l'électricité en surproduction, directement, par une consommation simultanée aux pics de production** ou même par de la consommation extraordinaire comme la production d'hydrogène « vert » propre issu uniquement du surplus d'énergie renouvelable (assimilable à une sorte de stockage).
- **stocker l'électricité pour une utilisation ultérieure.** Le stockage peut être massif, bien que la technologie ne soit pas encore à maturité, ou dispersé dans le réseau.
- **écrté les surplus de production** (limiter la puissance de sortie), ce qui serait la solution la moins souhaitable car l'électricité ne serait alors pas valorisée et la rentabilité des moyens de production s'en verrait diminuée. Cela reviendrait à « perdre » de l'énergie.

Pour un stockage de manière dispersée sur le réseau, il existe de nombreux endroits utilisables. Sur le schéma suivant (figure 2), on peut voir les différents points potentiels de stockage d'électricité au niveau du réseau et dans sa globalité. Dans le cadre de ce mémoire, on se concentrera sur le cadre rouge qui comprend le secteur résidentiel et le petit B2B (= SOHO ; Small Office & Home Office). Domaine d'expertise de l'entreprise DEFI ELEC et qui dispose d'un potentiel économique et technique de croissance énorme.

Comme représenté, les 3 points clés sont ;

- d'abord, les PV en ce qui concerne la production ;
- ensuite, la consommation du bâtiment en lui-même ;
- et enfin, le stockage par une batterie domestique.

Mais un quatrième point qui apparaîtra dans un futur proche est un stockage potentiel d'électricité par la voiture elle-même munie de la technologie véhicule to grid (V2G). La voiture sert alors de tampon et permet d'utiliser sa batterie pour la consommation du bâtiment auquel la voiture est connectée. L'Europe va d'ailleurs dans ce sens en parlant de l'intégration du réseau : « At the same time, it can create opportunities for providing storage and flexibility to the system. In particular, smart charging and so-called Vehicle-to-Grid (V2G) services will be essential to manage grid congestion and limit costly investments in grid capacity » . (Eu commision , 8.7.2020)

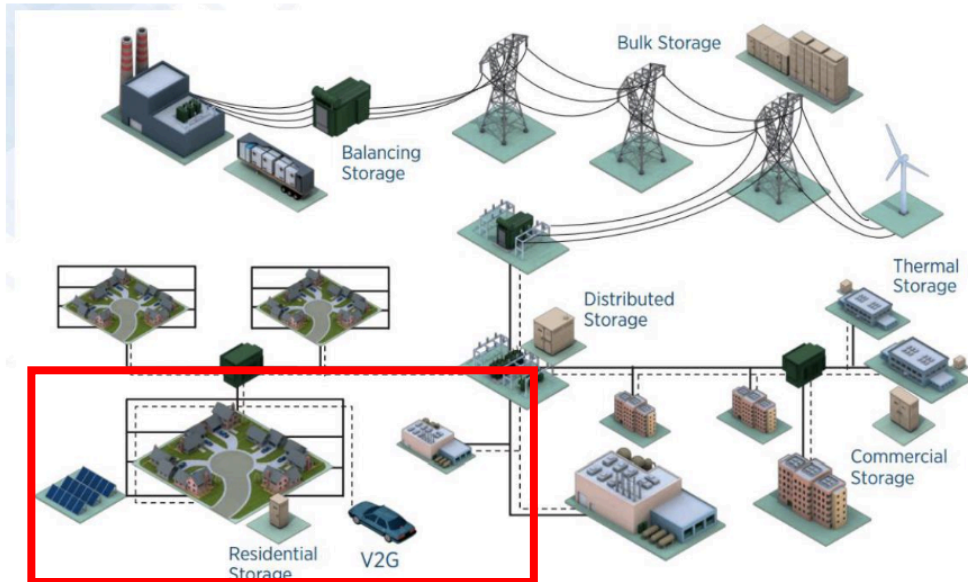
L'énorme avantage qui réside dans le secteur résidentiel et SOHO est que leurs courbes de consommation sont très prévisibles. Que ce soit au niveau B2C, où la consommation est très similaire d'un foyer à un autre et caractérisée par des pics de consommation situés le matin et le soir ainsi que via une production maximale en milieu de journée. Mais aussi au niveau SOHO, où le profil de consommation est très majoritairement inversé avec une consommation de jour, ce qui rend l'optimisation des ER plus facile.

Forcément, le stockage d'électricité via ces 2 segments spécifiques de clients ne constituera qu'une partie des possibilités du réseau global et le défi est encore tout autre en importance pour le secteur industriel et son stockage de masse. Mais le potentiel à l'intérieur du B2C et SOHO est déjà énorme et suffira, comme matière, pour ce mémoire.

Et ce potentiel est explicité dans le schéma ci-dessous (figure 3), la tendance veut qu'on aille vers une « smart power grid » où l'interconnexion prime. Et cette « smart grid » peut être à grande échelle, dans tout le réseau, mais peut aussi se décliner à plus petite échelle, dans le segment résidentiel et SOHO. In fine, mieux intégrer et mieux gérer le réseau électrique permettra de disposer d'une plus grande flexibilité et en conséquence, d'accroître l'importance des ER dans notre mix énergétique. C'est d'ailleurs le constat que fait également l'Europe, à la lecture de ceci : « Moreover, better integration will provide additional flexibility for the overall management of the energy system and thus help to integrate increased shares of variable renewable energy production » . (Eu commision , 8.7.2020). Et c'est précisément à cet objectif qu'il faut aspirer dans le cadre de cette gestion de projet en décrivant les moyens à mettre en place.

Batteries

Potential locations and applications of electricity storage

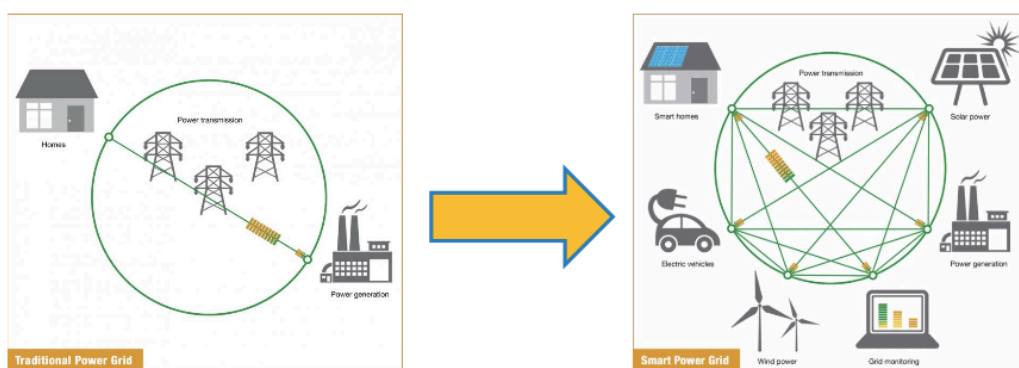


Source: Irena

Figure 2 (Boucher, 2021)

New operational paradigm

Decentralized generation, demand response and batteries can completely change the grid operational paradigm



Source: Georgia Tech

Figure 3 (Boucher, 2021)

Autre concept théorique qu'il faut comprendre afin de présenter des futures solutions énergétiques optimales, il faut intégrer la notion d'autoconsommation. En effet, au regard de ce que nous avons analysé sur le futur de la gestion du réseau, cette solution gagne de l'intérêt. Le concept de l'autoconsommation peut effectivement jouer un double rôle dans la résolution de notre problème d'intermittence des énergies. L'autoconsommation assure une consommation d'électricité 'directe' plus importante, simultanée à la production. D'autre part, le stockage permet d'augmenter de manière supplémentaire l'autoconsommation de l'énergie auto-produite.

Comment peut-on mieux définir ce concept ?

« L'autoconsommation est le fait de consommer en partie ou en totalité, l'énergie issue de sa propre production (autoproduction) ». (Orygeen, 2021) Forcément, ici, on parle d'autoconsommation énergétique, et plus précisément électrique.

Afin d'illustrer ce concept, prenons en exemple d'une famille de 4 personnes qui consomme 3200 kWh par an. Si demain, ce ménage installe des PV et produit 3200 kWh par an grâce à son installation, on dit que le ménage dispose d'une autoproduction de 100%. C'est-à-dire que, de manière globale, il produit autant qu'il consomme. Maintenant, pour calculer le taux d'autoconsommation, il faut tout d'abord être conscient du fait que la consommation du ménage ne se fait pas toujours quand la production solaire est disponible. En effet, lors de la consommation du matin et du soir, cette dernière dépasse souvent la production solaire et il leur faut donc puiser un complément d'électricité sur le réseau. L'inverse est aussi possible lors des pics de production, attendus en milieu de journée, où le ménage doit alors injecter son surplus au travers du réseau.

Si l'on prend alors l'hypothèse, communément admise, que 30% de la consommation du ménage est réalisée pendant les heures de production, cela signifie qu'il consommera, annuellement, 960 kWh d'électricité provenant directement de ses PV. Ce chiffre n'est pas avancé par hasard mais est similaire à l'autoconsommation naturelle avancée par la région wallonne, quoique, un peu diminué pour coller plus à la réalité du terrain. Naturelle voulant signifier que, sans changement des habitudes de consommation, on considère (de manière optimiste) qu'un ménage autoconsomme 37,5% de la production de ses PV (Wallonie, 2021). Le calcul ne sera pas détaillé ici de par sa complexité.

Cela signifie d'un autre côté que les +/- 70% restants de la production non auto-consommée doivent bien alimenter quelque chose car le stockage d'énergie n'est pas possible en absence d'infrastructure à cet effet. En fait, ces 70% d'énergie produite par les PV sont alors réinjectés dans le réseau. Et en fonction de la tarification proposée par les gestionnaires de réseaux, ils seront soit valorisés (on « reçoit » de l'argent), soit compensés. Je reviendrai à ces notions dans la suite du document.

D'un point de vue économique, vu que l'électricité produite au départ de ses PV est 'gratuite', il est beaucoup plus intéressant de la consommer soi-même que de la réinjecter sur le réseau.

L'autoconsommation, exprimé en pourcentage, est donc la part de l'énergie autoproduite qui est non réinjectée sur le réseau car utilisée directement OU stockée par le ménage. On peut donc déjà tirer une conclusion importante ; au plus l'autoconsommation est importante, au plus les économies seront importantes.

Et, comme mentionné ci-dessus, pour parvenir à une plus grande autoconsommation, deux moyens sont aujourd'hui avancés. Soit consommer directement, en électrifiant au maximum sa consommation électrique (chauffage, mobilité, boiler électrique ...), soit en la stockant (batterie domestique ou thermique) pour une utilisation ultérieure.

Mais pour parvenir à un taux d'autoconsommation maximum, il faut également être capable de gérer tous ces flux. On utilisera alors un module de gestion intelligent qui va venir décider comment répartir, de manière continue, consommation et production afin d'obtenir une utilisation optimale de sa production d'électricité.

In fine, l'autoconsommation associée à une gestion intelligente et planifiée va donc venir apporter une solution importante aux problèmes de sous-charge ou sur-charge des réseaux électriques. D'abord, cela se manifestera à un niveau local (d'un bâtiment), mais si ce concept se multiplie, cette évolution peut engendrer un changement global positif conséquent en équilibrant consommation globale et production globale synchronisée.

Les gestionnaires de réseau

Dernier acteur du contexte théorique du marché de l'énergie ; les indispensables gestionnaires de réseau. Cette (r)évolution énergétique se fera tout particulièrement ressentir dans le chef d'un de ses acteurs : les gestionnaires de réseau. Et ce sont aussi eux qui, en partie, influencent à leur tour le besoin de trouver de nouvelles solutions pour assurer une gestion pérenne de notre réseau électrique. Un point spécifique est donc dédié à ces acteurs particuliers que sont les gestionnaires de réseau (GRD). Pourquoi ont-ils une telle importance et quelles sont leur visions pour l'avenir énergétique de la Belgique ?

Les gestionnaires de réseau sont « les organismes qui entretiennent et développent le réseau de distribution d'électricité ou de gaz, et qui le mettent à la disposition des fournisseurs. Ils assurent ainsi l'acheminement de l'énergie jusqu'au consommateur final » (Fournisseurs electricite.com , 2021). Ils participent donc à la bonne gestion et à la santé du réseau électrique belge. Bien sûr, vous vous en doutez, en Belgique, ils ne sont pas les mêmes en fonction des régions. Chacun possède donc ses règles et visions et les répercussions pour les clients finaux, qu'ils soient des particuliers ou des entreprises, seront différentes.

Cependant, il existe une chose qui lie les GRD et sur laquelle ils sont tous, plus ou moins, d'accord ; il ne sera pas soutenable pour eux de gérer, dans l'avenir, les pics de production et de consommation de tous les utilisateurs. Sans trop rentrer dans le détail, en voici l'explication : avec la multiplication des « prosumer », entendez par là, des consommateurs-producteurs, la production d'énergie atteint son pic en milieu de journée alors que les pics de consommations sont réalisés le matin et le soir. C'est bien là que se situe le nœud du problème actuel et futur ; la désynchronisation de la production et de la consommation. Aujourd'hui, les GRD sont, en quelque sorte, d'immenses batteries pour la population belge. Ils accumulent la production de jour et la relâche lors des pics matinaux et de soirées. Sauf que, en réalité, ce n'est pas si simple que ça, ils ne possèdent pas de batteries pour accumuler cette énergie électrique produite au beau milieu du jour. Et c'est effectivement cette propriété inhérente de l'électricité qui pose problème ; une fois produite, elle doit être directement utilisée.

Au final, cela signifie donc que les GRD supportent une double responsabilité ; ils doivent en même temps trouver un moyen d'utiliser toute cette énergie produite en journée mais, également, être capable de produire assez pour répondre aux pics de consommation. En effet, « la quantité d'électricité injectée (production et importation) sur le réseau électrique doit toujours être égale à la quantité d'électricité consommée » (Energide, 2022). Et, malheureusement, cette tendance de déséquilibre ne pourra que s'amplifier, dû, en grande partie, à l'augmentation des ER dans notre mix énergétique, à l'électrification du parc automobile et à l'électrification des systèmes de chauffe. En effet, « Avec l'augmentation de la production renouvelable, qui peut varier fortement suivant les conditions climatiques, cet exercice (équilibrer le réseau) est devenu beaucoup plus complexe car les centrales classiques doivent compenser les fluctuations incessantes de la production renouvelable » (Energide, 2022).

C'est pour toutes ces raisons que les GRD ont décidé d'instaurer des nouvelles mesures visant à réduire ces pics en les répartissant tout au long de la journée. « À plus long terme, les gestionnaires de réseau pourraient aussi influencer le comportement des consommateurs en modifiant les tarifs de manière à lisser les consommations » (Energide, 2022). Aujourd'hui, ils le font déjà avec différents tarifs, comme le bihoraire, mais pour demain, on teste déjà le tarif quart-horaire ou le tarif capacitaire dont j'expliquerai l'essence plus tard.

Conclusion

Cette première partie résumant le contexte théorique du secteur énergétique était donc nécessaire afin de comprendre et de saisir toute la **complexité** qui en découle et que représente cette indispensable transition énergétique.

D’abord au niveau technique, avec les récentes avancées technologiques. Les offres se multiplient et il devient, pour tous les acteurs, compliqué de garder une vision sur toutes les possibilités qui existent. De plus, le consommateur est souvent lésé par la difficulté technique que représente ces différentes technologies.

Ensuite, les prix des nouvelles technologies, souvent encore élevés, défavorisent ceux qui ont déjà du mal à faire face à la hausse des prix de l’énergie. Combiné avec la hausse de la demande et donc, du prix des matières premières, il devient presque impossible de supporter la fluctuation des prix de ces produits finis.

Enfin, il existe aussi ce problème grandissant qui incombe aux gestionnaires de réseau : la gestion de l’intermittence des énergies renouvelables dont l’offre ne cesse de croître. La désynchronisation de la consommation avec la production rend la gestion du réseau difficile et des nouvelles mesures doivent être prises pour contenir cette tendance.

Face à tout cela, une solution, soutenue par l’Europe, se présente devant nous : l’intégration du système énergétique. Et ce, en passant par 3 points :

- Un système énergétique plus «circulaire».
- Une électrification directe accrue des secteurs d'utilisation finale
- Des combustibles plus propres, notamment de l'hydrogène renouvelable

Des deux premiers points, nous ressortons la solution innovante qui fait, d’ores et déjà, ses preuves: l’autoconsommation. En consommant l’énergie simultanément à sa propre production, on participe, à la fois, au soulagement du réseau, et à la fois, à une augmentation de ses propres économies.

L’augmentation de son taux d’autoconsommation passe par deux éléments clefs :

- Une consommation directe planifiée et intelligente
- Un stockage des surplus pour une utilisation ultérieure

Nous avons démontré qu’il est primordial de trouver des solutions visant à augmenter l’intégration du système énergétique. La piste la plus prometteuse serait donc une combinaison entre l’électrification directe et un système énergétique plus circulaire. Cette solution prendrait la forme de l’autoconsommation. Voyons voir comment nous pouvons procéder en ce sens.

Chapitre 2 : Description du projet et approche méthodologique

Présentation du projet, de ses objectifs, de son cadre et de ses limites

Maintenant que le contexte théorique dans lequel évolue ma gestion de projet a été présenté, il est temps de préciser davantage la gestion de projet en elle-même. Mais avant de se lancer dans le vif du sujet, il me faut la contextualiser. Pour cela, on analysera donc la nature du projet, ainsi que la concurrence et les contraintes liés au projet. Cette étape est primordiale afin de partir sur une base solide et de saisir toutes les opportunités et contraintes liées au projet.

L'environnement de projet

Ce n'est donc plus un secret, nous nous trouvons au cœur d'une période de grande transition écologique. Une transformation qui s'accompagne également d'un changement radical des mentalités et d'une conscientisation accrue de la population. Un des grands axes soutenant celle-ci porte sur la transition énergétique. Avec une consommation qui ne cesse d'augmenter et des ressources qui ne cessent de diminuer, il nous faut maintenant réagir. Face à cet enjeu de taille, que peut alors proposer une entreprise comme DEFI ELEC afin de participer, à son échelle, à cette métamorphose énergétique, presque sociétale. Et comment puis-je, à mon niveau, les aider à atteindre cet objectif tout en garantissant que cette évolution soit favorable à l'entreprise mais aussi à ses clients ?

DEFI ELEC est une PME spécialisée dans l'installation, le dépannage et la maintenance de systèmes électriques, ainsi que dans l'installation de bornes de recharge électrique. Ses produits couvrent donc les besoins en électricité, électromobilité mais aussi en domotique. Active depuis 2006, elle est actuellement située dans le quartier de Woluwe-Saint-Lambert à Bruxelles.

Pour une PME de cette taille, il est toujours important d'avoir un regard tourné vers le futur. Et c'est donc tout naturellement qu'une réflexion doit être menée sur les opportunités qui découlent de cette transition. Que ce soit contraints ou volontaires, les consommateurs devront, tôt ou tard, changer leurs habitudes de consommations. Une transition douce et amorcée à temps permettra d'éviter une demande trop importante au moment où ces changements seront devenus obligatoires. Une transformation est en marche et DEFI ELEC, comme beaucoup d'autres, doit envisager les possibilités qui s'offrent à eux, pour devenir de réels acteurs de cette mutation.

En tant que stagiaire, je leur ai donc proposé de réaliser une « Étude d'un système d'interconnexion d'outils énergétiques visant à optimiser économiquement et techniquement la consommation globale d'électricité d'un ménage ou d'une entreprise ». En d'autres termes, grâce à ce stage, j'ai pu confronter à la réalité du marché le but de ma Gestion de Projet (GP) qui est d'imaginer et d'évaluer l'impact d'un nouveau package de

produits à commercialiser, qui reprendrait les conclusions de cette étude pour, finalement, envisager la viabilité d'un lancement de ce projet sur le terrain.

Nature du projet

Le but de ce stage sera, in fine, de proposer des packages modulables à destination des clients (B2C et SOHO). Ces packages reprendront 5 technologies de base et une dernière, assurant la bonne liaison et communication entre elles. Le but de ces packages sera d'offrir une proposition de production et, surtout, d'une maximalisation de l'autoconsommation de son électricité.

Cette idée part d'un constat édifiant et montre que la plupart des clients ne savent ou ne comprennent pas les possibilités et les conditions de connexion de leurs différents appareils entre eux. Il est donc primordial d'accompagner le client du début à la fin du parcours afin de lui présenter la solution qui lui correspondra au mieux. Et c'est sur ce point-là que les packages présentent un avantage non négligeable, ils apportent au client de précieux conseils et une gestion automatisée qui participeront réellement, in fine, à alléger sa facture d'électricité. Et ce phénomène ne fera que s'amplifier avec l'arrivée du nouveau tarif basé sur la capacité de puissance électrique.

Le choix de ces technologies n'a évidemment pas été fait au hasard. Il résulte d'une étude du marché, ici-compris, les technologies actuelles et futures. Celles-ci seront détaillées dans la partie suivante mais possèdent toutes un intérêt bien spécifique et apportent leurs avantages au système d'interconnexions.

Mais que signifie réellement ce terme 'autoconsommation' ? Pour rappel, cela revient à consommer directement l'énergie lors de sa production

Et, ce développement souhaité, est parfaitement en lien avec l'époque actuelle. En effet, avec l'augmentation du prix de l'énergie et les incitants mis en place par le gouvernement, de plus en plus de personnes veulent produire leur énergie. Mais un autre point, trop souvent oublié, et pourtant fondamental, est la consommation intelligente de cette énergie. Et ce, que ce soit au niveau intra (habitation dans son intégralité) ou extra (connexion au réseau général). Il est donc crucial de s'attaquer à cet aspect afin de contrer ce futur problème qu'est la disparité entre moment de production et de consommation.

Analyse de la concurrence

Dans un marché en constant développement, les concurrents sont nombreux. Ils apparaissent rapidement mais ne prospèrent pas forcément pour autant. Il faut réussir à proposer aux clients une offre adaptée, à eux-mêmes, mais également aux conditions de ce marché. DEFI ELEC, de par ses activités, se positionne entre le client et les producteurs. En effet, pour les producteurs, l'entreprise apporte une force commerciale, quasi naturelle, de par les nombreux clients qu'elle rencontre grâce à ses travaux électriques. Pour ce qui est des

clients, elle se propose en tant qu'installateur mais aussi en revendeur des différents équipements.

