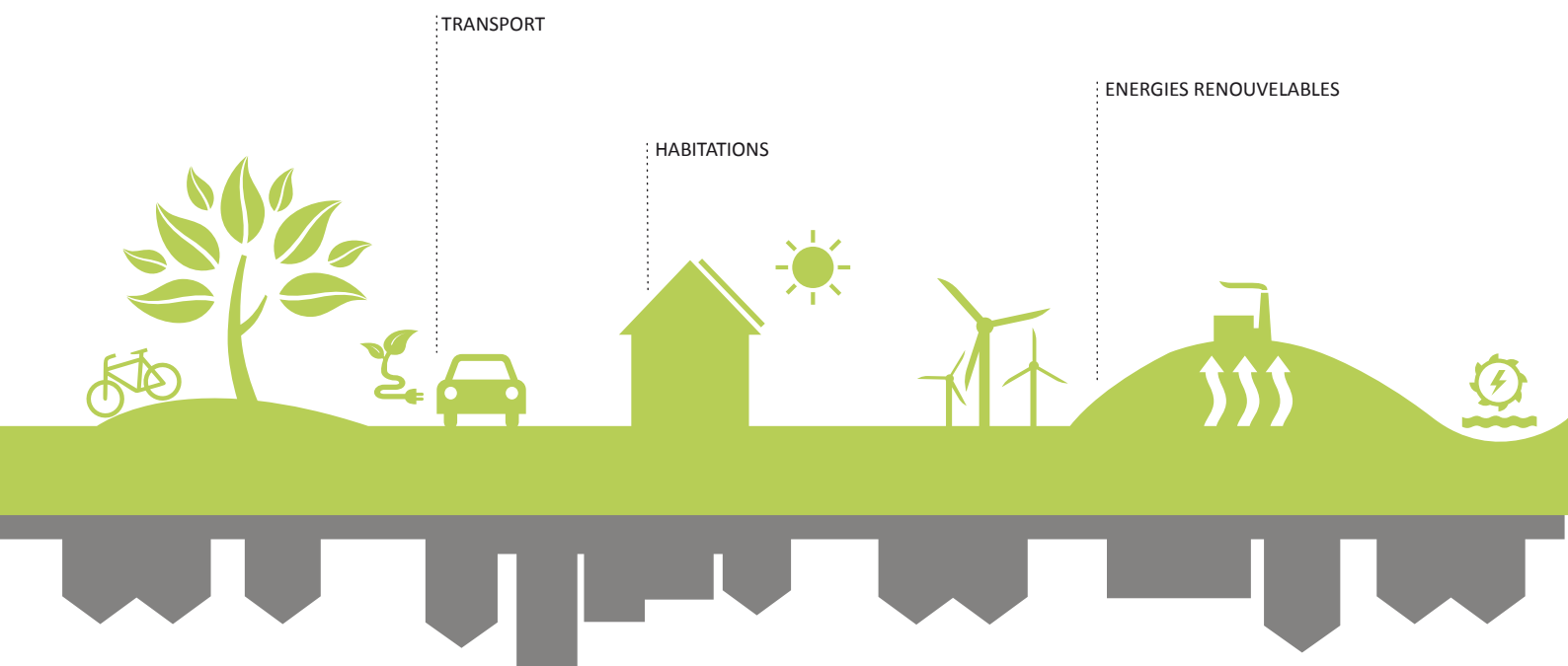


RENOVATION ENERGETIQUE DES ILOTS

*Stratégie d'intégration des énergies renouvelables dans
le but de tendre vers l'objectif zéro-énergie*



RENOVATION ENERGETIQUE DES ILOTS

*Stratégie d'intégration des énergies renouvelables
dans le but de tendre vers l'objectif zéro-énergie*

Université de Liège - Faculté des sciences Appliquées

Année académique..... 2012 - 2013

Promotrice.....REITER Sigrid

Co-promotrice.....MARIQUE Anne-Françoise

Membres du jury.....HAUGLUSTAINE Jean-Marie
TELLER Jacques

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade
de Master en Ingénieur Civil Architecte par **Marine PENDERS**

J'aimerais remercier toutes les personnes sans qui ce travail n'aurait pu voir le jour.

A Mesdames S. Reiter et A.-F. Marique, promotrice et co-promotrice. Leurs conseils et leur savoir-faire m'ont éclairée tout au long de mes recherches. Je leur suis particulièrement reconnaissante de leur intérêt porté à la réalisation de ce travail, de leur disponibilité indéfectible et de leur confiance.

A Messieurs J.-M. Hauglustaine et J. Teller, membres de mon jury, pour le temps qu'ils ont eu l'amabilité de m'accorder.

A mes parents, ma famille et mes proches, pour leur soutien, leurs encouragements, et le temps qu'ils ont accordé à la relecture de ce travail.

« La nécessité est la mère de l'invention »
Platon - *De Republica*

Chapitre 1 : Introduction

1. Introduction	4
2. Objectifs et méthodologie.....	6
3. Hypothèses générales	7
3.1 L'objectif zéro-énergie.....	7
3.2 Ilot résidentiel	7
3.3 Consommation énergétique de l'îlot.....	7
3.4 Performance énergétique de l'îlot.....	8
4. Présentation des deux cas d'étude	8
4.1. Ilot urbain : Vivegnis	9
4.2. Ilot périurbain: Rotheux	10
4.3. Tableau comparatif	11

Chapitre 2 : Analyse

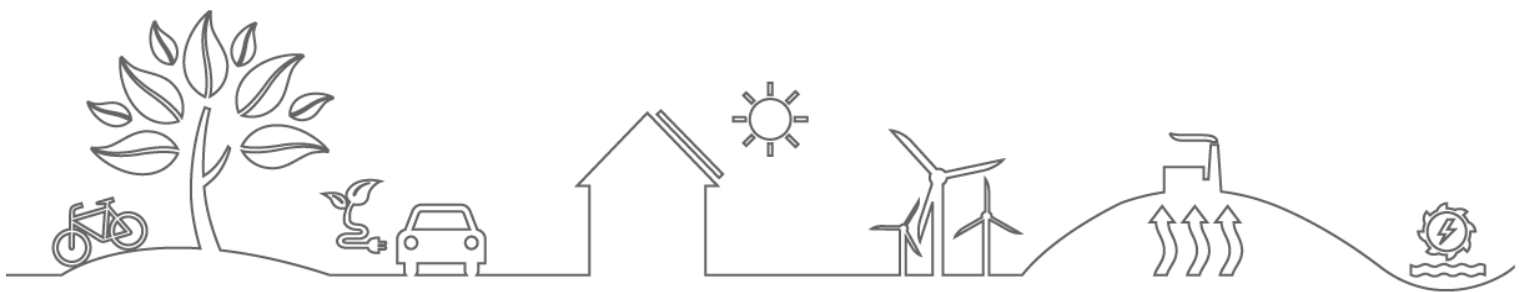
1. Les énergies renouvelables	13
1.1 L'énergie solaire	13
1.2 L'énergie éolienne.....	14
1.3 L'énergie géothermique	15
1.4 L'énergie hydrothermique et aérothermique	16
1.5 La biomasse	16
1.6 L'énergie hydraulique.....	18
1.7 Les déchets	19
1.8 Le cas de l'hydrogène	19
1.9 Autres	20
1.10 Tableau récapitulatif.....	20
2. Application dans le secteur du bâtiment.....	21
2.1 Les réseaux	22
2.2 Production d'électricité	24
2.2.1 La petite éolienne	24
2.2.2 Les panneaux photovoltaïques	29
2.3 Production de chaleur.....	32
2.3.1 Les capteurs solaires	32
2.3.2 Les pompes à chaleur.....	34
2.3.4 La géothermie basse température	37
2.3.4 Le bois énergie.....	41
2.4 Production simultanée d'électricité et de chaleur	45
3. Application dans le secteur du transport.....	48
3.1 Introduction	48
3.2 Les biocarburants.....	49
3.3 Les véhicules électriques	50
4. Conclusion	52