L'entreprise est donc concurrente avec des firmes d'électricité mais également avec des électriciens indépendants. Cependant, elle se distingue de ces derniers de par son offre, parfois plus large et une expérience, non négligeable, apportant sérieux et rigueur à leur travail. DEFI ELEC est également challengeur dans le domaine des bornes électriques. Mais la plupart du temps, les entreprises proposant ce service ne se limitent pas uniquement à cela et possèdent aussi une gamme plus élargie.

Analyse des contraintes

Il faut savoir que ce marché est en pleine évolution ; l'environnement change régulièrement et les technologies évoluent à une vitesse considérable. Il est donc difficile de choisir et d'évaluer celles qui devront être utilisées à l'avenir car, entre le moment où nous les choisissons, et le moment où elles seront mises en application, des nouvelles versions auront peut-être déjà fait leur apparition. Il est donc important de rester alerte face à cette constante évolution et de se rendre compte que ce qui est correct aujourd'hui, ne le sera peut-être pas demain. Il faudra donc être à l'affut, tout au long du projet, des changements concernant l'environnement et le contexte dans lequel on évolue.

La technologie reprenant le système intelligent régulant les flux électriques ou énergétiques à l'intérieur de la maison est très récente et n'est pas encore totalement mûre. Il faudra donc rester vigilant et prudent lors du processus de décision ; l'analyse devra être rigoureuse afin de proposer la meilleure solution à nos clients.

L'entreprise DEFI ELEC est une petite société, en pleine mutation mais qui se développe rapidement. Pour l'instant, leurs services se concentrent sur des offres électriques (entretien, panne, domotique, ...) ainsi que sur l'installation de bornes électriques. Notre projet, s'il vient au jour, regrouperait bon nombre de nouvelles technologies et constituerait donc un changement majeur dans la stratégie de la société. De nouvelles connaissances impliquent de nouveaux apprentissages. Il faudra donc travailler en étroite collaboration avec les gestionnaires et les techniciens afin de voir ce qui est possible et envisageable pour eux. Ceci, dans le but de ne pas s'écarter des compétences de l'équipe ou de déceler les possibles recrutements à réaliser.

Chapitre 3 : Mise en œuvre du projet

Phase 1 : les différentes technologies du projet

Afin de proposer des packages énergétiques permettant une consommation optimale, il faut d'abord analyser d'une part les technologies existantes et d'autre part comment ces technologies peuvent être couplées afin d'optimiser leurs fonctionnements.

Aspect général des technologies actuelles

Dans cette partie, l'aspect général des 5 technologies, qui seraient reprises dans notre proposition de package énergétique, sera développé. Évidemment, je n'aurai pas l'occasion de donner tous les détails ou explications nécessaires pour chaque solution. J'ai donc sélectionné certaines informations afin de faire ressortir les points importants et qui apportent un réel intérêt au regard de notre projet. Des éclaircissements complémentaires seront donnés dans la suite du projet. De plus, le contexte théorique se concentrera sur une utilisation résidentielle (B2C et SOHO). Je n'ai donc pas exploré les différences ou changements pour ce qui est du secteur B2B industriel. Enfin, en ce qui concerne les règles, incitants fiscaux ou subventions, la régionalisation des compétences complique la compréhension et alourdirait de trop cette partie. C'est pourquoi, un point entier y sera dédié de manière séparée dans la suite du projet.

Pompe à chaleur

Une fois bien expliqué, le principe d'une pompe à chaleur (PAC) est assez trivial. On va transférer de l'énergie thermique d'une source froide (l'extérieur) à une source chaude (l'intérieur). Ce système s'apparente alors à du chauffage mais le processus peut également se faire dans le sens inverse, processus étant alors considéré comme de la réfrigération. On récupère donc l'énergie (calories) contenue dans l'air extérieur, auquel on ajoute l'énergie électrique. Une bonne PAC est ainsi alimentée à 75 % par de l'énergie extraite de l'air et à 25 % par de l'électricité.

Son fonctionnement est représenté par un cycle en 4 étapes :

4. D'abord, elle va puiser de la chaleur dans une source de chaleur (air, eau ou terre). Ensuite, « un liquide frigorigène, qui atteint son point d'ébullition à basse température, s'évapore et achemine cette énergie vers un compresseur »
1. Le compresseur est la seule partie de la PAC qui demande de l'énergie (électricité). « La vapeur est donc comprimée jusqu'à ce qu'elle atteigne une température supérieure à celle de l'air ou de l'eau utilisé(e) pour chauffer l'habitation »
2. Cette vapeur comprimée arrive ensuite dans un condenseur. Elle se condense alors et donne son énergie, sa chaleur, au système de chauffage (air ou eau). On se retrouve alors avec un liquide qui va être envoyé vers une valve d'expansion.
3. Cette valve, aussi appelée, détendeur va réduire la pression. Le liquide peut alors poursuivre sa route pour un nouveau cycle.

(Energuide, 2022).

Heat Pump Principle

$\frac{3}{4}$ Environmental heat, electricity $\frac{1}{4}$
= useful heat $\frac{4}{4}$

1. Compression
2. Condensation
3. Expansion
4. Evaporation

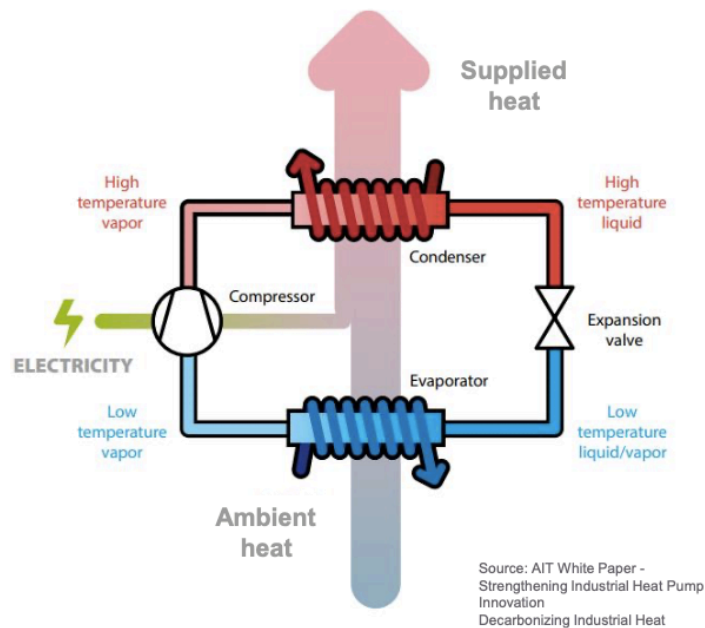


Figure 4 (de Boer, et al., 2020)

Il existe différents types de pompes à chaleur mais voici les principaux :

- Air/air
- Air/eau
- Géothermique (forage)
- Eau/eau (non recommandé pour les particuliers)

Les deux premières sont, aujourd'hui, les plus répandues chez les particuliers. Parmi ces deux pompes, la première est nettement moins chère mais possède un désavantage. Une pompe air-air ne peut pas directement chauffer l'eau, elle diffuse la chaleur (ou la fraîcheur) à l'intérieur du logement à l'aide de souffleurs (unités intérieures). Elle peut être mono-split ou multi-split (plusieurs unités intérieures qui diffusent l'air) en fonction du nombre de pièces à chauffer/refroidir. Par contre, si l'on souhaite chauffer de l'eau, il est donc nécessaire de la coupler avec un chauffe-eau thermodynamique, sauf si on opte pour une PAC air/eau, qui fonctionnera elle, à l'aide de radiateurs à eau. Notons cependant que ces pompes aérothermiques sont plus adaptées pour les régions à climat doux.

En revanche, une pompe géothermique nécessite un forage, ce qui alourdit grandement la facture. De plus, elles sont plus compliquées à installer et nécessitent des conditions plus particulières au niveau de l'état de la maison. Leur installation nécessite donc de disposer d'un grand terrain, notamment pour la pose des capteurs de chaleur horizontaux (il existe aussi néanmoins des capteurs verticaux). Et enfin, le système sera également conditionné par la nature de votre sol. (Quelle énergie, 2021)

L'efficacité du fonctionnement d'une PAC est définie par son coefficient performance (COP). Ce dernier est « le rapport du débit d'énergie thermique utile transférée (puissance thermique) sur le débit d'énergie consommée (puissance « payée »). » (Wikipédia, 2021). En d'autres termes, c'est la chaleur apportée à la maison divisé par l'électricité utilisée.

Il faut émettre une distinction entre COP_{chaud} et COP_{froid} , selon l'utilisation de la pompe (chauffage ou refroidissement) mais cela dépasse, pour l'instant, le cadre de ce travail.

Il est aussi à noter, que le COP baisse lorsque la différence de température entre la source chaude et la source froide augmente. Enfin, « il existe aussi un coefficient permettant l'évaluation des performances sur toute une saison de chauffe se prénommant COP saisonnier » (Quelle énergie, 2021). C'est d'ailleurs ce qu'utilisent, souvent, les producteurs de PAC, car cette mesure est plus représentative, surtout dans nos pays.

Selon le site web de la société Daikin (Daikin, 2021), le prix de ce type d'appareil varie en fonction de l'utilisation mais tourne autour de 10 000€. Tout dépendra de l'importance de la consommation du ménage. Mais, pour un particulier, les pompes classiques devraient être suffisantes.

Boiler thermodynamique

Un boiler thermodynamique est en fait un boiler électrique classique mais avec un bien meilleur rendement car l'unité de chauffage est une pompe à chaleur et non une simple résistance électrique. Typiquement, un boiler électrique transforme un kWh d'électricité pure en 1 kWh de chaleur utile. A l'inverse, un boiler thermodynamique peut lui produire 4 kWh de chaleur utile à partir de cette même quantité d'électricité.

On voit donc que les pompes à chaleur et les boilers thermodynamiques vont jouer un rôle crucial dans l'électrification des dépenses énergétiques liées au chauffage. Et cette nouvelle technologie s'inscrit dans «The upcoming 'Renovation Wave' initiative» annoncée dans le plan Green Deal Européen. Et en effet, toujours selon l'Europe, on peut lire : « In buildings, electrification is expected to play a central role, in particular through the roll-out of heat pumps for space heating and cooling. In the residential sector, the share of electricity in heating demand should grow to 40% by 2030 and to 50-70% by 2050 » (Eu commision , 8.7.2020). On peut donc voir que les perspectives sont prometteuses mais que le défi de gestion du réseau n'en est que grandi. D'ici 2030, la consommation en électricité dédiée au chauffage aura augmentée de manière radicale. Il est donc important de prévoir une offre d'énergie électrique suffisante, surtout dans les moments de pics de consommation.

Panneaux photovoltaïque (PV)

Bien que les PV soient une technologie maintenant bien connue du grand public, il reste encore des zones de méconnaissance sur le fonctionnement et les avantages de ceux-ci. L'offre devient peu à peu saturée et il est plus difficile de faire son choix. Par contre, ce qui est certain, c'est que le panneau PV s'impose, dans une habitation, comme la source de production par excellence. Avec cette production d'énergie, il se place en tant qu'un des acteurs principaux du système global d'autoconsommation.

Pour produire son électricité, deux éléments suffisent ; vous n'aurez besoin que de PV et d'un onduleur. Ce dernier sert à transformer le courant continu, produit par les PV, en courant alternatif, consommé par les appareils domestiques. Maintenant, deux cas de figure se dressent devant vous : si vous n'avez pas assez d'électricité, le réseau pourra compléter vos besoins, mais, à l'inverse, si vous avez un surplus, vous pourrez alors l'injecter. Bien que ce soit, en réalité, un peu plus compliqué, principalement dû aux différences entre régions, ce point ne sera pas détaillé dans cette partie-ci.

Les économies avec ces PV peuvent être conséquentes, à condition que la consommation soit intelligente. Partant du constat que le pic de production se situe, généralement, au milieu de la journée, il est aisé de visualiser le problème car les pics de consommation, eux, sont au contraire au maximum le matin et le soir. Il suffirait donc de décaler notre consommation afin de profiter d'un rendement maximum et d'assurer une bonne autoconsommation (Laura, 2021). Les appareils connectés sont une des solutions pour y arriver ; ils permettent de transposer la demande des appareils aux moments les plus opportuns.

De nos jours, il existe donc une multitude de panneaux aux propriétés différentes. Voici les grandes familles :

- Auparavant, on utilisait majoritairement des PV polycristallins (de couleur bleue). Comme son nom l'indique, ils sont donc composés de plusieurs cristaux, pouvant prendre des teintes différentes, mais généralement bleutées. De par leur structure en éventail, les cristaux sont plus performants sous un rayonnement indirect. (D., Quel type de panneaux solaires choisir ?, 2020)
- Ensuite, il y a eu une mutation vers les PV monocristallins, composés d'un seul cristal de silicium. Tous les cristaux du panneau sont alors orientés dans la même direction. L'aspect est donc plus uniforme et leur design est souvent préféré par de nombreux consommateurs. De plus, de par cette orientation, ils sont plus productifs en présence d'un rayonnement direct. (D., Quel type de panneaux solaires choisir ?, 2020)

Au final, étant donné l'ensoleillement variable de nos pays limitrophes, le rendement annuel est assez similaire. Toutefois, en fonction de certaines variables, un PV peut être préféré à l'autre. Alors que les panneaux noirs seront plus performants sur un petit toit orienté au sud, on privilégiera, pour un très grand toit, les panneaux bleus. Ceci est dû, en partie, au fait que les panneaux noirs ont aussi davantage tendance à chauffer. Or, on sait que cette chaleur réduit le rendement, car elle se manifeste à la place d'une production électrique. Enfin, on peut également noter que les PV 'bleus' sont, généralement, 10% moins chers que leur concurrent direct. (D., Quel type de panneaux solaires choisir ?, 2020)

Un dernier point technique concerne les récentes améliorations par rapport au rendement des installations. Il faut savoir que les PV sont, généralement, installés en série pour permettre

d'atteindre des tensions de minimum 230V afin d'alimenter les appareils domestiques. Cependant, le problème principal de ce montage réside dans le fait que, lorsqu'un des PV est ombragé, la productivité de l'ensemble de l'installation se retrouve pénalisée. « En effet, la puissance de l'installation correspondra alors à la puissance du panneau qui produit le moins » (Beguín, 2021). Pour éviter cela, les producteurs ont inventé des optimiseurs de puissance. Les PV sont alors toujours en série mais de manière indépendante, rendant chaque PV insensible à la production de l'autre. Forcément, cette technologie est plus onéreuse mais répond à un problème que rencontraient de nombreuses personnes.

Onduleur

L'onduleur est une technologie qui va de pair avec les PV, son fonctionnement a déjà été abordé dans le paragraphe précédent. Son rôle principal est de transformer le courant continu en courant alternatif, utilisable par les appareils. Il en existe plusieurs types et les caractéristiques techniques peuvent varier.

- Onduleur standard central : aussi appelé onduleur de chaîne, c'est aujourd'hui, la version la plus courante que l'on peut trouver chez les particuliers. Il se couple avec un système de PV et centralise la production. Les panneaux sont reliés, ainsi, en chaîne et cela nécessite donc une tension minimale, après quoi l'onduleur s'enclenche. Il faut donc une certaine tension pour que la production soit convertie par l'onduleur. Un autre problème avec ce type d'onduleur, et sans rentrer dans les détails, est que si un panneau venait à produire moins, suite à un ombrage ou des feuilles, la production totale serait affectée. « Enfin, avec cet onduleur, on peut voir la quantité d'énergie produite, mais il est difficile d'obtenir des données plus spécifiques. De ce fait, un onduleur de chaîne n'est pas la meilleure solution pour les propriétaires et les entreprises qui souhaitent exploiter leurs panneaux solaires de manière optimale. » Néanmoins, il faut dire que cette solution est facile à l'installation et fonctionne, généralement, très bien. (ESTG, 2020)
- Un onduleur hybride : également appelé onduleur intelligent est un choix judicieux lorsqu'il s'agit de stocker de l'énergie. En effet, cet onduleur effectue une double action ; il transforme le DC en AC, pour une utilisation ménagère ; mais il peut également envoyer le DC, directement vers la batterie. En effet, ce sera détaillé dans le paragraphe ci-dessous mais une batterie stocke l'énergie en DC. L'onduleur permet, enfin, de puiser sur la batterie en DC, pour que l'utilisateur puisse l'utiliser en AC. Ce système est très intéressant car, sans lui, il faudrait un onduleur pour PV (DC-AC) et un onduleur 'chargeur' (AC-DC). Cela permet donc d'économiser de l'argent et évite une complexité supérieure, due

à la combinaison de plusieurs appareils. Ce type d'onduleur tend donc à se généraliser, au fur et à mesure que les batteries fleurissent.

- Les micro-onduleurs : de base, ils offrent plus de possibilités qu'un onduleur de chaîne et possèdent certains avantages ; notamment lorsque :
 - les clients souhaitent pouvoir mesurer le rendement énergétique par panneau solaire
 - les panneaux solaires sont (partiellement) à l'ombre ;
 - ils comptent agrandir ultérieurement leur installation photovoltaïque actuelle ;
 - leur installation est petite ;
 - ils ne disposent pas de suffisamment de place pour un onduleur de chaîne.

Un micro-onduleur s'installe ou est intégré derrière chaque panneau solaire, ce qui peut faciliter l'installation. Les micro-onduleurs présentent également une solution idéale lorsque les panneaux solaires sont partiellement à l'ombre. Là, contrairement à un onduleur de chaîne, si l'un des panneaux est à l'ombre, aucune diminution d'énergie n'a lieu. C'est donc une solution qui permet, dans de nombreux cas, de résorber un problème spécifique. (ESTG, 2020)

Les onduleurs sont donc un élément primordial dans le système. Surtout quand on sait que sa durée de vie est estimée à une dizaine d'années alors que les PV peuvent aller jusqu'au-delà de 25 ans de garantie. Il faut donc bien choisir le type mais aussi les caractéristiques car il faut souligner qu'il représente une part non négligeable dans le budget d'une installation PV. Les deux éléments les plus importants, pour choisir un onduleur de manière optimale, sont les données de production de crête (en WC) et les données de consommation du ménage (kWh). Avec ces informations, on doit être capable de choisir l'onduleur le plus adapté à la consommation du ménage.

Batterie domestique

Les batteries sont de plus en plus appréciées par les particuliers car elles répondent à un problème précis et apportent une solution adaptée. En effet, comme précisé ci-dessus, on rencontre, au cours de certaines journées, avec les panneaux solaires, des surplus de production. Ces surplus doivent alors être gérés et le sont d'ailleurs souvent par une injection sur le réseau global. Et ce phénomène se généralise en Belgique avec la suppression des compteurs qui tournent à l'envers (un point dédié explicatif viendra plus tard). L'achat d'une batterie devient donc de plus en plus avantageux mais le choix de cette dernière n'est pas toujours aisé. Il existe, en effet, différents types de batteries domestiques, présentes actuellement sur le marché. On citera ces principales :

- Les batteries lithium-ion : « Environ 70% des batteries domestiques sont des batteries lithium-ion. Leur capacité de stockage est relativement grande par

rapport à leur poids et leur charge peut être assez rapide. C'est ce type de batterie qui est également utilisé pour les voitures électriques » (D., Comparatif de 4 batteries domestiques, 2021). D'ailleurs, pour information, il existe, maintenant, une variante, remplaçant le lithium par de l'eau salée. Cette alternative, plus écologique, est aujourd'hui suivie de près mais son prix n'est pas encore compétitif avec les batteries au lithium.

- Les batteries plomb-acide : « Si leur prix est deux fois moins élevé que les lithium-ion, elles ont un gros inconvénient : pour augmenter leur durée de vie, elles ne peuvent pas être déchargées de plus de la moitié de leur capacité ! Il faudra donc une batterie plus grosse. Leur impact environnemental est aussi plus grand... » (D., Comparatif de 4 batteries domestiques, 2021).
- Il existe aussi des moyens de stocker l'énergie de manière mécanique, par exemple, grâce aux volants d'inertie, plus connus sous le nom anglais 'Flywheel'. Ces méthodes de stockage sont parfois plus efficaces quand de nombreux cycles de charge/décharge s'opèrent. Cependant, cette technologie est plus onéreuse et sert principalement à stocker des quantités d'énergie plus importantes. Elle n'est donc pas parfaitement adaptée pour des particuliers. (Giovannini, 2021)

Lors du choix de la batterie, plusieurs éléments sont à prendre en compte dont, notamment:

- La capacité de charge, qui doit être décidée, idéalement, en fonction de la consommation et de la capacité production de l'installation PV.
- Son rendement, donnée très importante et qui varie assez fort d'un produit à un autre.
- L'onduleur qui y est associé, car, sans trop rentrer dans le détail, il faut un onduleur capable de charger la batterie en courant continu mais qui puisse aussi envoyer du courant alternatif au réseau domestique. C'est pour cette raison qu'on appelle cet appareil en tant que onduleur hybride .
- Du nombre de cycles de charges/décharges qu'elle pourra effectuer, représentatif de sa durée de vie.
- De sa connexion avec d'autres appareils et surtout à un système de régulation intelligent d'énergie ;
- Et dernier point mais pas des moindres, de son prix. Souvent, on exprimera son prix par kWh stocké afin de pouvoir faire des comparaisons aisées. (D., Comparatif de 4 batteries domestiques, 2021)

In fine, votre choix restera majoritairement dépendant de votre consommation énergétique.

Encore une fois, les règles varient en fonction des régions mais l'achat d'une batterie est un investissement dans le temps et cette technologie se verra, sans aucun doute, indispensable et cruciale dans les années à venir.