Chapitre 3 : Application

1. Pôle transport	57
1.1 Méthodologie	57
1.2 Hypothèses	59
1.3 Résultats.....	59

1.3.1 Situation actuelle	59
1.3.2 Influence de l'utilisation du véhicule électrique.....	62
1.3.3 Intégration du tramway.....	66
1.3.4 Influence d'un report modal de la voiture vers le bus.....	68
1.3.5 Influence du covoiturage sur les déplacements domicile-école.....	69
1.4 Conclusions.....	71
2. Pôle bâtiments	72
2.1 Méthodologie	72
2.2 Hypothèses	74
3.3 Résultats.....	75
3.3.1 Consommation d'énergie pour le chauffage.....	75
3.3.2 Consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire	82
3.3.3 Consommations électriques	84
3.4 Conclusions.....	89
3. Pôle énergies renouvelables.....	91
3.1 Pertinence du réseau de chaleur.....	91
3.2 Pertinence de la cogénération	94
3.3 Potentiel photovoltaïque	98
3.3.1 Méthodologie.....	98
3.3.2 Hypothèses	100
3.3.3 Résultats	101
3.3.4 Conclusions	103
3.4 Potentiel capteurs solaires	105
3.4.1 Méthodologie.....	105
3.4.2 Hypothèses	105
3.4.3 Résultats	105
3.4.4 Conclusions	106
3.5 Potentiel éolien (périurbain).....	108
3.5.1 Méthodologie.....	108
3.5.2 Hypothèses	110
3.5.3 Résultats	110
3.5.4 Conclusions	113
3.6 Conclusions.....	114
Chapitre 4 : Bilans & Conclusions	
1. Bilans de consommation en énergie primaire et résultats	117
1.1 Ilot urbain: Vivegnis.....	118
1.2 Ilot périurbain: Rotheux	128
2. Conclusions	139
3. Perspectives	142
Table des Figures.....	144
Table des Tableaux.....	145
Annexes	
Cadre éolien de la Région wallonne (janvier 2013)	147
Typologie établie pour les deux îlots étudiés	148
Consommation électrique liée aux auxiliaires.....	150
Consommation électrique liée à la ventilation.....	152
Fiches techniques des éoliennes étudiées.....	153
Bibliographie	154

Chapitre 1 : Introduction



1. Introduction

“20-20-20” est le triple objectif énergétique que l’Europe s’est fixé pour 2020. Une réduction de 20 % de la consommation en énergie primaire par rapport aux projections; une diminution de 20 % des émissions de gaz à effet de serre; et une inclusion de 20 % d’énergies renouvelables dans la consommation globale : tels sont les moyens développés par la Commission européenne pour répondre aux grandes préoccupations énergétiques du 21^{ème} siècle. Le changement climatique, la sécurité d’approvisionnement et la compétitivité sont les grands défis actuels dans le domaine de l’énergie, que seules l’économie d’énergie et une meilleure efficacité énergétique permettent de relever le plus rapidement possible (Commission européenne – Europe 2020).

L’amélioration de l’efficacité énergétique et les économies d’énergie sont à réaliser au niveau de chaque secteur consommateur. Les bâtiments résidentiels et tertiaires, représentant 41 % de l’énergie finale consommée globale, possèdent le plus gros potentiel d’économie. Viennent ensuite les secteurs du transport et de l’industrie, représentant respectivement 31 % et 27 % de la consommation finale globale (Commission européenne – Europe 2020).

L’objectif “Zero Energy Building” (ZEB) est un moyen de répondre au triple objectif lancé par l’UE pour 2020. Bien que de nombreuses définitions existent pour qualifier cet objectif, elles s’accordent toutes pour exprimer qu’un bâtiment zéro-énergie est un bâtiment pour lequel existe un équilibre annuel entre sa consommation énergétique, et la production d’énergie renouvelable sur le site de celui-ci. Les définitions divergent et doivent être affinées sur certains points comme le type d’utilisation de l’énergie inclu dans le bilan, les options d’approvisionnement d’énergie renouvelables acceptées et les limites physiques du site, la connexion au réseau de distribution, les exigences relatives à l’efficacité et l’optimisation énergétique, et la période d’équilibre énergétique (Marszal et al., 2011).