Borne de recharge électrique

Les bornes sont une technologie assez simple, de base, mais qui peut vite se complexifier en fonction des options désirées. Pour beaucoup, la complexité et l'intelligence ne réside pas vraiment dans cet appareil mais bien dans le système intelligent de gestion. C'est pourquoi d'autres bornes, appelées 'intelligentes' sont de plus en plus présentes sur le marché et amènent un niveau de complexité plus élevé, donnant accès à plus de capacités. Quoi qu'il en soit, voici les principaux avantages qu'une borne peut avoir, de nos jours :

- Une connexion variable en mono ou en triphasé. En effet, tous les ménages ne sont pas équipés du même raccordement, il faut donc, au minimum, deux modèles de bornes ou une borne qui puisse s'adapter aux deux connexions.
- Une certaine puissance en fonction de la capacité de charge souhaitée. En effet, un véhicule hybride ne recevra pas la même puissance de charge qu'un véhicule full électrique. Il faut donc, en fonction de ses besoins, choisir une borne permettant de charger son véhicule correctement. Un propriétaire d'un VE (véhicule full électrique) voudra, probablement, une borne capable de recharger son véhicule à 22kWh pour bénéficier ainsi d'un temps de recharge minimal. Mais pour cela, faut-il encore que le véhicule accepte une telle puissance. De manière générale, les véhicules électriques peuvent charger autour de minimum 7,4 kW. Attention, on parle bien ici de borne domestique, raccordée au réseau de la maison. Les raisons complètes d'un choix judicieux de borne de recharge seront développées plus loin dans ce travail mais sachez que, de nouveau, c'est majoritairement en fonction de la puissance de raccordement (mono/triphasé) et de la puissance de votre tableau électrique (exprimé en ampères) que ce choix s'effectuera .
- Le split-billing est également un point essentiel pour tous les propriétaires de voiture électrique ou de voitures hybrides de société. En effet, grâce au capteur RFID et une carte 4G, présents dans la borne, l'utilisateur peut alors avoir un détail séparé de sa consommation issue de son véhicule afin d'isoler sa consommation spécifique afin de pouvoir la refacturer à son employeur. Cette option technologique est maintenant, quasi obligatoire, sans quoi, la perte de clients potentiels serait trop forte. Ou, du moins, elle doit être disponible en option.
- Autre avantage d'une borne de recharge intelligente est la potentielle communication de la borne avec d'autres équipements. La communication d'une borne peut se faire de deux façons principales. Première solution, on peut lui ajouter une carte Sim, qui communiquera, en 4G, avec l'application sur le téléphone, par exemple. Une autre serait de tirer un câble internet (type Ethernet) relié, directement au modem de la maison pour assurer une communication. Les informations passent alors par le wifi. Quoi qu'il en soit,

une communication de la borne est maintenant devenue, à nouveau presque indispensable. En effet, pour pouvoir gérer les flux énergétiques, ou, tout simplement, les surveiller, il faut recevoir les informations d'états de charge et de puissance de la borne.

- Le loadbalancing. Encore une fois, cette application est presque incontournable et cela s'explique facilement. Lorsque vous chargez votre véhicule électrique, vous prenez, indéniablement, une partie de la capacité de puissance de votre réseau pour cette charge. Maintenant, si l'on imagine que cette charge s'effectue au même moment que la consommation d'appareils de cuisine gourmands en énergie par exemple, on peut alors aisément comprendre la surcharge qu'il pourrait y avoir. Il faut donc un module qui permet de balancer les flux et de donner la priorité aux appareils domestiques, quitte à réduire momentanément la puissance de charge de la voiture. La plupart du temps, ce module n'est pas, à proprement parlé, intégré dans la borne mais est constitué d'un module qu'on rajoute près du tableau électrique. Reste donc à savoir, pour le consommateur, si ce module supplémentaire est facturé en plus ou est compris dans la proposition du pack de la borne de recharge.
- Le smart-charging : l'idée ici est d'avoir plusieurs modes de chargement disponible pour une utilisation adaptée aux besoins actuels de chaque utilisateur. On retrouve souvent ; une fonction de recharge rapide pour un temps de charge minimum mais qui s'accompagne donc d'un pic de consommation assez important ; une recharge uniquement avec l'excédent solaire, pour ceux qui ne doivent pas utiliser leur véhicule dans l'immédiat ; ou encore une recharge basée sur les prévisions de production et de consommation qui permet d'utiliser l'électricité de la manière la plus efficiente possible. Ce dernier mode de recharge est intéressant car on utilise l'excédent solaire avec un complément du réseau pour que la voiture soit chargée au moment où l'utilisateur en a le besoin.
- Enfin, et comme toujours, avantage ou désavantage est déterminé par le prix de la borne et de ses options potentielles. Maintenant que l'on sait que la technologie à l'intérieur d'une borne n'est pas tellement conséquente, il faut que le consommateur porte un grand intérêt sur les fonctionnalités disponibles ou non chez son fournisseur et, comprenne bien ce qui est intégré dans le prix reçu. Ensuite, forcément, une importance non négligeable est apportée au design et à l'esthétique de la borne, ce qui peut justifier, en soi, une différence de prix.

On voit donc que les bornes sont un outil qui est indispensable pour le développement de l'électromobilité. Et ceci, que ce soit à destination des particuliers pour une recharge à la maison mais aussi pour les bornes professionnelles afin d'offrir des recharges disponibles par exemple dans un lieu public. Cependant, pour intégrer ces nouveaux appareils dans le

réseau existant, il faut encore travailler sur toute une série de point qui n'ont pas encore de cadre pratique ou légal. L'Europe le soulignait d'ailleurs : « challenges still remain, for instance regarding the deployment of smart recharging points, common standards and communication protocols, grid charges, taxation and access to the in-vehicle data » (Eu commision , 8.7.2020).

Gestion des flux

Un exemple d'un produit déjà sur le marché permettra de mieux comprendre quelles applications attendre de ce genre de système. « Le Sunny Home Manager » (© SMA Solar Technology AG, 2021) surveille tous les flux d'énergie du foyer, repère automatiquement les potentiels d'économie et permet une utilisation efficace de l'énergie solaire pour une gestion intelligente de l'énergie encore plus simple et plus économique. » Tout ceci semble une belle promesse, mais quand est-il réellement ? Bien que je ne possède pas encore assez d'informations ou d'expérience dans ce domaine, j'ai pu en tirer certains apprentissages.

Tout d'abord, une distinction doit être faite entre le monitoring (surveillance) et la gestion automatisée. Le monitoring signifie que l'utilisateur peut visualiser et surveiller ses flux énergétiques. Il peut par exemple visualiser sa production solaire et la comparer avec sa consommation. Cependant, le monitoring n'inclut pas spécialement le fait de pouvoir modifier ces paramètres, et encore moins, d'automatiser la gestion.

A l'inverse, la gestion automatisée consiste à laisser des algorithmes s'occuper de la régie des flux. Il pourrait alors, par exemple, et en fonction des paramètres précisés par l'utilisateur, recharger un véhicule à un horaire optimum afin de pouvoir profiter de l'électricité, à ce moment, au meilleur prix.

Un troisième niveau peut être imaginé. Cependant, d'après mes informations sur le terrain, ces fonctionnalités ne sont pas encore disponibles pour le grand public et sont, pour la plupart, en état de test. À terme, un système de gestion intelligent devrait être capable d'utiliser des algorithmes de plus en plus sophistiqués. Par exemple, la gestion des prix dynamiques de l'énergie, à la minute ou à l'heure, est déjà quelque chose qui se fait, mais uniquement pour les professionnels et gros consommateurs. Le système va alors analyser les tendances du marché et l'évolution dynamique du prix achetant ainsi l'électricité du réseau au meilleur prix pour, par exemple, la stocker dans de grandes batteries. Le même raisonnement pourrait être opéré avec les prévisions météo qui ont une influence certaine sur la production des PV, et donc sur la quantité d'énergie à stocker afin d'en disposer ultérieurement à l'instant « t ». Un dernier exemple consiste à maximiser l'autoconsommation en utilisant la production des PV lorsqu'elle est au maximum. Mais comme expliqué, tout cela est encore en phase de test et nécessite encore quelques améliorations.

Enfin, mais cela relève, aujourd'hui, plus du gadget, il existe également la possibilité de connecter différents appareils à l'aide de prises radiocommandées. Cela permet de planifier et de retarder les utilisations des appareils gourmands en énergie, comme les pompes à

chaleur, les chauffages électriques, ... Il est donc déjà possible de les connecter au module intelligent, de visualiser leur consommation individuelle et de les programmer. Reste cependant à comprendre et vérifier la réelle utilité de ce genre de systèmes. Ce qui est certain, c'est que ce type de produits pourrait être d'une grande aide pour augmenter le taux d'autoconsommation.

On peut donc observer que les possibilités sont nombreuses et complexes. Il est donc difficile pour le client lambda de s'y retrouver et de comprendre ce qui est davantage un argument commercial qu'une réelle avancée technologique. En effet, dans ce secteur, les arguments avancés sont souvent imprécis et il est parfois compliqué, en tant que consommateur, de saisir réellement toute la portée de ces systèmes et surtout de savoir de quoi est réellement capable ce module intelligent en option.

C'est donc à ce niveau qu'une entreprise peut créer de la valeur en facilitant le choix des clients et en les accompagnant dans leur transition énergétique. Naturellement, tout en captant une partie de cette création de valeur afin d'assurer son avenir. Une entreprise qui se veut tournée vers l'avenir se doit donc d'être prête à répondre à toutes ces questions. Elle doit endosser plusieurs rôles pour informer, rassurer et, ensuite, convaincre le consommateur. D'une part, elle doit être capable d'informer et de répondre aux questions du consommateur, qu'elles soient techniques ou commerciales, générales ou précises ; bien sûr, chaque membre de l'entreprise ne peut pas être un expert dans tous les domaines mais il est important d'être apte à expliquer les bases tels que le fonctionnement et les avantages qui découlent des différentes solutions et combinaisons. D'autre part, l'entreprise doit également ne pas proposer des solutions standards à tous les clients mais doit par contre personnaliser l'offre en fonction de la typologie et du mode de consommation du client. La solution parfaite ne sera donc pas la même pour chaque consommateur. Le but final étant d'installer une relation de confiance qui permette de fidéliser à long terme le client.

En tout cas, ce qui est certain, c'est que c'est réellement la multiplication de ce genre d'outil de gestion qui permettra de réaliser une meilleure intégration du réseau et d'atteindre une plus grande flexibilité, que ce soit à petite échelle au niveau des ménages, mais aussi à plus grande échelle au niveau du réseau général. Les GRD seront en effet soulagés car les quantités d'électricité injectées et prélevées seront moindres. Ainsi, grâce à cette plus grande flexibilité, les GRD peuvent se concentrer sur d'autres projets renouvelables afin d'intégrer davantage d'ER dans notre mix énergétique. C'est d'ailleurs ce qu'on peut lire dans le rapport européen : « Digitalisation is also key to unleash the full potential of customers having a flexible energy consumption across different sectors to contribute to the efficient integration of more renewable ». Le but est donc de soulager le réseau pour lui permettre d'étendre l'offre en ER.

Combinaison des technologies

Maintenant qu'un aperçu de chaque technologie a été établi, on comprend mieux leurs rôles dans cette transition énergétique. En effet, elles ont toutes, et indépendamment, leurs

avantages et opportunités que nous devons exploiter. Et ce phénomène tend à s'accroître avec les récentes hausses de prix de l'électricité. Les incitants fiscaux et subsides, accompagnés des contraintes émises par les gestionnaires de réseaux ainsi que les nouveaux tarifs (prosumer, capacitaires, ...) vont peu à peu forcer les consommateurs à s'équiper de ces technologies. L'opportunité de se positionner sur ce marché en pleine croissance est donc à saisir.

Mais comment renforcer encore davantage les économies énergétiques réalisées ? En combinant ces technologies afin d'assurer une optimisation maximale. De nouveau, je ne vais pas explorer, ici, toutes les possibilités de combinaison mais le but sera de donner une idée du potentiel qui s'y trouve. Voici donc quelques applications :

- Pompe à chaleur et panneaux photovoltaïques : alors que l'efficacité d'une PAC n'est plus à démontrer, les PV sont la source de production par excellence afin de l'alimenter. Cependant, bien que la PAC ait un rendement et une consommation inférieure à une chaudière classique, elle peut, dans certains cas, consommer beaucoup d'électricité et avec l'augmentation des prix de cette dernière, il est désormais encore plus intéressant de la coupler avec de l'électricité gratuite produite par des PV. De plus, la pompe à chaleur peut fonctionner lors des pics de productions, afin de réchauffer ou refroidir la maison pendant la journée afin d'y garder une température constante plutôt que de causer et accentuer les pics de consommation classiques. Ainsi, on augmente alors considérablement le taux d'autoconsommation.
- Borne de recharge et PV : une borne de recharge peut augmenter considérablement les dépenses énergétiques. En effet, quand on sait qu'une batterie d'un véhicule full électrique peut contenir 80kW, on comprend aisément la quantité future d'énergie électrique supplémentaire dépensée par ménage. Il est alors indispensable de gérer la recharge du véhicule afin que la recharge coûte le moins cher possible. Il est donc, en plus, opportun de planifier la recharge pour qu'elle utilise un maximum l'électricité produite par les PV installés. Ceci simultanément à la production d'électricité par les PV ou alors différée via une source de stockage électrique.
- Batterie domestique et PV : encore une fois, un des problèmes de la production est qu'elle se fait en différé par rapport à la consommation. Il serait donc intéressant de les coupler afin de stocker cette électricité et de pouvoir l'utiliser plus tard.
- Une combinaison plus complexe et peu répandue serait de combiner la PAC et les PV mais d'une manière novatrice. Cette technique a été brevetée il y a quelques années, mais d'après mes recherches, elle n'a pas encore été beaucoup utilisée. La technique consiste à utiliser et « récupérer la chaleur emmagasinée par les panneaux photovoltaïques pour améliorer le rendement d'une pompe à chaleur, elle-même alimentée par l'électricité

produite. De plus le module photovoltaïque produit plus d'électricité quand il est ainsi refroidi. Un stockage intermédiaire d'énergie thermique (« calories ») dans un ballon d'eau chaude est nécessaire car les pompes à chaleur classiques s'arrêtent (par sécurité) au-dessus de 40 °C, alors que l'air chauffé par le soleil peut atteindre 50 °C³¹. »
(Athermic,2021)

Ces combinaisons sont très intéressantes et prometteuses. Cependant, il faut également prendre en compte le coût de ce type de connexion face aux économies réalisées. La dernière solution, par exemple, est peut-être, pour l'instant, trop complexe pour être intégrée dans les systèmes classiques de chauffe. Par contre, ce qui est séduisant, c'est la facilité avec laquelle nous pourrions connecter ces différentes technologies, toujours dans le but d'augmenter l'autoconsommation.

Conclusion

Maintenant qu'un état des lieux sur les technologies a été fait, on comprend mieux le fonctionnement et l'avantage de chacune de celles-ci.

Et pour beaucoup d'entre elles, ces nouveaux appareils sont promus par l'Europe dans une vision à long terme. Que ce soit pour ;

- les bornes de recharge pour leur aide au développement de l'électromobilité ;
- les pompes à chaleur pour l'accroissement de l'électrification du chauffage ;
- les panneaux solaires pour une plus grande part d'énergies renouvelables dans notre mix énergétique ;
- ou encore une batterie pour stocker le surplus d'énergie.

Chaque technologie possède un atout contribuant à un objectif commun : une meilleure intégration du système énergétique, au niveau local, qui permet une plus grande flexibilité du réseau général. Et ce processus peut encore être accentué, avec l'aide de la domotique, par l'ajout de modules de gestion intelligents qui permettent une meilleure répartition des flux et une optimisation de la production et de la consommation. Tout cela, dans le but premier de venir soulager le réseau en réduisant les pics de consommations et de productions.

De plus, il est évidemment intéressant de se rendre compte du potentiel qui réside encore dans la combinaison de ces technologies. Et c'est vraiment vers cette interconnexion qu'il faut essayer de tendre. Et sur ce point, la classe politique peut et doit jouer un rôle important dans l'accompagnement de cette évolution énergétique. Il est important qu'elle soutienne ces initiatives et développe les cadres légaux afférents.

Phase 2 : Données techniques et économiques

Maintenant qu'une explication théorique du fonctionnement de ces nouvelles technologies a été donnée, il est maintenant important de comprendre et saisir les répercussions, avantages, désavantages et contraintes externes à ces technologies. Encore une fois, il ne sert à rien de promouvoir l'installation de 50 maisons équipées de panneaux photovoltaïques si ceux-ci se mettent en défaut de consommation au moment où toutes ces installations produisent en même temps alors que le câble de réseau électrique permettant d'absorber cette production électrique ne le permet pas.

Une observation est donc ci-dessous réalisée au niveau des différentes méthodes de tarifications, des types de compteurs, des caractéristiques de notre réseau électrique et de son raccordement et enfin, au niveau du cadre fiscal qui se dessine peu à peu afin que l'assortiment des technologies proposées soient en concordance avec les contraintes du réseau électrique global.

Tarifs électriques

Bien choisir son tarif, c'est comprendre son profil de consommation et l'exploiter pour réaliser un maximum d'économies. C'est donc une question pertinente qui aura son importance pour définir quelles solutions apporter. Ici, on ne se concentrera pas réellement sur le tarif conclu avec le fournisseur d'énergie, qui fixe un prix au kWh relativement facilement comparable, mais l'accent sera mis sur les économies potentielles à réaliser en optimisant sa consommation électrique.

On observe facilement qu'un tarif en heures creuses est plus intéressant qu'un tarif de jour. Dès lors, on pourrait alors être tenté de faire tourner un maximum d'appareils pendant la nuit. Sauf que avec la venue des PV, cela change tout. Le consommateur a maintenant tout intérêt à maximiser son autoconsommation afin de profiter d'une électricité « gratuite ». Autant au niveau du prix du kWh mais aussi des frais de réseau associés à la consommation électrique (jusqu'à 70% du coût total). Voici donc les différents tarifs que l'on peut retrouver actuellement en Belgique

Mono-horaire

C'est le compteur le plus simple, il ne fait alors pas de distinction entre les heures pleines (jour) et les heures creuses (nuit et week-end). « Avec ce compteur, vous serez facturé un seul et même tarif pour l'électricité consommée, quels que soient l'heure ou le jour de la semaine. » (Debeur, 2022)

Bihoraire

Ici, à l'inverse, le consommateur sera facturé différemment si il consomme le jour ou la nuit et les week-ends. Cette initiative permet au consommateur de faire des économies et permet au GRD d'avoir une meilleure répartition de la consommation. Les horaires sur lesquels le compteur balance du mode jour au mode nuit sont dépendants de la commune (dépendamment du GRD) et de la région.

Exclusif nuit

Encore une fois, ce type de compteur a été inventé pour certaines technologies en particulier. Dans ce cas, il ne fournira exclusivement de l'électricité qu'aux appareils connectés durant la nuit. Cette méthode est notamment utile pour les systèmes de chauffage à accumulation ou les chauffe-eaux. L'avantage est de pouvoir profiter d'une énergie qui est meilleur marché qu'elle ne le serait pendant le jour. De nos jours, ce compteur est très peu utilisé car le prix exclusif nuit est souvent similaire au prix en heures creuses d'un compteur bihoraire.

Tarif Prosumer

Selon l'explication de la région Wallonne, il faut comprendre que le tarif prosumer n'est pas une taxe, mais « un tarif pour l'utilisation des réseaux de transport et de distribution de l'électricité ». Car, « auparavant, le coût de ces réseaux était supporté uniquement par les consommateurs sans panneaux et les prosumers qui consommaient plus d'électricité qu'ils n'en produisent ». (Wallonie, 2021)

Par cet artifice, les régions évitent ainsi une discrimination entre abonnés au réseau électrique et peuvent ainsi lisser les coûts de réseau pour tous.

Sans trop rentrer dans le détail, à l'intérieur de ce tarif, il existe deux tarifications :

- La 1^{ère} ; capacitaire (ou appelé aussi forfaitaire). Calculée sur la plus petite puissance entre la puissance électrique de l'installation PV ou la puissance de l'onduleur. Le montant varie aussi en fonction des provinces. Selon un calcul de la région Wallonne, ce montant est basé sur un taux d'autoconsommation de 37,76%.
- La 2^{ème} ; proportionnelle (ou appelé réel). Ce tarif peut se révéler plus intéressant que le capacitaire si le client estime pouvoir autoconsommer plus que les 37,76%. Il encourage donc fortement l'autoconsommation et doit s'accompagner d'un changement de compteur mécanique vers un compteur digital (explicité plus loin).

Ce tarif existe encore en Wallonie mais disparaît progressivement en Flandre via le plan d'installation des compteurs digitaux et est censé n'être plus disponible à Bruxelles puisque presque tous les compteurs sont à double-flux.

Tarif capacitaire

Avec l'arrivée des voitures hybrides et électriques, il est maintenant devenu compliqué pour les GRD de gérer les pics de consommation qu'engendrent les recharges de ces véhicules. De plus, avec la multiplication des installations PV chez les particuliers, ils doivent gérer une production de plus en plus importante durant les heures diurnes. Il a donc fallu trouver une solution afin de lisser cette consommation et d'inciter les consommateurs à plus autoconsommer leur production. Et dans cette approche, c'est le régulateur flamand, Fluvius, qui a pris de l'avance. Pour janvier 2023, la région flamande appliquera un nouveau tarif ; le tarif capacitaire. Mais que cela signifie-t-il réellement ?

Ce point est extrêmement récent et méritera donc une attention particulière tout au long du projet. Pour l'instant, ce tarif ne concernera que les ménages flamands. Ce système remplacera alors les tarifs en heures creuses et en heures de pointes. Actuellement les frais de réseaux sont calculés sur base de notre consommation. Mais à partir de l'instauration de ce nouveau tarif, des frais différents seront facturés aux consommateurs en fonction du moment où vous utilisez votre électricité. « Ainsi, chaque mois, on enregistrera votre plus gros pic d'utilisation de la capacité réseau sur un quart d'heure de temps ». Il s'agit de votre « puissance de crête ». À la fin de l'année, le régulateur prendra en compte la moyenne de vos plus gros pics pour chaque mois et il en déduira votre tarif capacitaire » (Nguyen, 2022). Mais « même si le niveau moyen de votre pic de consommation est faible, vous devez quand même payer la prime minimale basée sur la pointe mensuelle de 2,5 kW » (Delgado, 2022). Cette mesure minimale a été conçue, notamment, pour palier au fait que certains ménages auront toujours un compteur classique, jusqu'en 2025, comme le prévoit la loi.

À la suite de cette nouvelle disposition, il sera donc normal de vouloir lisser sa consommation d'électricité dans le temps pour diminuer cette puissance de crête. C'est donc dans ce contexte que le système d'optimisation énergétique associé à un compteur intelligent viendra relever le défi d'optimiser les flux réseaux afin de lisser cette courbe de consommation.