Face à l’ampleur du défi, l’UE renforce ses exigences et modifie la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments publiée en 2010. Elle prévoit notamment que l’ensemble des nouveaux bâtiments résidentiels ultérieurs au 31 décembre 2020 répondent à l’objectif “nearly Zero Energy Building” (nZEB) (anticipation pour les bâtiments publics en 2018). L’article 9 de la refonte définit le “bâtiment à énergie quasi nulle” comme un bâtiment dont « la quantité quasi nulle ou très basse d’énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l’énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l’énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité ». Cette définition purement qualitative donnée par la directive ne définit cependant pas clairement ce qu’est un bâtiment à énergie quasi nulle (ECEEE, 2011).

Atteindre l’objectif ZEB, ou nZEB n’est pas une chose impossible à ce jour. Pour s’en convaincre, il suffit de consulter le recueil des “Zero Energy Building”, à travers le monde, réalisé par l’International Energy Agency (IEA, 2013). Néanmoins, tous ces cas d’études d’objectif zéro-énergie ont le point commun d’être réalisés à l’échelle du bâtiment individuel, à l’exception d’un unique exemple tenant compte d’une échelle supérieure. Il s’agit du quartier “Plus-Energie” de Freiburg (Allemagne), qui dépasse même l’objectif zéro-énergie en produisant plus d’énergie qu’il n’en consomme. Cet objectif est atteint par une conception architecturale réfléchie de l’ensemble des habitations, et la mise en oeuvre de systèmes énergétiques optimisés et renouvelables.

A cette échelle, on observe cependant la multiplication récente de nouveaux quartiers “durables”, “d’écoquartiers”, développés dans la continuité des objectifs du développement durable, mais qui ne possèdent pas d’objectifs énergétiques aussi poussés que celui du quartier “zéro-énergie”. Pourtant, les enjeux sont particulièrement intéressants, à plusieurs niveaux.

L’enjeu principal que nous explorerons dans le cadre de ce travail concerne la consommation et la production d’énergie, avec la globalisation des besoins énergétiques à l’échelle de plusieurs bâtiments: l’échelle de l’îlot. En effet, un îlot “zéro-énergie” n’est pas un ensemble de bâtiments répondant à l’objectif zéro-énergie. Au contraire, cela nécessite de considérer l’îlot comme un tout, ce qui permet de :

- positionner l'exploitation de l'énergie renouvelable à l'endroit le plus propice de l'îlot, optimisant ainsi sa production,
- recourir à des systèmes de production intéressants, mais parfois trop coûteux à l'échelle individuelle,
- recourir à des systèmes performants, mais conçus pour une échelle plus grande que celle du bâtiment,
- optimiser le rendement de l'éventuelle chaufferie,
- centraliser les éventuelles nuisances à l'endroit le plus adéquat,
- centraliser la maintenance et la gestion.

Toutes ces économies d'échelle génèrent donc non seulement une économie financière, mais également une économie et optimisation de l'énergie. De plus, la considération globale de l'îlot (et donc les interactions et les impacts des bâtiments les uns sur les autres) dès sa conception lui assure, déjà, un certain niveau d'efficacité énergétique. Cependant, il ne faut pas négliger le potentiel du bâti existant. En effet, les objectifs à l'horizon de 2020 ne pourraient être atteints sans la rénovation des bâtiments existants. C'est pourquoi ce travail s'inscrit d'abord dans une démarche de rénovation des îlots existants.