Les compteurs

Pour l'instant, il existe 3 types de compteurs en Belgique. Leur fonctionnement est assez compliqué à détailler car cela varie, pour l'instant, par région. Retenons juste, pour l'instant qu'il existe ces trois possibilités suivantes:

Le compteur mécanique

Il faut savoir que, jusqu'à présent, il n'existait pas facilement de moyen de savoir quelle était la consommation instantanée des utilisateurs finaux. Le presque « ancien compteur »

(bien qu'il soit encore très présent en Wallonie) est un compteur mécanique, ou parfois appelé, compteur « qui tourne à l'envers ». Pourquoi cette dénomination ? Avant, ce qui était important pour les GRD, c'était le relevé des index du compteur où un calcul était fait entre le chiffre du début et celui du relevé. Par simple soustraction, on savait donc quelle quantité d'électricité avait été consommée par le ménage. Cette méthode fût suffisante pendant longtemps, jusqu'à l'arrivée et la démocratisation des panneaux photovoltaïques (PV). Pour l'expliquer simplement, lorsque les PV produisent de l'électricité et que celle-ci n'est pas consommée directement, elle est réinjectée sur le réseau. Mais quelle répercussion sur le compteur dans ce cas ? Ce compteur mécanique va, tout bonnement et comme son nom l'indique, tourner à l'envers. À chaque fois que 1 kWh est injecté dans le réseau, 1 kWh est donc soustrait de la consommation finale. Ce qui veut dire que si une habitation possède une consommation de 5000 kWh et une production de 3000 kWh, sa facture s'élèverait à 2000 kWh. « S'élèverait » car, en réalité, ce système représente un manque à gagner pour les GRD et donc, in fine, pour l'état puisque les frais de réseau n'ont été payés que sur 2000 kWh. Alors que frais de réseau sont bien provoqués lors de la consommation des 5000 kWh et en plus, lors du renvoi sur le réseau de 3000 kWh. Les GRD ont donc dû inventer un système permettant de rétablir l'équilibre de partage des coûts de réseau en détenteur de PV et non détenteur car, autre exemple, si un ménage consomme tout ce qu'il produit, sa consommation est supposée nulle. Il profite donc, dans ce cas du réseau sans devoir en payer l'utilisation. Le tarif prosumer, expliqué précédemment, a donc été inventé dans l'optique d'équilibrer les coûts entre propriétaires de PV et ceux qui n'en disposent pas.

Le compteur digital

Pour rappel, via le tarif prosumer, le montant demandé n'est qu'une estimation basée sur les capacités de production. Il ne représente pas l'énergie réellement injectée sur le réseau et n'incite donc pas les utilisateurs à consommer directement leur électricité produite puisqu'ils bénéficient en sorte d'une immense batterie virtuelle qui est en fait constituée du réseau électrique global qui stocke virtuellement l'électricité pour eux. Pour être plus juste, et pour se préparer au futur, le compteur digital a vu son apparition. Ce compteur digital est conçu pour enregistrer précisément la quantité prélevée et injectée ainsi que l'horaire auquel ceci est réalisé. L'agrégation de ces données donne donc une consommation générale et globale d'un groupe d'habitations ou d'entreprises connectées au réseau qui rend donc possible pour les GRD d'établir, plus facilement et de manière plus précise, des prévisions relatives à ces prévisions de consommation. Le tarif prosumer, qui visait donc à répartir de manière équitable la charge financière de l'utilisation du réseau, est ici remplacé graduellement par le placement de compteurs digitaux, capables de calculer exactement l'utilisation du réseau faite par un prosumer.

De par son fonctionnement de rétribution d'injection, l'utilisation d'un compteur digital est moins intéressante d'un point de vue financier qu'un compteur mécanique assorti de son tarif prosumer. Pour celui-ci et lors de l'installation d'un compteur digital, il est donc important

d'augmenter son autoconsommation, sans quoi, sa facture augmentera. Le mode de fonctionnement particulier de ce compteur digital est donc déjà une incitation, en soi, à autoconsommer davantage. Mais cela ne l'est pas encore suffisamment pour faire changer les habitudes des consommateurs. C'est alors là qu'est tout l'intérêt de la mise en place du tarif capacitaire, qui entrera en vigueur en janvier 2023 en Flandre. L'importance de l'installation de tels compteurs intelligents se verra effectivement renforcée par l'arrivée du tarif capacitaire, obligeant les utilisateurs à limiter leurs pics de consommation. Et cette influence est réciproque car l'installation des compteurs digitaux permet aussi l'apparition de ces nouveaux tarifs : « Le développement des « smart meters », les compteurs intelligents, pourrait permettre d'aller plus loin dans la mise en place de tarifs adaptés aux conditions en temps réel » (Energuide, 2022).

Mais pourquoi l'installation de ce compteur est déjà une avancée en soi et inciterait-il à autoconsommer davantage. Il faut d'abord bien comprendre comment il fonctionne. Déjà, le compteur digital possède 4 mesures principales. Il calcule donc :

- l'électricité prélevée – de jour – de nuit (sur le réseau)
- l'électricité injectée – de jour – de nuit (sur le réseau)

Détaillons maintenant le principe. Lorsque de l'électricité est produite, deux options ; soit elle est utilisée directement par le réseau domestique pour l'alimentation de divers appareils, soit elle est réinjectée concernant le réseau (une troisième solution serait de la stocker mais nous y reviendrons dans le point sur les batteries). Si elle est consommée directement, on dira que l'utilisateur autoconsomme et ses appareils seront alors alimentés « gratuitement ». Dans l'autre cas, une rétribution sera accordée au prosumer pour la revente de son électricité sur le réseau. Cependant, cette rétribution est variable car dépendante du fournisseur et du tarif du contrat lié. Quoi qu'il en soit, on comprend ici l'incitation à autoconsommer pour profiter de sa propre production, plutôt que de l'injecter sur le réseau en contrepartie de faibles revenus et de devoir en plus puiser sur le réseau lors de pics de consommation alors à plein tarif.

Mais d'un point de vue économique, un compteur digital pourrait-il être plus intéressant qu'un compteur mécanique ?

La réponse est à nuancer mais il existe certains cas dans lesquels un compteur digital pourrait s'avérer plus économique. Toujours dans l'idée d'autoconsommer, il existe un certain pourcentage à partir duquel le client final pourrait réaliser des économies. Maintenant, là où les romains s'empoignent, c'est au niveau du calcul. En effet, alors que la CWAPE (Commission wallonne pour l'Energie) avance un pourcentage minimum de 37,76% d'autoconsommation, des calculs réalisés par la société SMA Benelux, avec des données moins optimistes ont donné un pourcentage à atteindre supérieur, allant jusqu'à 50%. (SMA Benelux, 2022)

Il y a donc discordance sur le point à partir du moment où il serait plus économique de passer vers le compteur digital. Ce qu'on peut néanmoins retenir, c'est que le chiffre de 37%

est alors un minimum mais que le pourcentage réel dépendra et variera selon les prix de l'électricité, à l'achat et à la vente, et également selon le système de tarification appliqué.

Le compteur « double flux »

Ce compteur est le même que le compteur digital à l'exception faite qu'il ne communique les données sur la quantité consommée et injectée que de manière annuelle. Il a été choisi comme compteur pour et par la région Bruxelloise. La tarification adaptée se fera donc selon les règles en vigueur dans cette région.

Pour résumer ce point sur les compteurs, il faut retenir que, comme annoncé par les autorités régionales, les compteurs mécaniques sont voués à disparaître ; très rapidement en Flandre (2025) et à Bruxelles (double flux) mais un peu moins vite en Wallonie (2030). Notre système d'outils énergétiques doit donc, de toute façon, s'orienter vers ce futur proche et vers une solution pour les compteurs digitaux (ou double flux). Car vu que le compteur mécanique ne renseigne pas de données sur l'état de consommation ou d'injection, le système de gestion ne peut pas gérer, en tant que tel, l'autoconsommation. Du moins, il ne peut pas le faire tout seul. Il aurait alors besoin d'un « energy meter » qui sert d'appareil dont le rôle est de mesurer en temps réel la consommation d'un circuit donné. Grâce à cette lecture des flux énergétique, le système de gestion devrait alors être capable de gérer différents objets connectés et pilotables pour maximiser l'autoconsommation.

Puissance disponible et raccordement

Après avoir choisi les technologies à installer, il nous faut aussi voir ce qui est possible en terme électrique et technique. Dans cette optique, le tableau électrique est un composant central dont on doit tenir compte. C'est de ses caractéristiques que partent toutes les conditions pour l'installation d'équipements. Il faut donc y considérer plusieurs choses.

Tout d'abord, la puissance maximale du tableau, mesurée en Kilo Volts Ampères (kVA). Pour la calculer, il faut connaître l'alimentation qui est en mono- ou triphasé.

Un fonctionnement monophasé (230V) sera généralement accompagné d'une intensité de 40 ampères. En multipliant la tension par l'intensité, on obtient une estimation de la puissance maximale qui, ici, serait de +- 9,2 kVA. Un fonctionnement triphasé (400V), lui, et sans entrer trop dans les détails, permet d'avoir plus de puissance et peut monter jusqu'à +- 17,3 kVA. Grâce au raccordement en triphasé, il est donc possible de charger une voiture électrique plus rapidement grâce à ce 400V, mais aussi de continuer à alimenter les plus petits appareils avec du 230V.

Historiquement, cependant, Bruxelles est majoritairement équipée d'une version triphasée différente. En fait, il s'agit là d'une installation 3x230V (3 phases mais sans neutre). L'ennui

avec ce type d'installation est donc qu'il est techniquement difficile pour le client de charger une voiture de type full-électrique. En effet, le 400V n'est pas disponible et la recharge est donc beaucoup plus longue. Il faudrait donc changer de raccordement mais, plus facile à dire qu'à faire, étant donné que, si la rue ne possède pas encore de triphasé avec neutre, il sera trop coûteux de le faire installer chez le client. Malgré cela, le réseau est occupé à évoluer et se généralise vers un raccordement triphasé avec neutre.

Comprendre l'installation électrique d'un client est donc nécessaire pour savoir vers quels produits et solutions l'orienter.

Ici, l'exemple de la charge de voiture est pris. Cependant, l'influence du raccordement est encore beaucoup plus grande. Le raisonnement est en effet le même pour une pompe à chaleur. Et toutes ces nouvelles consommations qui vont venir s'additionner vont amener rapidement la puissance totale disponible, d'un foyer ou d'une entreprise, à ses limites. Il est donc nécessaire de continuer dans cette modification progressive des raccordements afin que tout le monde puisse disposer d'une puissance suffisante et capable de répondre à l'augmentation des besoins en électricité.

Fiscalité et incitants

Étant donné que ces compétences sont régionalisées, la plupart des primes sont régionales. Cependant, il existe parfois aussi des incitants fédéraux. Notamment, la diminution de la TVA de 21% à 6% sur les PV ou des déductions fiscales proposées lors de l'installation de bornes de recharge. Là, l'idée est d'inciter les entreprises et les particuliers à compléter le réseau de bornes électriques afin de faciliter l'insertion de la mobilité électrique. Je ne vais pas détailler, ici, toutes les mesures mais il faut savoir que le cadre légal évolue très rapidement et est, encore aujourd'hui, en phase de construction.

Flandre

C'est la région la plus avancée en terme de primes et de subsides. Voici quelques exemples :

- PV : 1125 euros maximum (max 40% du prix d'installation) avec un effet dégressif et disparition en 2025.
- Batteries :

| Capacité (kWh) | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 0 - 4 | 300€/kWh | 225€/kWh | 150€/kWh | 75€/kWh |
| 4 - 6 | 300€/kWh | 187,5€/kWh | 125€/kWh | 62,5€/kWh |
| 6 - 9 | 250€/kWh | 150€/kWh | 100€/kWh | 50€/kWh |
| Prime max | 2550 € 40% de la facture | 1725 € 40% de la facture | 1150 € 40% de la facture | 575 € 40% de la facture |

Figure 5 (Green, 2021)

- Pompes à chaleur : les primes sont assez compliquées à comprendre et dépendent vraiment de l'installation, du remplacement d'un ancien système ou non, ...
- Primes à la rénovation diverses ...

Wallonie

Pour l'instant, en Wallonie, il n'existe plus beaucoup de primes.

- PV : suppression des aides pour des nouvelles installations inférieures à 10 kVA. Cependant, vu que le tarif prosumer existe toujours, il y a encore une exonération de ce tarif à hauteur de 50% pour les deux prochaines années. Après, ce sera 100% à charge du propriétaire de l'installation.
- Primes pour l'installation d'un compteur double flux ou communicant
- Primes diverses à la rénovation

Bruxelles

Ici, le photovoltaïque est encore fortement subsidié car la capitale n'est pas dans les meilleurs élèves européens et veut rattraper son retard.

- PV : le vieux système des certificats verts existe encore. Ce sont des certificats accordés, pendant 10 ans, en fonction de la quantité d'électricité produite. Leur nombre varie selon la catégorie de puissance de l'installation. Pour info, « la Région bruxelloise octroie entre 2,7 et 2,5 CV par MWh produit, en fonction de la puissance installée. Le prix du certificat vert varie sur le marché. Ce dernier oscille autour de 93 euros. » (Eco Habitat Belge, 2022)

Il existe aussi « le prêt vert qui peut être cumulé avec des primes et permet d'accéder à un financement de 0 à 2% pour l'installation de panneaux photovoltaïques ».

Enfin, il existe aussi certaines primes communales.

- De nombreuses primes à la rénovation sont également disponibles.

Conclusion

On ne peut donc que constater le problème récurrent du manque d'harmonisation de notre politique énergétique belge.

Ces différences entre régions se retrouvent, à la fois, dans la politique de tarification, dans les types de compteurs, dans le type de raccordement et également dans les avantages et incitants fiscaux.

Pour le consommateur, il est donc souvent alambiqué de comprendre quelles règles s'appliquent pour lui. Il doit donc faire confiance aux installateurs mais qui, eux-mêmes, peuvent aisément s'emmêler les pinceaux dans toutes ces mesures. De plus, ceux-ci doivent

également assurer toute une partie administrative lors des contrôles ainsi que lorsque d'éventuelles primes sont disponibles. Et, malheureusement, ici encore, les démarches et règles sont rarement limpides.

Cependant, ce qu'on remarque, c'est qu'il existe une poussée vers la digitalisation de notre consommation. Au travers des compteurs digitaux, une meilleure connaissance de notre profil de consommateur peut en être retirée. Et cette compréhension est bénéfique, à la fois au consommateur qui peut dès lors, adapter sa manière de consommer mais également aux gestionnaires de réseau qui peuvent alors adapter leurs tarifications et mesures pour une meilleure répartition et prévision. Grâce à cela, on va à l'encontre des problèmes de désynchronisations qui existent entre les moments de production et de consommation.

2. La borne de recharge : élément indispensable pour le futur, la borne de recharge est un appareil de consommation mais qui pourrait également devenir, très vite, un moyen de stockage et de source d'énergie grâce au « véhicule to grid » (V2G et explicité un peu plus loin).
3. Les appareils et prises connectées : ici, deux options :
 - Soit l'appareil (électroménager notamment) est assez récent pour contenir des protocoles de communication compatible avec le module de gestion ; les possibilités de gestion sont alors multiples (tranche horaire, mode et puissance de fonctionnement, ...)
 - Soit l'appareil est trop ancien ou simplement non connecté et on peut alors passer par le biais de prises connectées avec, par exemple, une technologie RFID ; les possibilités de gestion sont alors limitées à un switch on/off.
4. Les pompes à chaleur : elles sont en passe de révolutionner le marché du chauffage mais peuvent s'avérer être des grandes consommatrices d'électricité. Il est donc crucial de les gérer intelligemment pour une utilisation optimale. Mais grâce à leur rendement supérieur, elles se placent en une excellente solution alternative de chauffage. De plus, elles sont aussi un moyen de stockage alternatif grâce à la production et la rétention d'eau chaude sanitaire.
5. Les PV : technologie indispensable dans ce schéma, elle est bien connue et l'offre est d'une largeur telle qu'il est difficile de s'y retrouver. Cependant, lorsqu'on connaît les caractéristiques importantes ainsi que ses propres besoins, il est possible d'établir un choix. Le dimensionnement de l'installation PV sera d'une importance capitale car elle influencera tout le reste du schéma. Ce qui est certain, c'est que ces PV sont devenus aujourd'hui une des technologies les plus rentables et qui deviendra, dans un futur proche, indispensable.
6. Les onduleurs : il en existe plusieurs sortes mais le marché prête particulièrement attention au mode de fonctionnement hybride de certains, permettant de recharger, notamment, une batterie de stockage. Le prix étant toujours assez élevé, une étude préalable, sur les spécificités et les différences entre les modèles proposés, est donc indispensable.
7. Les batteries : justement, ces moyens de stockage sont, sans doute, la technologie la plus onéreuse de ce schéma. Mais il faut reconnaître leur avantage : elles permettent de stocker les surplus de la production des PV afin de les utiliser ultérieurement. Elles déplacent donc la consommation dans le temps et viennent lisser la courbe standard de consommation apportant ainsi de belles économies. Et avec les nouvelles tarifications comme celles basées sur la capacité de puissance électrique, elles seront de plus en plus nécessaires dans une architecture d'autoconsommation.

8. Le compteur : même si, à l'avenir, il n'y aura plus qu'un seul type de compteur, son mode de fonctionnement est à prendre en compte car il influence la manière dont nous allons consommer. Quoi qu'il en soit, sa digitalisation sera un atout non négligeable dans la transformation énergétique. Avec l'apport d'informations précises et périodiques, il sera plus simple de gérer intelligemment sa consommation.
9. L'interface utilisateur : par le biais d'un ordinateur ou de son smartphone, le client peut gérer sa production ou sa consommation et donc, son autoconsommation. Parfois oubliée, cette partie du schéma est très importante car c'est souvent le seul point de contact entre l'utilisateur et les technologies proposées. Cela n'est donc pas à négliger.

Ce schéma a pour vocation principale une utilisation en B2C. En effet, suivant le profil de consommation assez généralisé, toutes ces technologies trouvent un intérêt évident et non négligeable. Cela est aussi lié au fait que les quantités produites et consommées restent dans un ordre de grandeur acceptable. On parle ici de production ne dépassant pas les 10 kWc et les consommations qui, bien souvent, ne dépassent pas non plus les 10 000 kWh par an. On peut donc les gérer assez facilement et sans devoir investir dans des systèmes trop coûteux. Mais, même si ces quantités sont, individuellement, assez faibles, par rapport à la taille d'un réseau électrique entier, mises bout à bout, l'agrégation et la somme de ces différentes consommations/productions de tous les consommateurs pourra poser problème aux GRD. Et ce, comme précédemment expliqué, par l'apparition de pics de consommation de plus en plus importants en quantité et en fréquence. C'est pour cela que ce système est si intéressant, tant pour le consommateur, que les gestionnaires de réseau.

B2B

Pour ce qui est du B2B, le schéma peut être similaire mais les quantités de consommation en jeu seront plus conséquentes. Il faudra donc parfois trouver des technologies différentes pour assurer une production ou une consommation suffisante pour subvenir aux besoins de l'entreprise. Le prix entre également en jeu, de manière assez forte, car les échelles ne sont plus les mêmes. Typiquement, mais sans rentrer dans le détail, une pompe à chaleur ne pourrait pas assurer une production suffisante pour chauffer un gros immeuble. On devra donc réfléchir à d'autres solutions comme de la cogénération par exemple.

Un autre exemple pourrait être la réflexion qui se porte autour d'une production qui est surdimensionnée par rapport aux besoins de l'entreprise. On entrerait alors dans une idée de revente d'énergie ou même le concept de partage d'énergie (plus connue en Flandre sous l'appellation « energie delen »), qui commence à se développer d'abord en Flandre et puis dans les autres régions. Concept de partage très intéressant où une mise en commun des différentes productions voisines peut être réalisée pour une autoconsommation accrue et/ou un stockage optimal. Autre exemple, une source de production peut alors bénéficier à plusieurs points de consommations différents. La plateforme de gestion du réseau est

aujourd'hui déjà prête mais le cadre légal afférent et pratique doit encore être finalisé. Et ce, malheureusement de manière différente pour chaque région ... Des tests sont également réalisés en Wallonie, avec les communautés d'énergie, mais les résultats sont encore en construction. Tout cela relève d'autres compétences et on se limitera donc à assimiler le SOHO (Small Office and Home Office). Ainsi, le schéma de solution optimale peut rester similaire pour ce segment supplémentaire de clients. Une des seules différences marquantes, dont on devra tenir compte dans le dimensionnement des technologies, est le fait que le profil de consommation d'un SOHO sera quasi-inversé, par rapport à un B2C, avec une consommation majoritaire en journée.

Limites et contraintes

Ce qui est très important à retenir est que ce modèle est un modèle théorique idéal. Et comme dans tout idéal, ce ne sera pas toujours atteignable, du moins, dans sa globalité. Certains problèmes et contraintes ont donc influencé mes réflexions et ont guidé certains choix. Ce ne seront donc pas toujours les choix idéaux qui seront sélectionnés mais plutôt ceux qui correspondent le plus avec la réalité actuelle et le profil du consommateur. Ce qui veut dire que ces conclusions sont amenées à évoluer lors de changements externes, comme par exemple une nouvelle politique de tarification. Néanmoins, comme dans tous les secteurs, il faut prendre en compte les contraintes et tenter de les transformer en opportunité. En effet, l'idée est de transformer, par exemple, une tarification moins avantageuse pour ceux qui consomment le plus durant les pics de consommation, en opportunité. Et ce autant pour le client que pour les entreprises. Pour cela, il faut bien comprendre le fonctionnement et la raison d'être de ces contraintes, pour pouvoir mieux trouver les solutions adaptées.

Afin d'augmenter au maximum l'autoconsommation, on compte sur plusieurs technologies qui devraient toutes être connectées entre elles. Et c'est justement cette obligation de connexion qui pose le plus gros problème. Ce point sera détaillé dans la phase suivante du projet.

Outre cela, il y a aussi le fait que la Belgique est un pays où les réglementations donnent du fil à retordre. Le manque d'harmonisation dans la politique énergétique pose problème pour beaucoup d'acteurs. Il est clair que les technologies demandent un nouveau regard et une nouvelle approche sur le cadre légal qui les entoure et en conséquence, je plaide pour une harmonisation de ces nouvelles mesures réglementaires. Il en sera bénéfique pour tous les acteurs, qu'il soit au début ou à la fin de la chaîne.

Exploitation du système

Maintenant que l'on sait comment s'articule ce système d'interconnexions, il faut alors explorer les opportunités commerciales que celui-ci amène. Pour une entreprise comme DEFI

ELEC, tout est potentiellement commercialisable, si ce n'est le compteur réseau, qui relève de la responsabilité du gestionnaire de réseau.