Une dernière question mérite notre attention: pourquoi s'arrêter à la consommation énergétique des bâtiments lors d'un bilan zéro-énergie ? Le secteur du transport est également un pôle très consommateur, et le trafic routier destiné aux passagers représente 51 % de celui-ci (Barré & Mérenne-Schoumaker, 2011). La directive européenne de 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables exige qu'en 2020, 10 % de l'énergie consommée par le secteur du transport soit d'origine renouvelable (directive 2009/28/CE). L'avenir ne serait-il donc pas dans la production de l'énergie renouvelable pour répondre à la fois aux besoins du bâtiment et du transport ?

C'est autour de ces trois pôles que s'articule ce travail de fin d'étude : la consommation énergétique liée aux bâtiments à l'échelle d'un îlot d'habitation ; la consommation énergétique liée au transport, engendrée par la localisation de l'îlot ; et l'apport en énergie renouvelable qu'il sera possible de fournir à ceux-ci.

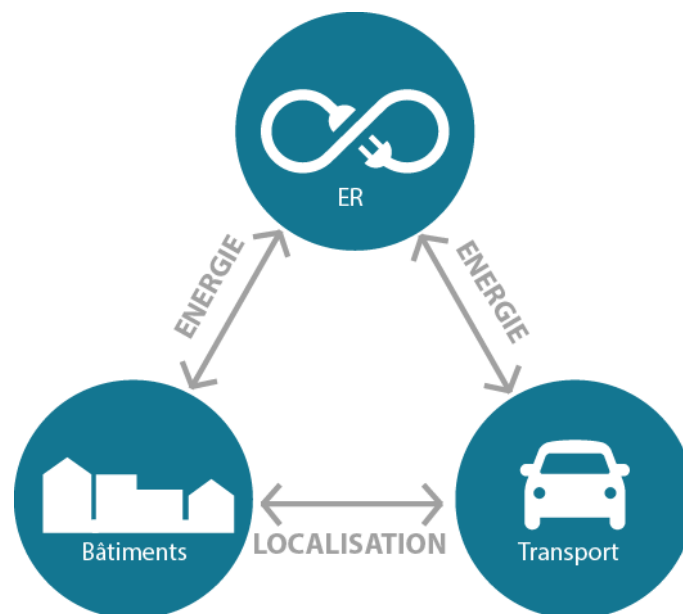


fig. 1: Les 3 pôles constituant la base de l'étude

L'objectif : Viser " l'îlot zéro-énergie " qui, par analogie avec le bâtiment zéro-énergie, voit sa consommation énergétique équilibrée par la production d'énergie renouvelable sur le site de l'îlot.

Quelle stratégie adopter ? C'est la question à laquelle nous allons essayer de répondre.

2. Objectifs et méthodologie

Avant toute chose, précisons que ce travail ne prétend pas atteindre réellement un bilan zéro-énergie à l'issue de l'étude, et surtout que ce n'est pas son but. L'objectif de cette étude est de déceler quelle serait la meilleure stratégie à adopter, dans l'optique d'intégration des énergies renouvelables dans le bilan énergétique global d'un îlot d'habitations, qui tend à l'objectif zéro-énergie.

Les stratégies à adopter différeront évidemment d'un îlot à l'autre, en fonction des différents paramètres qui régissent les consommations énergétiques et les potentiels en énergie renouvelable. Situation géographique, morphologie du bâti, densité, surfaces chauffées, étendue de l'îlot, etc., sont des facteurs très influents dans le bilan énergétique global. La volonté de cette étude est de confronter deux îlots wallons, dont la différence entre ces facteurs serait la plus marquée possible, afin de mettre en évidence les divergences qui existent dans la stratégie à adopter. Le choix se porte donc instinctivement vers un îlot situé en centre-ville, caractérisé par sa forte densité bâtie, jouissant de la proximité d'une multitude de fonctions et d'une grande accessibilité aux transports en commun, et vers un îlot situé en périphérie, qui diffère par sa morphologie du bâti, sa faible densité bâtie, sa monofonctionnalité, et sa plus faible accessibilité aux transports en commun. Sur base de ces critères énoncés, nous avons appelé ce dernier "îlot périurbain", par opposition à l'"îlot urbain".