Comprendre ce schéma d'optimisation énergétique est donc l'assurance de connaître et d'anticiper les besoins de ses clients. En effet, on a maintenant compris l'importance et l'intérêt que nous avons à nous diriger vers ce type de package technologique domestique. Cela est, à la fois, bénéfique pour le consommateur qui réalise des économies, et à la fois pour le gestionnaire de réseau en soulageant les pics soumis sur son réseau. De plus, il existe également un intérêt écologique non négligeable à l'utilisation de ce système.

DEFI ELEC possède déjà, pour rappel, une offre en ce qui concerne les bornes de recharges. Tout le reste des équipements est donc assez nouveau pour eux. Forcément, si ils veulent se lancer sur ces différents marchés, bien que très liés, il faudra qu'ils soient capables d'investir dans des ressources humaines et financières permettant l'apprentissage des connaissances nécessaires.

Conclusion

On peut observer que ce schéma d'autoconsommation proposé est complet. Il représente une solution théorique holistique idéale ne prenant pas en compte certains paramètres économiques et techniques.

Mais comprendre toute la portée de ce modèle est une étape cruciale dans la transposition de ce dernier vers la réalité. On perçoit alors tout le potentiel commercial exploitable qui en émane. Ce schéma correspond, dans le cadre de ce travail, au mode de vente B2C. En effet, ces consommateurs ont des profils très similaires dans leur production et leur consommation et disposent donc de spécificités qui permettent l'application de ce modèle de manière généralisée tout en apportant la personnalisation nécessaire. Il en va de même au niveau du petit B2B (SOHO), tant que les chiffres restent en dessous de certains seuils, sans quoi, la méthode de calcul devrait être modifiée.

On observe également que chaque technologie apporte son utilité au modèle global. Par contre, mis bout à bout, les différents investissements peuvent représenter une somme conséquente. C'est une des raisons pour lesquelles la personnalisation est importante. En effectuant ce travail, en amont, on est alors en mesure d'établir une offre qui est modulable, avec des recommandations sur les priorités et qui tient compte des différents aspects technico-économiques afférents au client. Encore plus intéressant, cette modularité doit s'accompagner d'un caractère évolutif. Il faut essayer de prévoir, grâce à cette vue d'ensemble, les besoins futurs du consommateur. Ainsi, il ne sera pas lésé s'il décide d'étaler son investissement sur plusieurs années. De plus, si une nouvelle technologie venait à voir le jour, l'idéal serait de pouvoir l'intégrer dans le système existant en bénéficiant alors de sa fidélité.

Malheureusement, on ne peut que constater toute la complexité qu'amène la manière dont le pouvoir décisionnaire est divisé en Belgique. Ce nouveau modèle de consommation amène déjà son lot de difficultés en terme de compréhension technique. Mais si, on doit y rajouter des complications liées au cadre légal et économique, il va vite devenir impossible pour le consommateur de s'y retrouver. Dès lors, il est donc important, pour les entreprises de se positionner en tant que conseiller, installateur et garant du bon fonctionnement de l'ensemble de ces technologies via monitoring et gestion énergétique pro-active. Et actuellement, on peut remarquer que c'est une démarche qui n'est pas encore, automatiquement incluse dans le processus de vente habituel des sociétés sur le marché.

Phase 4 : Présentation et discussion du résultat théorique obtenu

Nous voici donc au moment où les contraintes et réalités technico-économiques de chaque client doivent entrer en jeu. Pour les cas qui suivent, il faudra toujours garder cela en tête car c'est bien ces paramètres qui m'ont obligé à lister les questions à poser aux clients et à émettre certaines hypothèses et à en réfuter d'autres, afin de personnaliser et offrir à chacun une solution optimale.

Cette phase sera également l'occasion de vérifier, de manière chiffrée, l'utilité de ce système. Les données relatives aux économies d'énergie, et donc monétaires, seront analysées et documentées pour bien comprendre et prouver au consommateur l'utilité de chaque technologie et l'interconnexion de celles-ci. Bien sûr, ce ne seront ici que des résultats théoriques, qui n'auront pas encore été vérifiés dans la réalité du terrain mais la confirmation des résultats se fera lors d'une phase en dehors de ce mémoire.

Compatibilité et interconnexion des systèmes énergétiques

Plusieurs variables influencent grandement l'architecture que va prendre notre schéma d'autoconsommation. Il faut donc en être conscient et en tenir compte lors de la proposition d'une solution globale envers le client. La compatibilité est un des plus gros frein au développement de manière complète et intégrée ce système de manière complète et intégrée, voyons pourquoi.

D'abord, le type de compteur influence les technologies que l'on peut venir greffer dans la maison. En effet, un compteur mécanique ne communique aucune donnée précise et les possibilités de gestion sont donc en conséquence limitées. Le seul moyen d'obtenir ces données est de rajouter des appareils de mesure entre le module de gestion et le compteur. Cependant, toutes les marques ne proposent pas ce genre d'outils. Et c'est pour cette raison que, si l'on veut répondre au besoin d'un client possédant un compteur mécanique, on ne proposera que des marques qui permettent un certain « monitoring ».

Ensuite, le fait d'avoir une installation PV change également les possibilités de connexion. Pour l'expliquer simplement, prenons l'exemple d'Apple® : un Mac® pourra peut-être communiquer d'une certaine manière avec un smartphone Samsung® mais les possibilités seront limitées. Les interfaces sont aussi différentes et la communication n'est donc pas optimale. Par contre, si l'on prend les systèmes Android®, ils peuvent s'intégrer sur plusieurs marques de téléphone. Pourquoi ? Car c'est un choix qui a été fait de la part d'Android® de s'ouvrir à des marques différentes. C'est exactement la même chose qui existe avec les systèmes d'autoconsommation. Certaines marques travaillent en système fermé (uniquement avec leur écosystème) et d'autres en système ouvert. C'est donc pour cela que, si le client possède une installation PV, il est important de connaître la marque de l'onduleur raccordé.

On peut alors, sur base de listes, savoir quels sont les équipements compatibles avec la marque en question.

Le même raisonnement se poursuit avec les modèles de bornes ou de batteries (avec un protocole de gestion ouvert ou fermé) et il sera donc parfois impossible (pour l'instant) de trouver une solution complète et globale pour tous les cas que nous pourrions rencontrer.

Point d'entrée sur le marché

Dans ce système d'outils énergétiques, l'entreprise doit se positionner par rapport à son entrée sur ce marché. Il faut d'abord trouver et choisir la technologie qui lui permettra de se positionner dans ce système interconnecté. Car, rappelons que la force de cette proposition commerciale réside également dans le fait qu'elle se décline sous forme d'un package. Pour le client, les combinaisons lui apportent des économies d'énergie, de manière pérenne, et des économies financières. De plus, grâce à cette interconnexion, il peut aussi décider de rajouter, par exemple une pompe à chaleur, quelques années après son installation PV. Pour l'entreprise qui commercialise ce genre de package, les avantages sont aussi existants : une installation groupée est plus facile et moins onéreuse et le client est, en quelques sorte, fidélisé par ce package adaptatif.

Il faut donc convaincre le client d'entrer dans ce processus et choisir un point d'entrée. Personnellement, je conseille de manière claire d'entrer sur ce marché via l'installation de panneaux PV, pour ensuite, s'ouvrir au reste du schéma d'autoconsommation. L'idée est donc de se concentrer sur deux cibles principales : l'une, comprenant tous ceux qui ne possèdent pas encore de panneaux PV. L'autre cible, ceux qui en possèdent déjà mais qui n'ont pas encore installé d'autres technologies. L'avantage de séparer la réflexion parmi ces deux cibles est qu'on évite l'épineux problème de la compatibilité. Car récupérer un client qui possède déjà des technologies qui ne peuvent pas communiquer est une tâche ardue. Ce choix est également justifié par l'expérience de terrain qui démontre que si, aujourd'hui, de plus en plus de personnes possèdent déjà une installation PV (entre 2% et 20% en fonction des régions), ce pourcentage de gens ne peut qu'augmenter car « en seulement quelques mois, les commandes ont doublé, voire triplé. A tel point que les installateurs de panneaux photovoltaïques ont du mal à suivre le rythme ». (Azzouz, 2022). Il y a donc d'un côté, une demande énorme pour l'installation et de l'autre, une proportion non négligeable de ménages qui possèdent des panneaux PV. En commençant par la commercialisation de cette technologie de PV, le but est donc bien de toucher le plus de clients possible en étant capable d'offrir avec +/- 20% de modèles disponibles, une solution pour presque 80% des cas potentiels.

Variables influençant le résultat théorique

Avant de se plonger dans les résultats théoriques, il faut d'abord noter les différentes variables qui guident notre raisonnement. Un changement de ces variables entraînerait, indéniablement, un changement plus ou moins important des résultats finaux. Ces variables sont également une liste non exhaustive des informations dont a besoin le technicien pour établir les possibilités et le schéma optimum pour ce type de client.

Pour commencer, il est important de noter que **le facteur le plus déterminant dans ces conclusions est le prix de l'électricité**, et du gaz, qui y est malheureusement étroitement lié. En effet, il faut savoir que le prix de l'électricité dépend du gaz dans le sens où ce prix est décidé en fonction du dernier kWh marginal d'électricité produite. Et, étant donné que ce dernier kWh est produit à partir de gaz, le prix de l'électricité augmentera en fonction de celui du gaz. Sur les graphiques suivants, on peut observer la corrélation entre ces deux énergies.

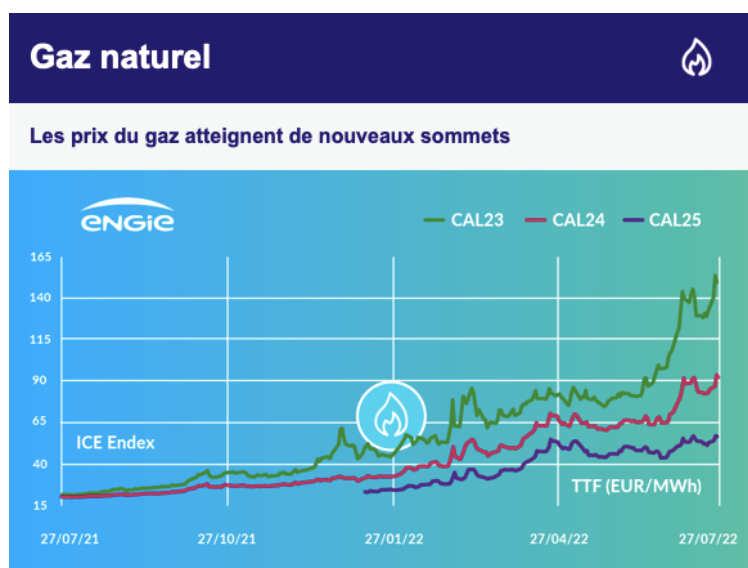


Figure 8 (Engie, 2022)

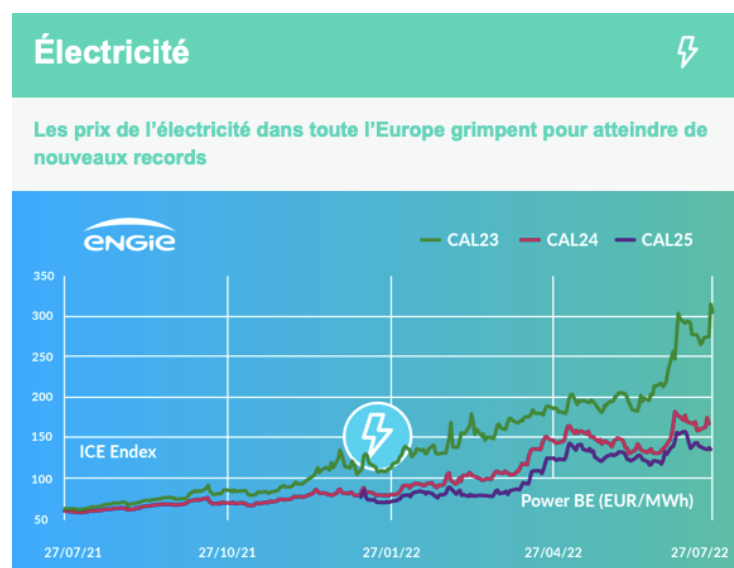


Figure 7 (Engie, 2022)

Les conclusions avancées sont donc à utiliser avec précaution car les prix de l'électricité que nous connaissons aujourd'hui sont très volatiles et cela peut influencer les résultats dans un sens ou dans l'autre.

Les variables dépendantes du prix de l'électricité sont nombreuses. C'est lui qui déterminera, dans certains cas, les prix finaux de revente d'électricité ainsi que les potentielles économies réalisables. Le prix du gaz, lui, n'intervient que lors de la comparaison de système de chauffage (même si il influe sur le prix de l'électricité également).

La deuxième donnée la plus importante est la consommation actuelle et projetée du ménage ou de l'entreprise. Si celle-ci est connue, les résultats seront plus précis. Dans le cas contraire, des hypothèses seront émises pour calculer la consommation actuelle et/ou future, sur base des réponses des clients et des potentielles observations des équipes de terrain.

La troisième donnée capitale sera le type de compteur. Ou plutôt, le type de tarification que le client possède (aussi appelé : « service component » par les fournisseurs). En effet, la tarification sera différente en fonction du compteur et de la région. Maintenant, vu que ce travail a un but de pallier aux différents cas à rencontrer dans le futur, le cas d'un compteur mécanique n'a que peu d'intérêt. Cela est également dû au fait que toute nouvelle installation de PV s'accompagne d'un changement obligatoire du compteur mécanique vers un compteur digital. On privilégiera donc plutôt une réflexion basée sur les différents modèles de tarifications imposés en fonction des paramètres de ce compteur, mais aussi de chaque région. Car, pour rappel, les régions n'ont pas les mêmes systèmes et modèles de tarification. Bien que, depuis novembre 2021, la région bruxelloise est passée pour tous à un système de valorisation de l'injection pour les propriétaires de PV et d'un compteur double-flux. Ce qui équivaut en fait au système flamand qui implique que : tous les propriétaires munis d'un compteur digital soient soumis au tarif de valorisation de l'injection. Par contre, la région Wallonne, n'a, à l'heure actuelle, toujours pas décidé la nouvelle tarification qui viendra prendre place lors de l'arrêt du système de compensation, prévu pour la fin 2024. Nouveauté qui ne vaudra encore que pour les nouvelles installations.

Pour l'instant, ce projet méthodologique est actuellement encore en réflexion et est aussi soumis à l'approbation des différents acteurs de ce marché. Nous ne pouvons donc pour l'instant pas en tenir compte de manière précise mais l'orientation de cette évolution tarifaire ira de toute façon dans le même sens que celui de la Flandre ; à savoir, rendre plus onéreuse la consommation électrique durant les pics de consommation et moins onéreuse durant les heures de production solaire.

Résultats théoriques

Maintenant que les variables sont connues, on peut alors envisager les différents cas de figures et vérifier si le système et ces technologies sont réellement intéressantes d'un point de vue énergétique et financier. Pour cela, **2 analyses peuvent nous aider.**

D'une part, la rentabilité de la technologie elle-même, qui met en relation les économies réalisées face au coût d'investissement. Cependant, il est logique qu'on ne puisse pas simplement additionner l'augmentation d'autoconsommation apportée par une technologie car nous nous retrouverions vite au-dessus de 100%. En effet, si l'on prend une autoconsommation naturelle de 37%, que l'on rajoute une borne électrique, qui l'augmenterait de 30% et une pompe à chaleur qui l'augmenterait de 35%, on se retrouve directement au-dessus de 100% d'autoconsommation. Tout bonnement impossible car cela signifierait qu'on autoconsomme plus que sa production. Pour contrer ce problème, il faut alors prendre les économies marginales apportées. Forcément, le retour sur investissement (ROI) sera alors allongé.

D'autre part, on va venir comparer le **pourcentage d'autoconsommation.** Afin de bien mesurer de manière précise ce pourcentage, il est alors plus utile d'avoir un compteur digital qu'un compteur mécanique. L'évolution de ce pourcentage prouvera ainsi l'influence de celui-ci sur le montant de la facture d'électricité qui baissera.

Les différentes variables à utiliser ici sont :

- Un prix de l'électricité brut (frais de réseaux, transports, diverses taxes, ... compris) de 36 cents/kWh ou 360 €/MWh.
- Un prix de revente (injection) de 12 cents/kWh ou de 120 €/MWh
- Une indexation de ces prix de 1% annuellement (sur 25 ans)
- Une consommation totale annuelle du ménage de 4 730 kWh

Ces chiffres ont été choisis par rapport aux réalités observées sur le terrain et les prix utilisés par les concurrents, notamment en matière de commercialisation de panneaux photovoltaïques. Bien que l'indexation utilisée par certains restent de l'ordre de 2-3%, je ne trouvais pas que cela reflétait complètement la réalité sur un long terme. Cependant, c'est un choix et personne ne peut effectivement prédire le futur.

Rentabilité et influence sur l'autoconsommation de l'installation de panneaux photovoltaïques

Commençons effectivement par l'élément le plus important et le plus simple. Ici, peu importe les cas de figures et les variables encodées, ils restent toujours rentables. La seule chose qui changera sera la durée du retour sur investissement mais elle ne dépassera jamais les 10 ans si leur capacité de production a bien été calculée. Caroline Sury l'affirmait d'ailleurs dans le journal l'Écho en 2021 : « Peu importe la Région, le Belge qui installe des panneaux photovoltaïques peut espérer un rendement d'au moins 5% et un retour sur investissement dans les 7 ans ... les panneaux solaires sont et restent bien plus intéressants qu'un compte d'épargne ... » (Sury, 2021). Et cela est encore plus vrai en 2022 avec les prix que nous connaissons aujourd'hui. Dans certaines configurations, on peut même espérer un ROI de seulement 4-5 ans, soit équivalent à un taux d'intérêt de 20 à 25%. Les panneaux solaires sont donc aujourd'hui un investissement sûr et sain et, je trouve, quasi inévitable pour ceux qui en ont les moyens et les surfaces disponibles.

Rentabilité et influence sur l'autoconsommation de l'installation d'une batterie

En fonction de sa taille, la batterie peut, à elle toute seule, facilement augmenter l'autoconsommation de 40%. Mais pour atteindre cette progression, il faut absolument disposer d'un système de gestion des flux qui optimise son fonctionnement. Cependant, étant donné le prix de ce type d'appareil (prix au kWh de stockage), il est parfois compliqué de réaliser l'investissement qui permettrait un dimensionnement approprié. En effet, selon l'association de protection des consommateurs « Test Achats » et d'autres sources, la capacité de son système de stockage doit être entre 1,4 et 1,6 fois la capacité solaire installée (Lesage & Vanparys, 2022). Pour une puissance solaire installée de 6 kWc, il faudrait donc une batterie entre 8,4 et 9,6 kWh. Et avec un prix au kWh qui oscille, pour l'instant, entre 850 et 1000 euros, il est alors pour beaucoup compliqué de faire l'investissement simultanément à

l'installation des panneaux solaires. Dans un scénario avec les variables actuelles, on évalue le ROI à une quinzaine d'années. Et malheureusement, personne n'a aujourd'hui, assez d'expérience pour affirmer l'état de la batterie après ces 15 années. On sait en effet qu'une batterie se dégrade peu à peu, et plus ou moins, en fonction du nombre de cycles et de la profondeur de charge et décharge. Bien que ce soit optimisé par le système de gestion, on n'a, pour l'instant, pas assez de recul pour émettre des conclusions sur son état au bout de la période. Test Achats a d'ailleurs publié un article qui affirme que, même avec l'octroi de la prime (uniquement en Flandre), que l'investissement n'est toujours pas rentable (Lesage & Vanparys, 2022). Ils affirment d'ailleurs que, pour qu'une batterie soit rentable endéans les 10 ans, il faudrait descendre à un prix de 300 euros/kWh. Je me montre, avec l'expérience, un peu plus optimiste mais il est clair que le prix de cette technologie est encore trop élevé pour que ce soit rentable et finançable par le grand public. Dans mon optimisme, je me permets même d'imaginer un monde où l'investissement d'une batterie ne serait pas individuel mais serait commun (à la mesure d'un même immeuble par exemple) et son utilisation et ses bénéfices, partagés. De toute façon, ce qu'il faut en retenir, c'est qu'une batterie reste le moyen le plus simple d'augmenter rapidement et fortement son autoconsommation dû à la facilité d'installation et de son fonctionnement. Reste à ce que le prix du kWh d'une batterie diminue encore en fonction des économies d'échelle des producteurs et de l'évolution des technologies.

Rentabilité et influence d'une borne de recharge sur l'autoconsommation

En ce qui concerne les bornes de recharge électriques, l'exercice d'analyse est plus compliqué car sa rentabilité dépend de son utilisation. En effet et premièrement, malgré l'ajout d'un système de gestion, une borne de recharge ne peut être active que lorsque le véhicule y est connecté. Tout dépendra donc du type et de la fréquence d'utilisation de la voiture électrique. Une charge en journée augmentera fortement l'autoconsommation tandis qu'une charge de nuit, n'a que peu d'intérêt de ce point de vue (avec un compteur digital). La deuxième analyse est également plus difficile car il faut savoir si le surplus de prix pour un véhicule électrique est inclus dans le calcul de ROI. Encore aujourd'hui, la différence de prix entre une voiture thermique et électrique est encore assez élevée. Et ne pas inclure cette différence rend alors, de toute façon, le ROI d'une borne très intéressant de par son investissement peu onéreux et surtout si on tient en plus compte d'un carburant « solaire » gratuit par rapport à un carburant fossile très onéreux et polluant. Au final, une borne de recharge est quasi indispensable lors de l'achat d'un véhicule électrique. Nous n'émettrons donc pas de conclusion par rapport à ce type d'investissement. La seule information à retenir est que de manière générale, les professionnels du secteur avance une augmentation moyenne de l'autoconsommation de plus ou moins 15% grâce à une borne de recharge.

Rentabilité et influence d'une pompe à chaleur sur l'autoconsommation

La pompe à chaleur ou le boiler thermodynamique sont des technologies qui sont également assez onéreuses. Pour une villa, on peut facilement atteindre les 17 000 euros pour une pompe à chaleur adaptée (air/eau). Mais de l'autre côté, les économies réalisées peuvent très vite s'envoler. On sait que le rendement d'une pompe à chaleur, selon son coefficient de performance (COP), peut être jusqu'à 5 fois plus efficace qu'une chaudière classique (si on ne la compare pas à une chaudière à condensation). Et de par son utilisation d'électricité à la place du gaz, elle peut aussi augmenter l'autoconsommation de manière drastique. En effet, une pompe à chaleur peut consommer beaucoup d'électricité qui, utilisée au bon moment, peut augmenter ce pourcentage de manière forte. On parle également d'une élévation (non marginale) de 45% lorsqu'elle est couplée à un système de gestion. Mais le nœud du problème vient cette fois-ci du prix de l'électricité car, dans la situation actuelle, un prix si élevé vient ramener le ROI à une grosse dizaine d'années, contre seulement 5 ans avec un différentiel plus grand entre le prix du gaz et celui de l'électricité. J'ai la conviction que cette situation va arriver. J'expliquais plus haut la corrélation qui existe actuellement entre le prix de l'électricité et le prix du gaz (en tenant compte du prix de production marginale). En effet, l'Europe essaie de trouver un mécanisme de découplage du prix de l'électricité par rapport au gaz. Si un jour, ce lien venait à sauter, le ROI d'une telle technologie pourrait redescendre à cet ordre de grandeur d'environ 5 ans.

Tableaux récapitulatifs

Maintenant que les différentes technologies ont été abordées, voici deux tableaux récapitulatifs reprenant les conclusions de ce qui a été avancé. Ces tableaux ont été réalisés par mes soins sur Excel en choisissant les variables et en reprenant les résultats des calculs intermédiaires.

Sur le premier tableau que vous trouvez ici plus bas, **les prix moyens de l'électricité de 2021 ont été pris en compte**. La consommation a été établie à 7000 kWh par an et la production solaire augmente d'un kWc par colonne (vers la droite). En ce qui concerne les résultats, la première ligne représente ce que le consommateur aurait eu comme facture, s'il ne disposait pas d'installation PV. La ligne d'après représente toujours sa facture, mais avec une production d'électricité ET un système de compensation vu la présence d'un compteur mécanique. Ensuite, même principe sur la ligne suivante mais avec prise en compte obligatoire d'un tarif d'injection vu la présence d'un compteur digital.

Enfin et en considérant uniquement l'existence d'un compteur digital et d'injection sur le réseau du surplus d'électricité, on peut alors représenter, sur chaque groupe de 3 lignes suivantes, un certain pourcentage d'autoconsommation atteint. En ce qui concerne ce pourcentage d'autoconsommation, on a, dans l'ordre, premièrement le prix total sur la facture, deuxièmement les économies (ou pertes) par rapport au système de compensation et en dernier les économies par rapport au système d'injection mais avec un « 0% » théorique

d'autoconsommation. Pour rappel, l'autoconsommation naturelle, avancée par la CWAPE, s'établirait à 37%. Dans la réalité, on évalue plutôt ce chiffre à 25-30% en fonction du profil du consommateur.

Quelles sont donc les conclusions à tirer de ce tableau ? Fait remarquable mais cohérent, on peut voir que **plus on installe de production solaire, plus la facture diminue et les économies réalisées sont grandes**. Et ce, peu importe l'autoconsommation. On a donc clairement une incitation à utiliser le maximum du potentiel offert par son toit (ou son jardin), qui sera in fine la seule limite physique. Car **dans le cas où on installe une production égale à sa consommation, on peut voir que ce n'est qu'à 50% d'autoconsommation qu'on peut tirer avantage d'un compteur digital et de son système d'injection, face à un système de compensation** (compteur tournant à l'envers). Mais ce qui est plaisant, c'est que **pour tous ceux qui ont déjà un compteur digital, ils peuvent facilement engranger des économies considérables en augmentant l'autoconsommation**. À titre d'exemple, un consommateur, avec une production de 7kWc (+/- 7500 kWh par an de production) et une autoconsommation naturelle de 30%, aura une facture de 759 euros. Si maintenant il ajoute une batterie et augmente son taux d'autoconsommation de 30 à 40 %, il peut descendre sa facture jusqu'à 325 euros, soit une économie de presque 450 euros annuellement.

| Synthèse de scénarios | | | | | | |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | P < C | P < C | P = C | P > C | P > C | P > C |
| Cellules variables : | | | | | | |
| Prod (kWc) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Conso (x1000 kWh) | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Cellules résultantes : | | | | | | |
| Sans PV | 1 890,00 € | 1 890,00 € | 1 890,00 € | 1 890,00 € | 1 890,00 € | 1 890,00 € |
| Compensation (Compteur méca) | 935,00 € | 744,00 € | 553,00 € | 632,00 € | 711,00 € | 790,00 € |
| Injection (Compteur digital) | 1 315,00 € | 1 200,00 € | 1 085,00 € | 970,00 € | 855,00 € | 740,00 € |
| 20% | 1 160,00 € | 1 014,00 € | 868,00 € | 722,00 € | 576,00 € | 430,00 € |
| VS Comp | (225,00) € | (270,00) € | (315,00) € | (90,00) € | 135,00 € | 360,00 € |
| VS Injection | 155,00 € | 186,00 € | 217,00 € | 248,00 € | 279,00 € | 310,00 € |
| 30% | 1 082,50 € | 921,00 € | 759,50 € | 598,00 € | 436,50 € | 275,00 € |
| VS Comp | (147,50) € | (177,00) € | (206,50) € | 34,00 € | 274,50 € | 515,00 € |
| VS Injection | 232,50 € | 279,00 € | 325,50 € | 372,00 € | 418,50 € | 465,00 € |
| 37% | 1 028,25 € | 855,90 € | 683,55 € | 511,20 € | 338,85 € | 166,50 € |
| VS Comp | (93,25) € | (111,90) € | (130,55) € | 120,80 € | 372,15 € | 623,50 € |
| VS Injection | 286,75 € | 344,10 € | 401,45 € | 458,80 € | 516,15 € | 573,50 € |
| 40% | 1 005,00 € | 828,00 € | 651,00 € | 474,00 € | 297,00 € | 120,00 € |
| VS Comp | (70,00) € | (84,00) € | (98,00) € | 158,00 € | 414,00 € | 670,00 € |
| VS Injection | 310,00 € | 372,00 € | 434,00 € | 496,00 € | 558,00 € | 620,00 € |
| 50% | 927,50 € | 735,00 € | 542,50 € | 350,00 € | 157,50 € | (35,00) € |
| VS Comp | 7,50 € | 9,00 € | 10,50 € | 282,00 € | 553,50 € | 825,00 € |
| VS Injection | 387,50 € | 465,00 € | 542,50 € | 620,00 € | 697,50 € | 775,00 € |
| 60% | 850,00 € | 642,00 € | 434,00 € | 226,00 € | 18,00 € | (190,00) € |
| VS Comp | 85,00 € | 102,00 € | 119,00 € | 406,00 € | 693,00 € | 980,00 € |
| VS Injection | 465,00 € | 558,00 € | 651,00 € | 744,00 € | 837,00 € | 930,00 € |
| 70% | 772,50 € | 549,00 € | 325,50 € | 102,00 € | (121,50) € | (345,00) € |
| VS Comp | 162,50 € | 195,00 € | 227,50 € | 530,00 € | 832,50 € | 1 135,00 € |
| VS Injection | 542,50 € | 651,00 € | 759,50 € | 868,00 € | 976,50 € | 1 085,00 € |

Tableau 9 (Declerck Lucas, 2022)

Maintenant, comme expliqué ci-dessus, il faut mettre en relation investissement et économie marginale.

Avec le **deuxième tableau** ici plus bas, on reprend ici les **prix de l'électricité que nous connaissons aujourd'hui en 2022**. Les **conclusions sont similaires** si ce n'est que, dans ce cas, il faut encore davantage augmenter son autoconsommation pour s'y retrouver financièrement par rapport à un système de compensation (compteur tournant à l'envers). Mais du coup, pour quelqu'un qui possède déjà un compteur digital, l'augmentation de l'autoconsommation est encore plus intéressante car, pour une même hausse de ce pourcentage d'autoconsommation, les économies seront beaucoup plus intéressantes. À titre d'exemple, un consommateur avec une production de 7kWc qui augmente son autoconsommation de 40% (par rapport à 0%) économisera, selon les prix de l'électricité de 2021, 434 euros à comparer à une économie jusqu'à 688 euros si on prend les prix de l'électricité de 2022. L'incitation est donc belle et bien présente.

| Synthèse de scénarios | | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | P < C | P < C | P = C | P > C | P > C | P > C |
| Cellules variables : | | | | | | |
| Prod (kWc) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Conso (x1000 kWh) | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Cellules résultantes : | | | | | | |
| Sans PV | 2 590,00 € | 2 590,00 € | 2 590,00 € | 2 590,00 € | 2 590,00 € | 2 590,00 € |
| Compensation (compteur méca) | 1 135,00 € | 844,00 € | 553,00 € | 632,00 € | 711,00 € | 790,00 € |
| Injection (Compteur digital) | 1 970,00 € | 1 846,00 € | 1 722,00 € | 1 598,00 € | 1 474,00 € | 1 350,00 € |
| 20% | 1 724,00 € | 1 550,80 € | 1 377,60 € | 1 204,40 € | 1 031,20 € | 858,00 € |
| VS Comp | (589,00) € | (706,80) € | (824,60) € | (572,40) € | (320,20) € | (68,00) € |
| VS Injection | 246,00 € | 295,20 € | 344,40 € | 393,60 € | 442,80 € | 492,00 € |
| 30% | 1 601,00 € | 1 403,20 € | 1 205,40 € | 1 007,60 € | 809,80 € | 612,00 € |
| VS Comp | (466,00) € | (559,20) € | (652,40) € | (375,60) € | (98,80) € | 178,00 € |
| VS Injection | 369,00 € | 442,80 € | 516,60 € | 590,40 € | 664,20 € | 738,00 € |
| 37% | 1 514,90 € | 1 299,88 € | 1 084,86 € | 869,84 € | 654,82 € | 439,80 € |
| VS Comp | (379,90) € | (455,88) € | (531,86) € | (237,84) € | 56,18 € | 350,20 € |
| VS Injection | 455,10 € | 546,12 € | 637,14 € | 728,16 € | 819,18 € | 910,20 € |
| 40% | 1 478,00 € | 1 255,60 € | 1 033,20 € | 810,80 € | 588,40 € | 366,00 € |
| VS Comp | (343,00) € | (411,60) € | (480,20) € | (178,80) € | 122,60 € | 424,00 € |
| VS Injection | 492,00 € | 590,40 € | 688,80 € | 787,20 € | 885,60 € | 984,00 € |
| 50% | 1 355,00 € | 1 108,00 € | 861,00 € | 614,00 € | 367,00 € | 120,00 € |
| VS Comp | (220,00) € | (264,00) € | (308,00) € | 18,00 € | 344,00 € | 670,00 € |
| VS Injection | 615,00 € | 738,00 € | 861,00 € | 984,00 € | 1 107,00 € | 1 230,00 € |
| 60% | 1 232,00 € | 960,40 € | 688,80 € | 417,20 € | 145,60 € | (126,00) € |
| VS Comp | (97,00) € | (116,40) € | (135,80) € | 214,80 € | 565,40 € | 916,00 € |
| VS Injection | 738,00 € | 885,60 € | 1 033,20 € | 1 180,80 € | 1 328,40 € | 1 476,00 € |
| 70% | 1 109,00 € | 812,80 € | 516,60 € | 220,40 € | (75,80) € | (372,00) € |
| VS Comp | 26,00 € | 31,20 € | 36,40 € | 411,60 € | 786,80 € | 1 162,00 € |
| VS Injection | 861,00 € | 1 033,20 € | 1 205,40 € | 1 377,60 € | 1 549,80 € | 1 722,00 € |

Tableau 10 (Declerck Lucas, 2022)

Approche B2B

Si on prend un cas de petit B2B (=SOHO ; Small Office and Home Office), le profil de production reste inchangé mais le profil journalier de consommation s'inverse puisque une entreprise consomme très majoritairement durant les heures de bureau alors qu'un consommateur particulier consommera majoritairement le matin tôt et en soirée. Et c'est là

que la réflexion sera différente car l'autoconsommation naturelle sera plus élevée puisque ce type de segment emploie fortement l'énergie durant la journée. L'objectif sera alors toujours d'augmenter ce taux mais il sera surtout accompagné d'une gestion plus intelligente de cette consommation. Cette idée peut se mettre en application par, notamment, un stockage de masse ou même avec la technologie V2G (Vehicle to grid). On devra pour de tels clients aborder et commercialiser d'autres aspects tels que la revente d'énergie ou d'autres concepts encore non explicités ici comme le partage d'énergie. Comme expliqué précédemment, nous ne rentrerons pas trop dans les détails car ces domaines relèvent de compétences différentes et encore plus pointues et qui mériteraient une analyse tout-à-fait particulière mais nous donnerons quand même une petite explication ici plus bas au chapitre 4. Ce qui est néanmoins important à comprendre, c'est que le principe et le schéma général reste le même mais que ce qui change réellement, c'est la façon de consommer ainsi que le mode de gestion de cette énergie.

Résumé et conclusion

Voici ce qui peut être appris de cette phase 4 reprenant les résultats théoriques de l'installation d'appareils énergétiques permettant d'augmenter son autoconsommation et de diminuer automatiquement sa facture énergétique mais aussi son empreinte écologique.

Le premier apprentissage est l'importance du problème de compatibilité et d'interconnexion qui a été pointé du doigt. Et il est important, pour les entreprises, d'en tenir compte lors du développement de l'offre de ce système de technologies.

Ensuite, on a évoqué le fait que pour des entreprises voulant profiter de cette opportunité de marché, il leur faut choisir un point d'entrée, un angle d'attaque, qui permettra de commercialiser graduellement les bases d'un package énergétique en fidélisant le client afin de s'assurer de l'installation des futurs appareils énergétiques complémentaires à connecter. Et c'est tout naturellement que les **panneaux photovoltaïques** qui se sont imposés **comme technologie indispensable de base**. De par sa rentabilité en un très court espace de temps mais aussi via son apport en terme de bénéfices technologiques, écologiques et économiques.

Le troisième apprentissage capital, c'est **l'évolution des résultats en fonction des variables choisies et de leurs fluctuations**. Souvent les ROI sont établis sur une base de 25 ans alors que personne n'est capable de prévoir à long terme le prix de l'électricité, du gaz, ou même des primes et du cadre légal qui seront d'application à une période donnée. Il faut donc être très prudent par rapport aux conclusions avancées et faire preuve d'esprit critique. Garder ces hypothèses en tête permettra de comprendre dans quels cas la situation peut évoluer en fonction des fluctuations des variables.

Enfin, en fonction des trois premiers apprentissages décrits ici plus hauts et grâce aux résultats théoriques chiffrés, on a pu se rendre compte de la réalité économique et tirer les conclusions pratiques et claires suivantes.

On a pu se rendre compte de **l'utilité des panneaux PV et de leur rentabilité**. Grâce à ceux-ci, on débloque de nombreux avantages et bénéfices. En effet, grâce à cette installation, on auto-produit et on réalise donc une économie considérable avec déjà, au minimum, son autoconsommation naturelle. Pour une personne possédant une installation de production similaire à sa consommation, sa facture peut directement être diminuée par deux (avec les prix de l'électricité de 2022). L'utilité et l'investissement dans les panneaux PV ne devraient donc même plus se discuter.

A partir du moment où l'on autoproduit, il s'agit d'augmenter le plus possible son autoconsommation avec l'ajout d'appareils énergétiques spécifiques. Pour cela, il faut partir de l'hypothèse que le client ne fasse pas d'investissements importants uniquement dans un but purement économique mais davantage dans un double objectif mixte d'économie et d'écologie. En effet, si l'on prenait en compte uniquement le facteur économique, les conclusions seraient très dépendantes des primes ou prix des technologies. Ici, dans la proposition à faire au client, on doit raisonner plus dans une vision opportuniste puisque celles-ci améliore les résultats et la proposition financière qui est conjointe. N'oublions pas que ce ne sont que des propositions envers le client et que ce dernier restera libre de valider certains choix ou d'adopter progressivement certaines technologies et pas d'autres.

Pour augmenter l'autoconsommation, voici les différentes possibilités qui s'offrent au client :

- **L'installation d'une batterie domestique.** Ici aussi, il existe une capacité de stockage idéale permettant de réaliser le maximum d'autoconsommation. Forcément, compte tenu du prix des batteries encore élevé, le choix du client ne se portera pas toujours sur la solution optimale. C'est pour cela qu'il faut partir du principe que le but n'est pas qu'économique.
- Avec l'électrification de la mobilité, une **borne de recharge** deviendra bientôt **indispensable**. Encore une fois, l'offre dans ce domaine est très large et il faut donc bien comprendre le marché pour offrir au client la solution la plus adaptée. Dans cette optique, certaines caractéristiques sont indispensables et doivent se retrouver au sein des bornes sélectionnées. Ceci, toujours dans le but de maximiser l'utilisation de la production, par le biais de la communication entre technologies ainsi que via la gestion intelligente des flux.
- L'installation ou le **changement du système de chauffage, type pompe à chaleur**. Malgré que cet investissement soit le plus onéreux, c'est aussi potentiellement le plus rentable dans un monde où le prix de l'électricité ne dépendrait plus directement du prix du gaz. Par contre, niveau design technique, c'est également le plus compliqué à mettre en œuvre dans des travaux de rénovations. Il faut donc vérifier et, si besoin, adapter l'offre pour qu'elle corresponde aux besoins et possibilités de rénovation.
- Enfin, il sera **indispensable de disposer d'un « cerveau énergétique »** qui viendra chapeauter le tout et qui permettra de réaliser toutes ces économies et avantages.

Maintenant, dans une optique où toutes ces technologies sont liées, il faut alors prendre en compte l'avantage marginal d'autoconsommation apporté par chaque technologie et ne pas procéder à une simple addition de l'avantage économique de chaque appareil énergétique. En effet, le facteur limitant est ici la quantité de production solaire via l'installation photovoltaïque.

D'ailleurs un dernier point à ajouter serait que, étant donné l'incitation à maximiser sa production solaire personnelle, les pics de productions, s'il ne sont pas absorbés par le consommateur lui-même, vont venir alourdir la gestion du réseau. Et je ne parle ici même pas des pics de consommation qui vont indubitablement venir s'ajouter avec l'électrification de la mobilité et du type de chauffage électrique. C'est, encore une fois, la preuve qu'il est **important d'inciter également à l'autoconsommation pour prévenir ce problème de pics**. Cela permettra d'éviter une réaction catastrophique et en chaîne dans le cas où le problème est géré trop tard.

Phase 5 : présentation et discussion du résultat réel obtenu

Maintenant que la théorie a été exploitée, l'intérêt pour ce type de solution est indéniable et doit être encore exploré davantage. Ce domaine d'expertise est encore aujourd'hui assez nouveau et les retours sur expériences ne sont pas nombreux. De plus, il existe également une part de secret autour des résultats car beaucoup rêveraient de pouvoir commercialiser le système complet optimal.

Cependant, j'ai réussi à me procurer quelques données et graphes qui attestent du bon fonctionnement de ces solutions. Le but de cette phase sera donc de vérifier nos hypothèses en ayant un résultat provenant directement du terrain. Malheureusement, je n'ai pas pu récolter, pour l'instant ce genre de données pour toutes les technologies envisagées dans notre système complet. Cependant, j'espère que ces résultats vous prouveront tout le potentiel qui réside encore aujourd'hui dans l'interconnexion de ces technologies. Le travail déjà réalisé par certaines entreprises est remarquable mais les possibilités sont encore nombreuses et il faudra laisser le temps aux personnes compétentes pour développer le reste du système.

Avant de vous présenter les graphes suivants, il me faut préciser que les quantités qui entrent en jeu n'ont que peu d'importance. Ce qu'il faut retenir, ce sont les conclusions amenées par ces résultats provenant du terrain. Cette entreprise est équipée, pour le moment, d'une production PV, d'une batterie de stockage, ainsi que d'un système de gestion intelligent qui permet d'optimiser le fonctionnement des technologies.

Avec ce premier graphe ci-dessous, de nombreuses informations peuvent y être extraites.

Cette entreprise dispose d'une installation PV qui produit une certaine quantité d'électricité. De cette quantité, 20% sont consommés directement par les appareils, machines, serveurs, ... Le reste est donc normalement injecté sur le réseau car non consommé immédiatement. Cependant, l'entreprise dispose ici d'une batterie de stockage. Et celle-ci lui permet de stocker, en moyenne, 19% supplémentaire de sa production. Il stocke donc cette électricité pour la restituer plus tard, lorsque la production sera inférieure à la consommation.

Mon énergie

Données jusqu'à 03 août 13:45

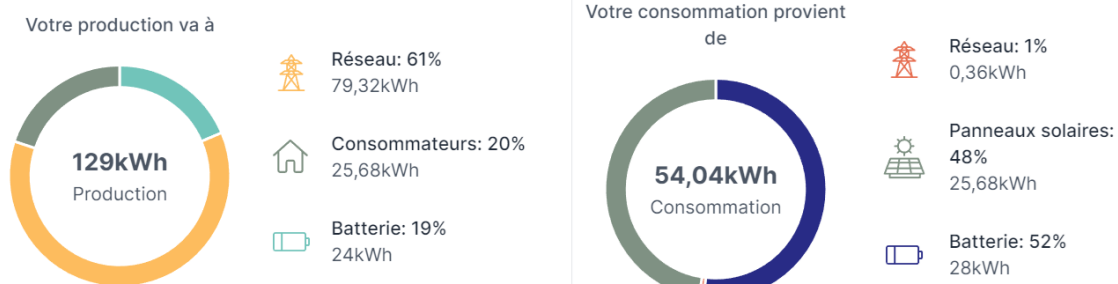


Figure 11 ((LEWIZ, 2022)

L'autoconsommation de l'entreprise n'est donc plus de 20% mais de 39%, représentant l'addition de la consommation directe et le stockage de la batterie. L'électricité alors injectée ne représente plus que 61%. Et cette diminution d'injection représente une économie considérable pour l'entreprise. En effet, plutôt que de tirer, plus tard, de l'électricité sur le réseau, à un prix du marché intégrant entre 40 et 60% de frais autres que la molécule d'électricité, il utilise une électricité « gratuite », provenant de sa production.

Le cercle de droite représente sa consommation totale. Celle-ci est également divisée en 3 parties : l'électricité prélevée du réseau, celle prélevée de la batterie ou encore directement de sa production via ses PV. Fait assez étonnant, l'entreprise s'alimente à hauteur de 52% via sa batterie et via 47% de sa production directe d'électricité grâce aux PV. Il ne reste donc que 1 seul petit pour-cent prélevé sur le réseau en payant uniquement sur cette consommation tous les frais divers qui sont intégrés à cette provenance (entre 30% et 60% de frais divers intégré à une facture d'électricité). Il faut donc s'imaginer que, sans batterie, cette société devrait prélever 52% d'électricité en plus du réseau, au plein tarif donc. L'économie réalisée est en donc glorieuse.