Ce travail se décline en plusieurs chapitres, comme illustré sur le schéma ci-dessous. L'objectif du chapitre 2 sera de déterminer, parmi les systèmes exploitant les énergies renouvelables, quels sont ceux que l'on pourrait utiliser à l'échelle d'un îlot, en milieu urbain et/ou en milieu périurbain. Dans le chapitre 3, nous calculerons l'ensemble des paramètres nécessaires à l'élaboration d'un bilan de consommation en énergie primaire global. Enfin, nous évaluerons ces bilans au chapitre 4, en discutant des divers paramètres pour en tirer les conclusions et les perspectives qui s'ensuivent.

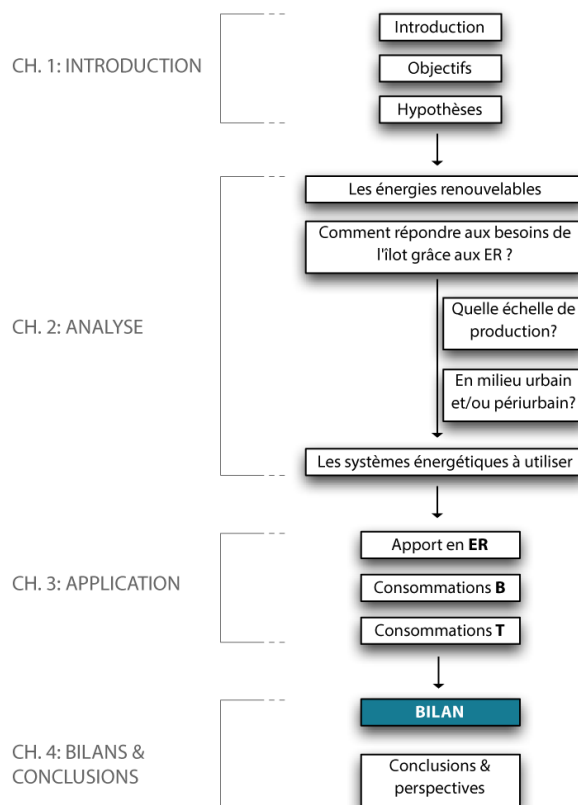


fig. 2: Méthodologie et structure du travail

3. Hypothèses générales

3.1 L'objectif zéro-énergie

Un bâtiment "zéro-énergie" peut être défini de plusieurs façons, en fonction de l'objectif visé (Torcellini et al., 2006):

"Net Zero Site Energy": L'équilibre est réalisé entre la consommation finale d'énergie consommée par le bâtiment, et l'énergie renouvelable qu'il produit sur un an.

"Net Zero Source Energy": L'équilibre tient compte cette fois-ci de la consommation en énergie primaire du bâtiment.

"Net Zero Energy Cost": L'équilibre est réalisé entre le montant dépensé par le propriétaire pour sa consommation énergétique, et ce qu'il reçoit pour l'exportation de l'énergie qu'il produit à l'aide d'énergie renouvelable.

"Net Zero Energy Emission": L'utilisation des énergies renouvelables permet de compenser sa consommation énergétique du point de vue des émissions des gaz à effet de serre.

En fonction de l'objectif choisi, les moyens mis en oeuvre pour l'atteindre seront différents. L'objectif visé dans le cadre de ce travail est l'atteinte d'un équilibre entre la production d'énergie à partir de sources renouvelables, et les consommations énergétiques exprimées en énergie primaire (Net Zero Source Energy), car la préoccupation de la consommation énergétique est généralement celle du concepteur: l'architecte. Nous choisissons d'étudier le bilan en énergie primaire et non en énergie finale, de façon à tenir compte du réel impact de la consommation énergétique sur l'énergie disponible dans la nature¹.