Le graphique suivant confirme ce que nous venons de voir : l'apport d'électricité pour faire face à la consommation totale provient de la somme d'une part de l'électricité autoconsommée provenant des panneaux PV, ici représenté sur ce graphe par la notion de « consommation personnelle » et d'autre part de l'électricité restituée par la batterie. Sur cette semaine de consommation reprise sur ce graphe, on peut y voir qu'il n'y a qu'un seul jour où de l'électricité supplémentaire à due être prélevée sur le réseau pour faire face à un petit pic de consommation. Forcément, cette semaine est du mois de fin juillet et la production solaire est donc élevée. Mais quand bien même, cela prouve l'efficacité du système avec ici, simplement, une production solaire, une batterie, et un système de gestion. On imagine donc facilement les possibilités supplémentaires débloquées par l'ajout d'autres technologies.

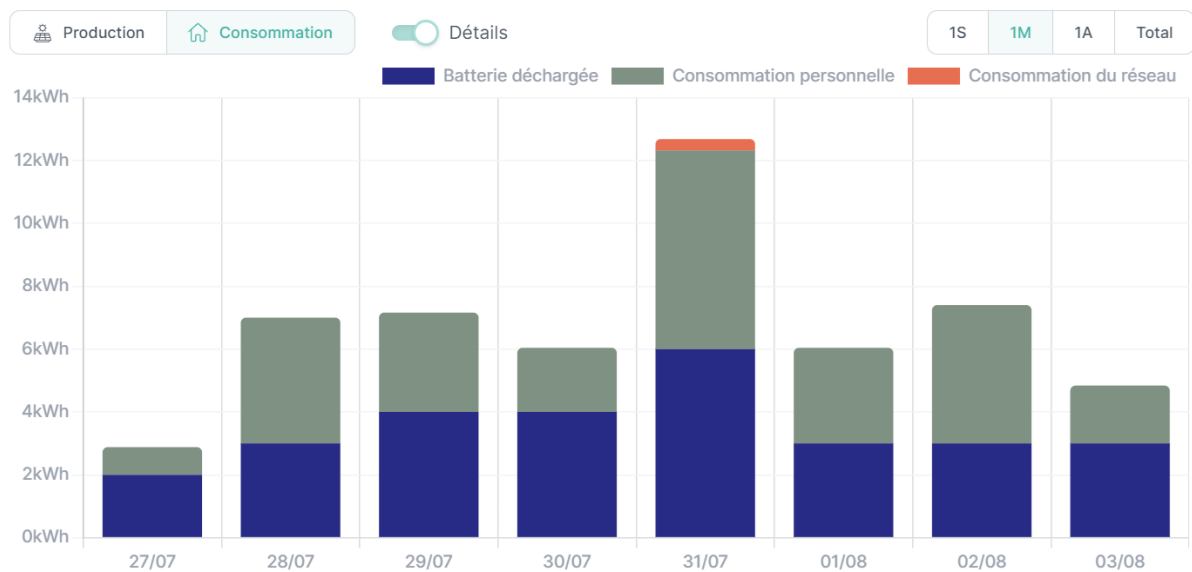


Figure 12 (LEWIZ, 2022)

Voici deux autres graphiques ci-dessous d'un autre type qui illustrent ces conclusions sur l'utilité d'une batterie. Afin de démontrer l'utilité d'une batterie, imaginons alors un instant sur ce graphe que la batterie est hors fonctionnement. Dans ce cas, le premier point d'attention se situe dans le premier graphique, reprenant production et consommation. On se rend compte que, plusieurs fois dans la journée, les pics de consommation (courbe orange) dépassent la production solaire instantanée (courbe verte). Ce qui signifie donc que l'électricité supplémentaire nécessaire doit être prélevée sur le réseau au vu des limites de production des PV, et ceci au plein tarif. Et le phénomène inverse est également à déplorer car, lorsque le soleil produit plus que l'on ne consomme, cette électricité est réinjectée sur le réseau, avec une rétribution bien moindre que le coût total de l'électricité prélevée sur le réseau (maximum à 2 tiers du coût global de l'électricité). Et ce serait encore pire avec un tarif capacitaire. En effet, de par son fonctionnement, le consommateur payerait encore plus cher l'électricité prélevée pour couvrir son pic de consommation.

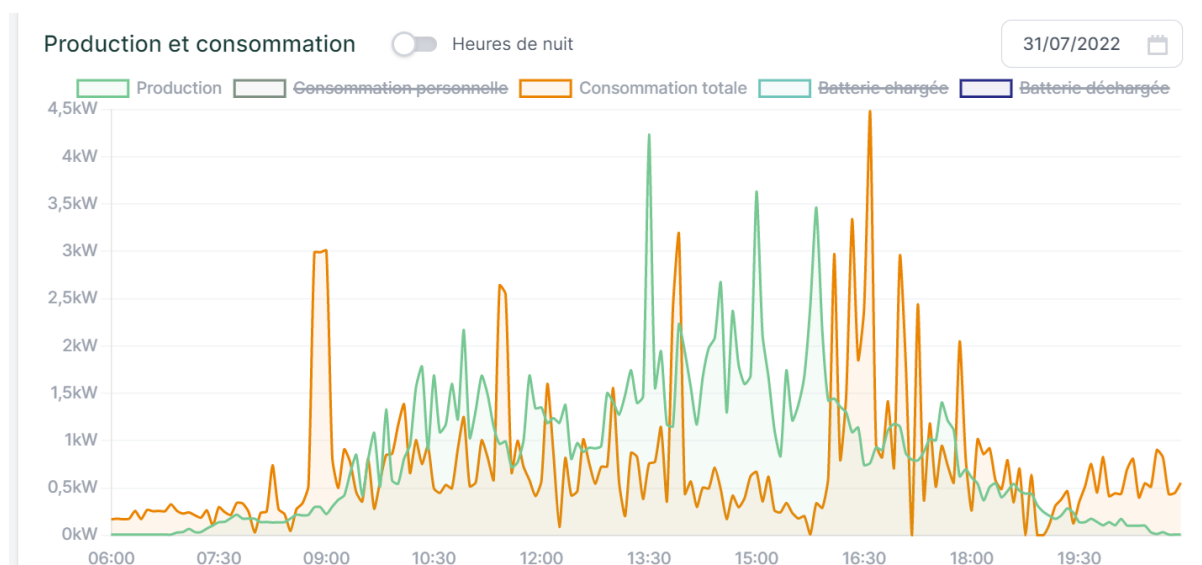


Figure 13 (LEWIZ, 2022)

Le deuxième graphique ci-dessous montre que grâce à l'existence d'une batterie, à chaque pic de consommation, celle-ci vient, si nécessaire, en aide à la production solaire, pour contrebalancer l'excédent de demande. Et cela, c'est le système de gestion qui le commande, grâce à son analyse précise en temps réel des flux, entrants et sortants de la maison.

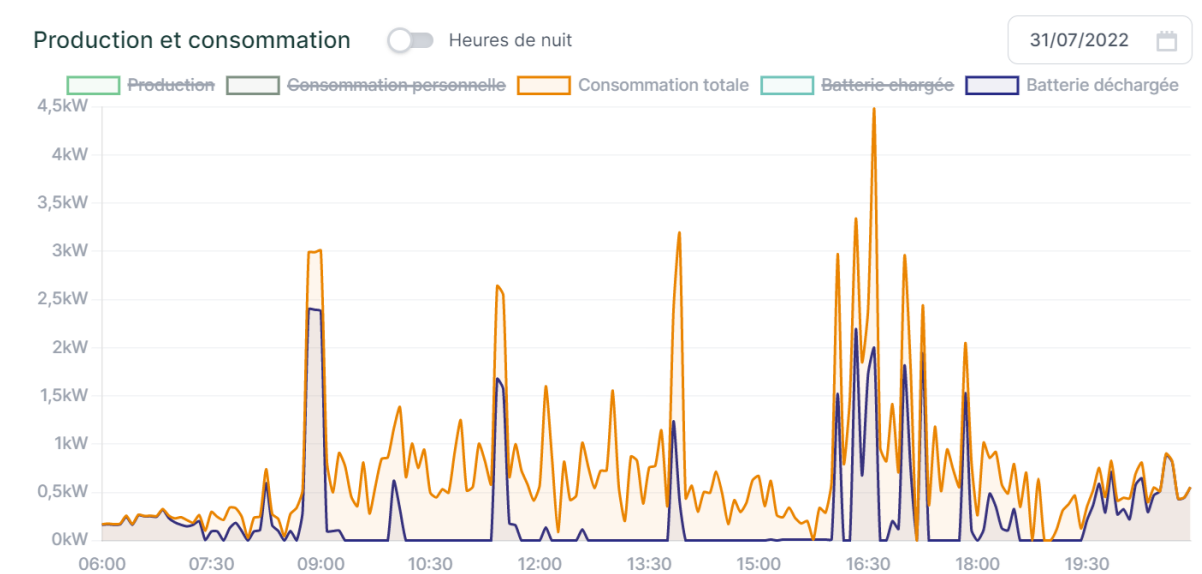


Figure 14 (LEWIZ, 2022)

Mais comment fonctionne réellement cette gestion énergétique en temps réel ? Voici un graphe ci-dessous qui reprend l'explication et détaille un peu plus la manière dont sont gérés les flux. D'abord, on voit que lorsque la production (courbe verte foncée) est supérieure à la consommation (courbe orange), le système de gestion en profite pour recharger la batterie avec l'excédent solaire (courbe verte claire). Si la demande augmente, la recharge diminue alors automatiquement pour donner la priorité à la consommation directe (appareils,

machines, ...). Une fois la batterie chargée et même si elle ne l'est pas pleinement, elle est alors capable de restituer à n'importe quel moment son électricité stockée, si besoin en est. Et cela se démontre, sur ce graphe, à plusieurs moments dans la journée. On observe que lorsqu'un pic de consommation est détectée, la première étape pour le système de gestion sera d'utiliser toute l'électricité solaire disponible. Si celle-ci ne suffit toujours pas à combler ce pic de consommation, le système de gestion va alors demander à la batterie de restituer une part de son électricité stockée afin de faire face à cette demande. Une fois le pic de consommation passé, le système reprend son cours normal et la batterie est prête à être à nouveau chargée via la production solaire.

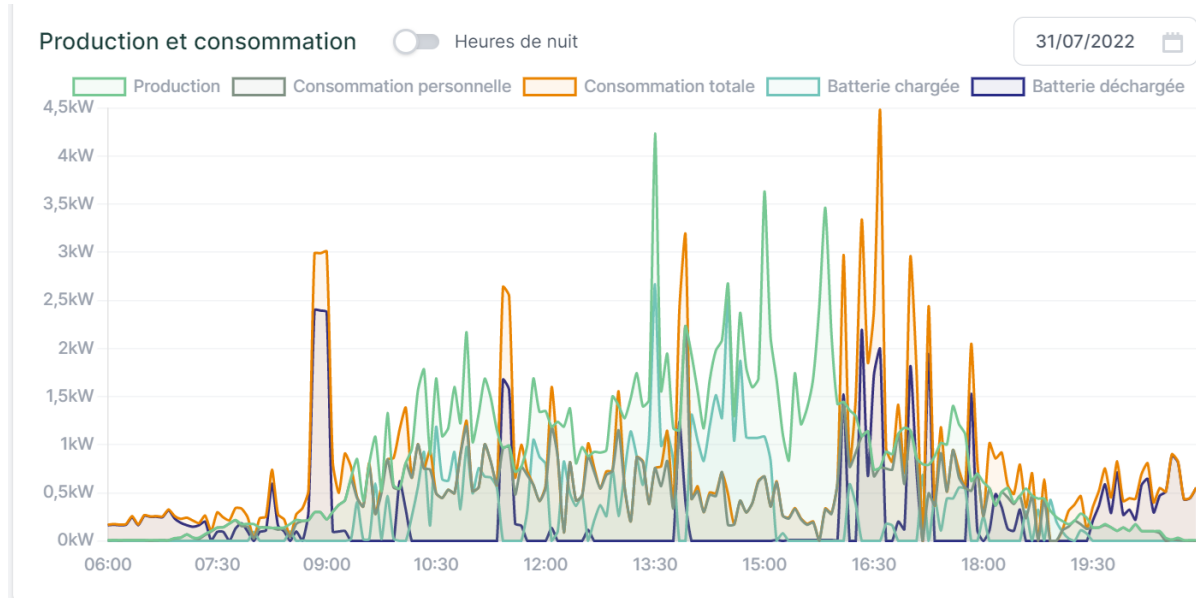


Figure 15 (LEWIZ, 2022)

Ce qu'il y a de fascinant dans ces quelques conclusions est qu'il est maintenant aisé d'imaginer le potentiel qui réside encore dans une interconnexion plus grande avec par exemple une pompe à chaleur, des bornes de recharges, ou autres appareils.

Et les avantages de ce système ne s'arrêtent pas seulement aux économies réalisées par le propriétaire. Le réseau est, lui aussi, doublement soulagé car de manière agrégée, ce réseau doit gérer une quantité injectée et prélevée inférieure. Plusieurs objectifs sont alors atteints :

- Un système énergétique plus circulaire via une utilisation de l'électricité locale.
- Une électrification directe accrue par l'électrification du chauffage et de la mobilité.
- Une meilleure intégration énergétique qui apporte une flexibilité du réseau supérieure qui aide donc à accroître la part d'énergies renouvelables installables dans notre mix énergétique.

Chapitre 4 : Bilan et perspectives du projet

Analyse critique et mise en perspective

Lors de ce projet et, grâce à ce mémoire, j'ai pu progresser dans de nombreux domaines, et en particulier, celui de l'énergie. J'ai pu acquérir de nouvelles connaissances théoriques et développer également mes compétences pratiques, lors de mes confrontations à la réalité du terrain. Je suis maintenant capable d'être une personne ressource dans les domaines de l'électromobilité, le photovoltaïque, le chauffage (électrique), ... Bien que je ne me prétende, en aucun cas, expert dans l'un de ces domaines, j'ai acquis assez de connaissances pour avoir une vision globale du monde électrique qui nous entoure. Et c'est exactement ce qu'on nous demande en tant qu'ingénieur de gestion. Le côté technique a, ici, été développé mais il est toujours resté en lien étroit avec le caractère économique. En effet, pour un projet comme celui-ci, il faut toujours garder en tête ce côté économique, qui guide de nombreux choix et réflexions.

Ce stage en gestion de projet m'a également permis de comprendre et d'apprendre davantage sur l'électricité, de manière générale. Il était impressionnant de voir à quel point je, comme beaucoup d'autres, n'y connaissais rien au fonctionnement de notre réseau domestique, et, à fortiori, de notre réseau global. Des notions de base sur le fonctionnement de notre tableau électrique, de notre raccordement, ... m'étaient inconnues et pourtant, ce sont ces mêmes notions qui ont guidé et influencé le développement de notre système d'interconnexions d'outils énergétiques.

Cependant, il me reste quand même un petit goût amer. J'aurais aimé pouvoir aller encore plus loin, en élargissant la réflexion au B2B, à grande échelle, en incluant les notions de partage d'énergie, de prix dynamique d'électricité, ... Mais surtout, là où j'ai été déçu, c'est par notre mode de fonctionnement belge. Le cadre légal peine à suivre et empêche même souvent certaines améliorations. La régionalisation des compétences liées à l'énergie donne du fil à retordre aux acteurs de ce domaine. Les consommateurs sont parfois lésés et perdus dans les allers et retours des pouvoirs décisionnaires. Que ce soit au niveau des primes, des incitants, des taxes, des systèmes de calculs, il reste énormément de problèmes ou de pièces manquantes pour réellement intégrer ces nouvelles solutions au réseau existants. Et cette frustration est intensifiée quand on voit que la technologie est généralement prête plusieurs années avant l'arrivée du cadre légal.

Cependant, avec un certain recul, je suis maintenant satisfait du résultat auquel je suis parvenu. D'une part, satisfait d'observer que chaque technologie du système possède ses avantages, et apporte son utilité à la réalisation des objectifs d'intégration de notre système énergétique. D'autre part, satisfait de se rendre compte que l'interconnexion de ces technologies est un réel atout pour ce système. Les combinaisons possibles sont nombreuses et permettent de débloquent des avantages qui ne seraient pas présents sans cette connectivité. Et enfin, je suis heureux et optimiste de voir que nous sommes sur la bonne voie en matière d'utilisation plus rationnelle de l'énergie mais aussi de manière plus respectueuse par rapport à notre environnement écologique. Il reste énormément de travail à accomplir mais je suis soulagé de voir que nous avons les outils pour rencontrer nos objectifs.

Perspectives futures du projet

Le partage d'énergie

Les perspectives pour le futur des réseaux électriques sont nombreuses et prometteuses. Parmi celles-ci, une a réussi à retenir mon attention tout au long du travail. C'est le partage d'énergie. Notion assez nouvelle qui est déjà connue en Flandre sous le terme « energie delen », elle représente ce que à quoi nous pourrions aspirer pour le futur. Mais la Wallonie n'est pas sans restes, le gestionnaire de réseau ORES a d'ailleurs sorti une présentation sur le partage d'énergie et ses communautés d'énergie.

Mais pourquoi le partage d'énergie ? Après la lecture de cette présentation, il en ressort plusieurs avantages (ORES, 2022) :

- Augmente la flexibilité sur le réseau
- Participe à la décarbonisation (participation)
- Respecte et correspond à la directive du parlement et du conseil Européen
- Avantages économiques et sociaux
- Etc. ...

Mais que cela signifie réellement ? « Le partage d'énergie c'est la répartition entre plusieurs membres de, tout ou partie de l'énergie produite, injectée sur le réseau et consommée au cours de la même période de temps (quart horaire) » (ORES, 2022). Trois acteurs sont donc mêlés, les producteurs (=prosumers), les gestionnaires et les utilisateurs. ORES (dans ce cas-ci), gère la répartition de la production (locale ou globale), parmi les différents utilisateurs.

On peut y faire ressortir 3 objectifs principaux (ORES, 2022):

- Au niveau environnemental

Une meilleure intégration de la production d'électricité renouvelable via l'augmentation de l'autoconsommation et le partage d'énergie à une échelle locale.

- Au niveau économique

L'impact devrait être favorable que ce soit sur la facture des participants ou en termes de retombées positives sur l'économie et les emplois locaux

- Au niveau social

Ces nouvelles possibilités de partage sont ouvertes à tous les citoyens, y compris les locataires (via par exemple placement de PV sur le toit de l'immeuble) ainsi que les ménages précarisés qui n'ont pas la possibilité d'investir dans des moyens de production décentralisés.

Pour illustrer ces propos, voici un schéma expliquant l'autoconsommation collective et donc, le partage d'énergie. Dans ce cas précis, ce sera à l'intérieur d'un même bâtiment.

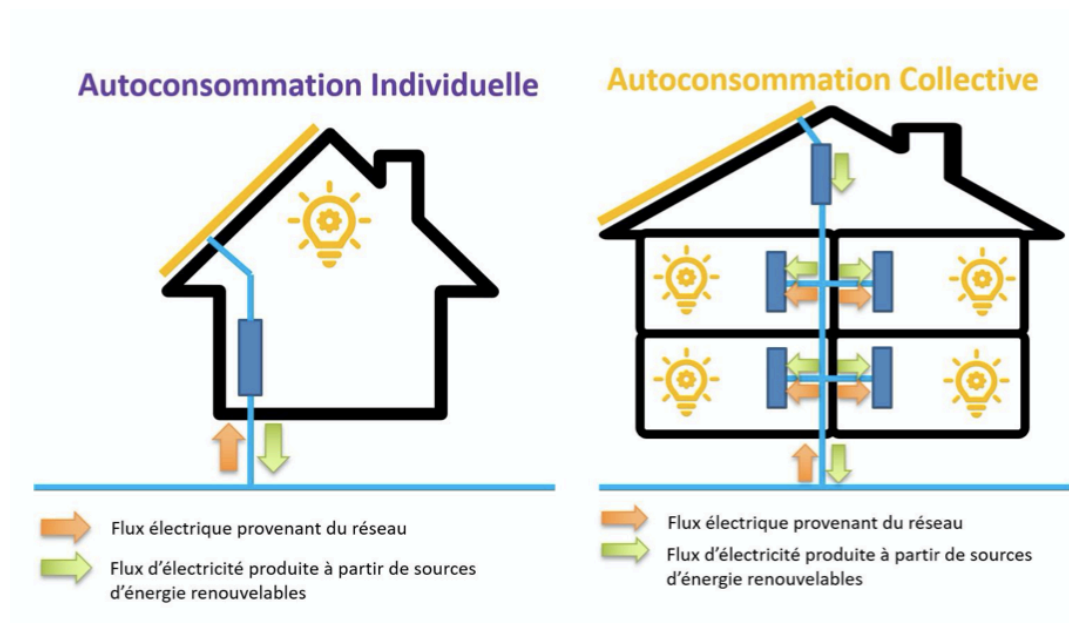


Figure 17 (ORES, 2022)

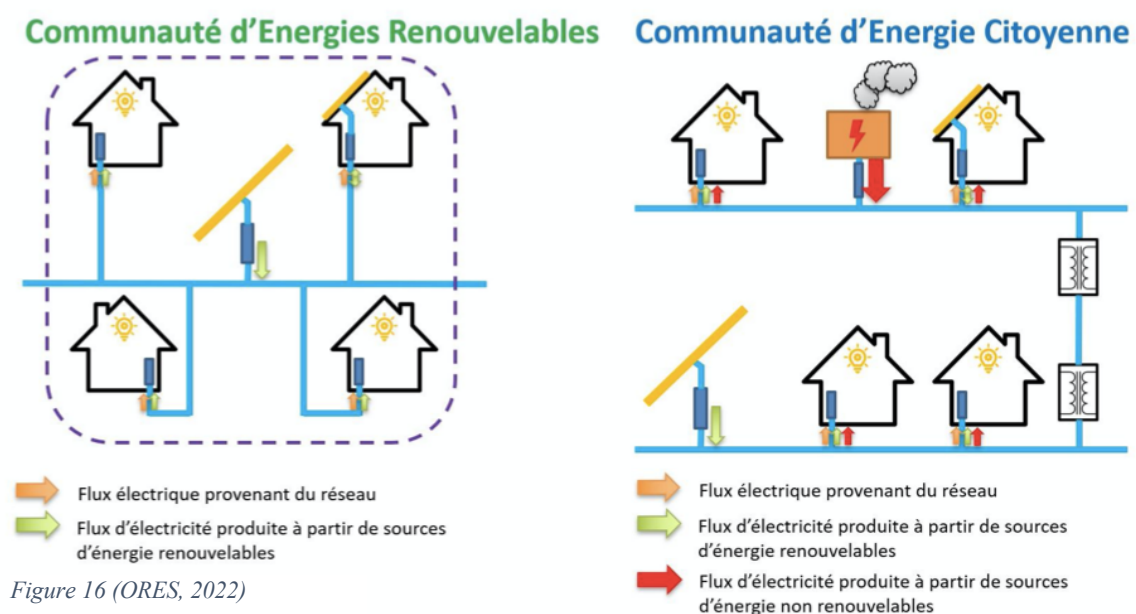


Figure 16 (ORES, 2022)

On peut maintenant voir ci-dessus le même type d'explication, mais cette fois-ci, pour une communauté, reprenant plusieurs bâtiments. Sur la gauche, une communauté renouvelable avec une production centralisée et décentralisée, mais toutes deux, communes à la communauté.

Sur la droite, même principe mais avec un apport supplémentaire d'électricité provenant des énergies fossiles.

Le but serait alors d'étendre ce principe de partage et de communauté aux autres technologies qui ont été reprises dans ce mémoire. Imaginez un instant ces communautés avec du stockage, de la cogénération, des pompes à chaleur et des bornes de recharges. Le tout, coordonné par plusieurs systèmes de gestions, communiquant ensemble. Et cela, que ce

soit centralisé ou décentralisé (chez soi), mais pour sûr, commun à tous. Je suis donc convaincu de l'énorme potentiel que représentent ces solutions de partage d'énergie.

L'étendue au B2I

Si les possibilités avec le B2C et le B2B sont déjà énormes, celles avec le B2I (Business To Industry) sont encore toutes autres. Voici donc alors une autre grande perspective encore plein de potentiel.

Lors de mes différentes recherches, j'ai pu effectivement explorer de nombreux projets pilotes, actuellement en phase de test. Parmi ceux-ci, un projet a retenu mon attention : il s'agit du projet LIFE, qui prend racine à Amsterdam, et plus précisément, dans le quartier sud-ouest.

Ce projet rassemble de nombreux concepts techniques et a pour but la création d'une « Local Inclusive Future Energy (LIFE) City platform ». Le principe est le suivant :

Une planification intelligente de la demande et de l'offre d'énergie sera testée via une plateforme d'échange d'énergie intelligente. Le résultat attendu est alors une innovation, à la fois, respectueuse du réseau électrique, mais aussi, de la communauté, avec comme objectif commun, une contribution à la transition énergétique. (AMS, 2021)

Comme avec les différents projets résidentiels que nous avons explorés tout au long de ce travail, la cause de ce test et cette évolution attendue est la même :

D'un côté, il y a la prévision de construction d'un grand nombre de nouveaux logements dans un avenir proche. Cela entraînera inévitablement une augmentation de la demande d'énergie.

De l'autre, avec l'essor des voitures électriques et le chauffage alternatif et plus durable des bureaux et des maisons, le réseau électrique aura besoin de plus de capacité. Avec cette double demande croissante, le réseau énergétique a besoin d'investissements pour augmenter la capacité du réseau. Il convient alors d'explorer des solutions intelligentes dans le domaine de la gestion de l'énergie.

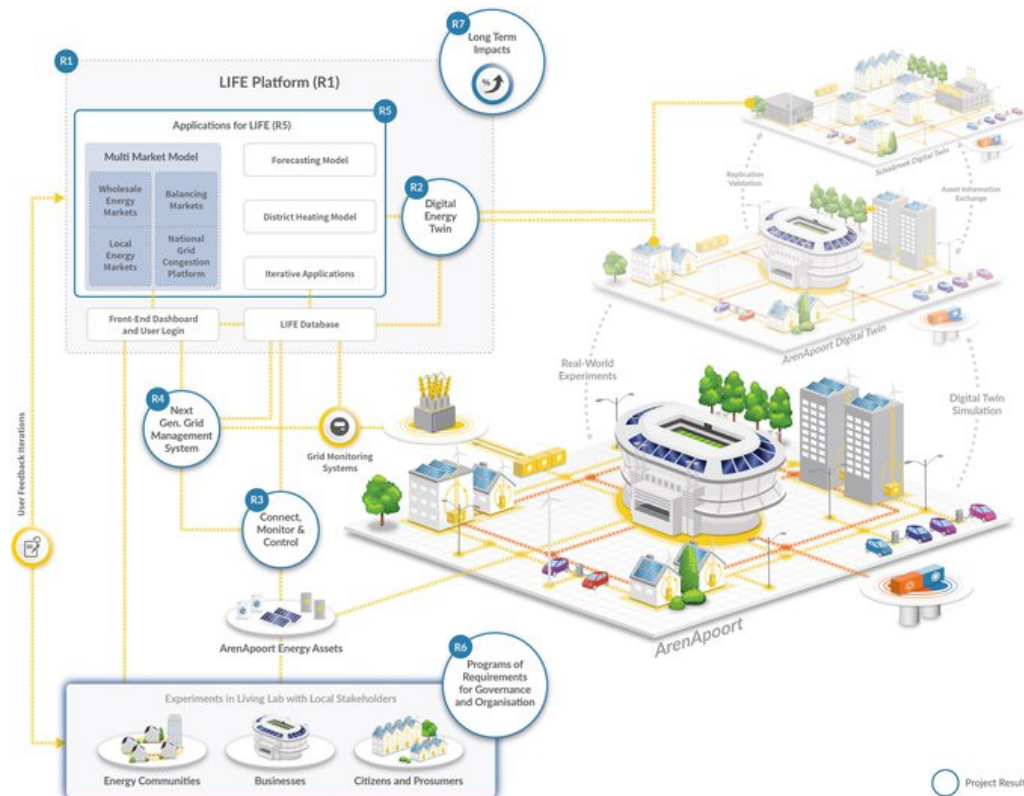


Figure 18(AMS, 2021)

Le fonctionnement de la plateforme est assez simple : « The LIFE platform offers users the opportunity to make choices about energy exchange or storage based on economic motivation, sustainability or to support the energy grid » (AMS, 2021). Il s'agit donc simplement de combiner échange et stockage, pour une utilisation optimale du réseau et des sources d'énergie. C'est donc toute une zone qui est interconnectée et qui s'échange l'énergie qui va être créée. C'est en fait le même principe que de l'autoconsommation résidentielle, avec un réseau en étoile, mais appliqué, ici, à plus grande échelle, dans un quartier complet.

Je suis personnellement convaincu que ce genre de projet représente le futur pour nos villes et participera grandement à la transition vers un système énergétique plus intégré et plus circulaire.

De ces 2 perspectives, j'en tire une conclusion personnelle que ce mémoire projet n'est que le début d'un challenge professionnel qui me tient à cœur et qui allie ma conscience écologique à un projet économique réfléchi, censé, justifié et positif à bien des égards.

Ces perspectives représentent la suite logique de ce travail de fin d'études mais aussi l'avenir énergétique qui doit encore se construire. Muni de cette expérience, je suis prêt à apporter ma contribution à la construction de notre futur commun.

Conclusion générale

Nous voilà arrivés au terme de ce cheminement. C'est le moment de faire le bilan par rapport à la rencontre de l'objectif de départ.

Face aux enjeux écologiques et économiques actuels, il était indispensable de réagir et de trouver une solution innovante qui permettrait de résoudre ou d'alléger les différents problèmes, actuels ou futurs en matière d'énergie.

Premièrement, d'un point de vue écologique, il n'est plus viable de continuer cette **consommation déraisonnée** que nous connaissons aujourd'hui. Si l'on veut rejoindre l'Europe dans son combat pour la neutralité carbone, chaque pays doit contribuer à l'objectif commun. **Nous avons les capacités techniques et économiques pour y remédier. Reste alors de disposer de la volonté nécessaire à l'application de ces nouvelles mesures.**

Deuxièmement, d'un point de vue économique, l'impossibilité pour certains de régler leurs factures d'énergie va devenir de plus en plus récurrente. Avec les récents événements, il est maintenant clair que nous **devons diminuer notre dépendance aux énergies fossiles**. Il nous faut également consommer mieux, de manière plus réfléchie et plus optimisée.

Troisièmement, il ne sera pas possible, techniquement, d'appréhender le futur sans un changement radical de notre système énergétique. Et le cœur de ce système est représenté, notamment, par notre **réseau électrique**. **Il faut le modifier, de manière globale, mais également de manière locale. Donc individuellement mais aussi collectivement.**

Si nous n'anticipons pas les problèmes, nous devons alors faire face à des conséquences beaucoup plus désastreuses.

Ces trois points de vue montrent l'urgence pour nous d'agir et de trouver une solution. L'Europe, aidée de ses experts, a alors choisi un cap. Un cap avec une direction pointée vers l'intégration de notre système énergétique via une circularité et une électrification accrue. Et pratiquement, **cette électrification accrue ne peut en aucun cas se résoudre en un accroissement de la demande mais bien en terme de rationalisation de la demande. L'autoconsommation est alors une des solutions les plus appropriées.**

Cette autoconsommation répond effectivement au **double impératif d'une production et d'une consommation plus raisonnée. Mais pour la mettre en application, il faut disposer des infrastructures nécessaires**. Et c'est ici qu'intervient mon apport : la réalisation d'une « Étude d'un système d'interconnexion d'outils énergétiques visant à optimiser économiquement et techniquement l'autoconsommation globale d'électricité d'un ménage ou d'une entreprise ».

Ce qui ressort de notre étude est encourageant. On a pu observer que **chaque technologie apportait sa pierre à l'édifice et que leur interconnexion était un réel atout pour le système global**. Encourageant également quand on voit que la technologie est déjà avancée et, même si des améliorations doivent encore être attendues, elle permet un profond changement du

mode de fonctionnement de notre réseau électrique domestique ou professionnel. De plus, malgré que les coûts d'investissements soient aujourd'hui trop élevés, on aperçoit déjà une diminution progressive et durable des prix de ces nouvelles technologies.

Par contre, il a été assez difficile d'accepter le fait que la **faiblesse du cadre légal** et la régionalisation des compétences sont de gros freins pour la mise en application de ces solutions. Le **manque d'harmonisation** est un problème connu pour notre pays et, aujourd'hui encore, montre à quel point, la régionalisation de ce domaine est un obstacle pour les futures avancées.

Il reste également une part de frustration car ce domaine de l'énergie est tellement captivant que j'aurais aimé explorer des solutions encore plus avancées mais à ce stade moins abouties. Les concepts comme le partage d'énergie et l'application de notre solution, à grande échelle, en incluant les industries, sont des notions qui mériteraient un mémoire et un projet à eux tous seuls.

J'aurais également aimé pouvoir avoir plus de recul sur les avantages réels de ces technologies. En effet, ici, j'ai pu prouver que, de manière théorique, **ce système fonctionne et débloque de nombreux atouts et apporte des économies d'énergie ainsi que financières**. Mais, à part quelques exemples, il n'existe pas encore assez de données, sur un laps de temps suffisant, pour pouvoir conclure sur ces résultats pratiques. Mais je suis certain que d'ici un an, nous serons capables de pallier à cela.

Quoi qu'il en soit, je suis satisfait du résultat obtenu et optimiste par rapport à la suite des avancées dans ce domaine. Je suis convaincu que **ces systèmes vont se développer, de manière rapide et massive**, et que, lorsque cette tendance s'observera aussi dans les grandes entreprises et les industries, les bénéfices seront énormes, pour eux, et pour la communauté.

Malgré qu'il **n'existe donc pas de solution parfaite et unique**, il est agréable de voir que, pour chaque cas pratique, **il existe une déclinaison de la solution originelle, adaptée et adaptable au cas précis**.

Une fois que ces solutions seront implémentées, la gestion du réseau sera alors soulagée et la part totale de l'utilisation des énergies renouvelables, au sein de notre mix énergétique, pourra alors croître. Ainsi, notre contribution à la réalisation de l'objectif de neutralité carbone sera, en partie, opérée et j'espère ainsi que nous arriverons ensemble et plus facilement à la rencontre de l'objectif commun européen.

Quoi qu'il en soit, je vous invite à garder ce concept d'autoconsommation en tête car je suis certain que ce ne sera pas la dernière fois que vous en entendrez parler ...

Le futur nous appartient, construisons le ensemble.

Bibliographie

- © SMA Solar Technology AG. (2021, Décembre 26). Récupéré sur <https://www.sma.de/fr/produits/surveillance-contrôle/sunny-home-manager-20.html>
- © TotalEnergies. (2021, Décembre 26). Récupéré sur <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/quels-sont-les-differents-types-de-chaudieres-sur-le-marche>
- AMS. (2021, Avril). *Urban Energy*. Récupéré sur Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions: <https://www.ams-institute.org/urban-challenges/urban-energy/local-inclusive-future-energy-life-city-platform/>
- Athermic. (2021, 01 25). *Pompes à chaleur*. Récupéré sur Athermic: <http://www.athermicsarl.com/pompes-a-chaleur/>
- Azzouz, K. (2022, Février 12). *Panneaux photovoltaïques : de plus en plus de Belges veulent du soleil dans leurs futures factures*. Récupéré sur Rtbef.be: <https://www.rtbef.be/article/panneaux-photovoltaïques-de-plus-en-plus-de-belges-veulent-du-soleil-dans-leurs-futures-factures-10933775>
- Beguin, M. (2021, 07 19). *Panneaux solaires : comment fonctionne une installation photovoltaïque ?* Récupéré sur wikipower: <https://wikipower.be/blog/panneaux-photovoltaïques-fonctionnement-d-une-installation-photovoltaïque/>
- Boucher, J. (2021). *Power in a transition mode*.
- Bruhl, G., Grenèche, D., Mazière, M., & Michaille, P. (2021). *Transition énergétique : la France en échec. Analyse et perspectives*. Les Ulis: EDP Sciences.
- Callmepower. (2022, Mars 17). *Consommation moyenne d'électricité en Belgique en 2022*. Récupéré sur Callmepower.be: <https://callmepower.be/fr/energie/guides/consommation/moyenne-electricite>
- Commission EU. (2020). *Alimenter en énergie une économie neutre pour le climat: la Commission présente des plans pour le système énergétique de l'avenir et pour l'hydrogène propre*. Bruxelles.
- Commission Européenne. (14.10.2020). *Évaluation de la version définitive du plan national en matière d'énergie et de climat de la Belgique*. Bruxelles.
- D., P. (2020, 08 12). *Quel type de panneaux solaires choisir ?* Récupéré sur Engie: [https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/les-differents-types-de-panneaux-solaires/#:~:text=Il%20existe%20%20grandes%20familles,cristaux\)%20mais%20pr%C3%A9sentent%20quelques%20diff%C3%A9rences%E2%80%A6](https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/les-differents-types-de-panneaux-solaires/#:~:text=Il%20existe%20%20grandes%20familles,cristaux)%20mais%20pr%C3%A9sentent%20quelques%20diff%C3%A9rences%E2%80%A6)

- D., P. (2021, Janvier 1). *Comparatif de 4 batteries domestiques*. Récupéré sur Engie: <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/batterie-domestique-comparatif/#>
- Daikin. (2021, Décembre 26). Récupéré sur Copyright © Daikin: https://www.daikin.be/fr_be/pompesachaleur.html#les-differents-types-de-pompeachaleur
- Daikin. (2021, Janvier 17). Récupéré sur © Daikin : https://www.daikin.be/fr_be/blog/compteur-qui-tourne-a-lenvers.html
- de Boer, R., Andrew , M., Zühlsdorf, B., Arpagaus, C., Bantle, M., Wilk, V., . . . Benson, J. (2020). *Strengthening Industrial Heat Pump Innovation Decarbonizing Industrial Heat*. Vienna: AIT CENTER FOR ENERGY.
- Debeur, O. (2022, Février 25). *Compteur mono ou bi-horaire : lequel vous convient ?* Récupéré sur Comparateur-Energie.be: <https://www.comparateur-energie.be/blog/choisir-mono-bi-horaire/>
- DEFI ELEC ©. (2021, Décembre 12). Récupéré sur <https://defielec.be/>
- Delgado, O. (2022). *energyking*. Récupéré sur Capacity tariff, what is it and what impact does it have on your energy bill: <https://energyking.be/capaciteitstarief-wat-is-het-en-welke-impact-heeft-het-op-u-energiefactuur/#:~:text=Momenteel%20zijn%20de%20netwerkkosten%20goed,moment%20waarop%20je%20elektriciteit%20verbruikt.>
- Digital Wallonia. (2021, Juin 11). *Séquestration de carbone dans les sols : opportunités pour le secteur numérique*. Récupéré sur digitalwallonia.be: <https://www.digitalwallonia.be/fr/publications/sequestration-carbone-opportunites-numeriques/>
- Eco Habitat Belge. (2022). *Belgique : nouvelle réglementation du photovoltaïque en 2022*. Récupéré sur Eco Habitat Belge: <https://www.ecohabitatbelge.be/belgique-nouvelle-reglementation-du-photovoltaïque-en-2022/#:~:text=La%20Flandre,-Ici%2C%20les%20prosumers&text=Cela%20a%20chang%C3%A9%20depuis%20l'appel%C3%A9%20le%20tarif%20d'injection.>
- Energide. (2022, Avril 15). *Comment fonctionne une pompe à chaleur ?* Récupéré sur Energide.be: <https://www.energide.be/fr/questions-reponses/comment-fonctionne-une-pompe-a-chaleur/695/#:~:text=Le%20principe%20de%20la%20pompe,chauffage%20auquel%20elle%20est%20reli%C3%A9e.>
- Energide. (2022, Mars 21). *Pourquoi le réseau électrique doit-il rester en équilibre ?* Récupéré sur Energide.be: <https://www.energide.be/fr/questions-reponses/pourquoi-le-reseau-electrique-doit-il-rester-en-equilibre/2136/>
- Engie. (2022, Juillet 28). Energy Market News. *Our Weekly Newsletter*.

- ESTG. (2020, 12 29). *Quels sont les différents types d'onduleurs*. Récupéré sur ESTG: <https://www.estg.eu/fr-fr/nieuws/quels-sont-les-differents-types-donduleurs/>
- Eu commision . (8.7.2020). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration* . Brussels.
- Fournisseurs electricite.com . (2021, Mars 16). *Le rôle des gestionnaires de réseau (GRD) d'électricité et de gaz*. Récupéré sur Fournisseurs electricite.com by Selectra: <https://www.fournisseurs-electricite.com/le-role-du-gestionnaire-de-reseau>
- Futura Science. (2021, 09 20). *Quels sont les principaux puits de carbone ? Où sont-ils et comment fonctionnent-ils ? Découvrez-le sans plus attendre*. Récupéré sur futura-sciences.com: <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/rechauffement-climatique-puits-carbone-sont-ils-fonctionnent-ils-1212/>
- Giovannini, A. (2021, Novembre). Présentation, MCI. *ENERGY STORAGE*. Innsbruck, Autriche.
- Green. (2021, Mai 19). *LES PRIMES EN FLANDRE POUR LE DÉVELOPPEMENT DES BATTERIES RÉSIDENTIELLES*. Récupéré sur Green.be: <https://www.green.be/actualit/2021/5/19/les-primen-flandre-et-le-dveloppement-des-batteries-rsidentielles#:~:text=Les%20montants%20de%20la%20prime&text=Par%20exemple%2C%20si%20vous%20souhaitez,et%20donc%20de%202.000%E2%82%AC>.
- Jancovici, J. M. (2007, Aout 1). *Les « puits de carbone » ne vont-ils pas absorber le surplus de CO2 ?* Récupéré sur jancovici.com: <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/les-puits-de-carbone-ne-vont-ils-pas-absorber-le-surplus-de-co2/>
- Laura. (2021, Novembre 3). Récupéré sur In Sun We Trust: <https://www.insunwetrust.solar/blog/le-solaire-et-vous/panneau-solaire-autoconsommation/>
- Lesage, O., & Vanparys, R. (2022). Batterie pour panneaux solaires Pas encore rentable. *Test Achats*, pp. 20-23.
- LEWIZ. (2022, Juin).
- N. Degroote, P. V. (2021-2022). *GESTION DE PROJET DE L'INGENIORAT COMMERCIAL VADE MECUM*. Bruxelles : ICHEC.
- Nguyen, U. (2022, Janvier 21). *Compareur-Energie.be*. Récupéré sur <https://www.compareur-energie.be/blog/tarif-capacitaire-en-flandre/>
- ORES. (2022). *Partage d'énergie*. ORES.

- Orygeen. (2021, Décembre 21). *QU'EST-CE QUE L'AUTOCONSOMMATION SUR SITE ?*
Récupéré sur Orygeen Energy Performance and Sustainability :
[https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/autoconsommation/#:~:text=L'autoconsommation%20est%20le%20fait,sa%20propre%20production%20\(autoproduction\).](https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/autoconsommation/#:~:text=L'autoconsommation%20est%20le%20fait,sa%20propre%20production%20(autoproduction).)
- Powerdale ©. (2021, Décembre 20). Récupéré sur
<https://www.powerdale.com/fr/produit/advance>
- Project Management Institute Inc. (2004). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Pennsylvania: Newtown Square.
- Proxiserve. (2021, Décembre 26). Récupéré sur
<https://www.proxiserve.fr/monchauffagisteprive/conseils-astuces/chaudiere-gaz/choisir-sa-chaudiere/principaux-types-de-chaudieres/>
- Quelle énergie. (2021, 09 17). *5 conseils pour bien choisir sa pompe à chaleur*. Récupéré sur
<https://www.quelleenergie.fr/magazine/5-conseils-choisir-pompe-chaleur>
- SMA Benelux. (2022). Webinar SMA Energy System Home Solutions pour la gestion d'énergie. Bruxelles, Belgique.
- Sury, C. (2021, Novembre 01). *Photovoltaïque: un rempart contre la hausse des prix de l'énergie*. Récupéré sur L'Echo:
<https://www.lecho.be/monargent/analyse/immobilier/photovoltaique-un-rempart-contre-la-hausse-des-prix-de-l-energie/10343048.html>
- Wallonie. (2021, Mars 5). *Photovoltaïque - S'informer sur le tarif prosumer*. Récupéré sur Wallonie: <https://www.wallonie.be/fr/demarches/photovoltaique-sinformer-sur-le-tarif-prosumer>
- Wikipédia. (2021, Novembre 8). Récupéré sur Wikipedia®:
https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe_%C3%A0_chaleur