3.2 Ilot résidentiel

On s'intéresse ici à un îlot résidentiel. Comme on le verra plus loin dans le travail, la mixité fonctionnelle possède pourtant plusieurs avantages sur la consommation énergétique. Pour le pôle du transport, elle permet de réduire les consommations énergétiques liées aux déplacements quotidiens en offrant plusieurs services publics à proximité. Pour le pôle du bâtiment, la mixité permet un lissage de la courbe des besoins en énergie, grâce à un effet de foisonnement (avantage seulement si on considère la globalisation des besoins). Ainsi, on aurait tout intérêt à travailler avec un îlot multifonctionnel. Cependant, ce travail se penche sur la comparaison entre un îlot urbain et un îlot périurbain, principalement d'un point de vue de l'intégration des énergies renouvelables. La discussion finale sera plus pertinente si les énergies sont utilisées dans le but de répondre aux mêmes types de besoins dans les deux cas. Voilà pourquoi nous avons choisi de comparer deux îlots résidentiels.

3.3 Consommation énergétique de l'îlot

À l'échelle de l'îlot, nous considérons la consommation énergétique liée au pôle du bâtiment² (chauffage, ECS, auxiliaires, appareils électroménagers, cuisson, éventuelle ventilation) et au pôle du transport (déplacements domicile-travail et domicile-école). Les hypothèses relatives à leur calcul seront développées au chapitre 3. Évaluer la consommation énergétique d'un îlot nécessiterait pourtant de tenir compte également de l'éclairage public, qui est lui aussi un pôle consommateur d'énergie. Cependant, il a été démontré que sa part relative dans le bilan global était très faible (aux alentours de 1%), comparée à l'énergie consommée par les bâtiments et les déplacements (Marique & Reiter, 2012c). C'est pourquoi nous avons décidé de le négliger dans le cadre de ce travail.

¹ L'énergie primaire est l'énergie telle que la nature nous la livre. L'énergie finale est l'énergie reçue par les différents secteurs de consommation. La différence entre les deux provient du processus de cheminement de l'énergie depuis la source, jusqu'à l'énergie disponible pour le consommateur (Mérenne-Schoumaker, 2011).

² Les consommations liées au besoin en refroidissement des bâtiments ne sont pas évaluées ici, car elles peuvent être négligées en raison de notre climat. Le besoin en froid éventuel peut être résolu par une ventilation intensive, des protections solaires et de bonnes habitudes (Marique et al., 2012b)

3.4 Performance énergétique de l'îlot

Certains textes de la littérature apportent une précision supplémentaire à la définition de l'objectif zéro-énergie, en définissant un bâtiment zéro-énergie comme un bâtiment dont les besoins énergétiques sont considérablement réduits, de telle sorte qu'il est possible de répondre aux besoins restants par des technologies exploitant les énergies renouvelables (Torcellini et al., 2006). Cette définition sous-entend donc que le bâtiment doit posséder une certaine performance énergétique avant d'essayer de répondre à ses besoins par des énergies renouvelables. Cela semble logique, étant donné que les potentiels en énergie renouvelable possèdent tous des limites freinant leur exploitation, impliquant qu'ils ne pourront peut-être pas couvrir les besoins les plus importants. De plus, la meilleure économie d'énergie reste celle qui n'est pas utilisée du tout, puisque même les énergies renouvelables seront consommatrices par leur procédé de fabrication, leur transport, etc. D'un point de vue financier, cela est néanmoins moins intéressant, puisqu'atteindre une meilleure performance énergétique du bâtiment est plus coûteux, et que les systèmes exploitant les énergies renouvelables le sont généralement aussi. On comprend ainsi que pour les bâtiments dont la grande performance énergétique permet de réduire considérablement les besoins, utiliser les systèmes les plus coûteux est généralement peu rentable. La question financière n'est cependant pas l'objet de notre étude, et puisque l'on s'intéresse au gain énergétique, nous nous placerons dans l'hypothèse qu'une réduction de la demande énergétique est nécessaire, avant d'essayer d'atteindre l'objectif zéro-énergie.

Dans le cadre de ce travail, la performance énergétique à atteindre concerne l'îlot. Que cela soit pour le pôle transport, ou le pôle bâtiment, nous ferons donc l'hypothèse d'une réduction des besoins énergétiques, avant de réaliser le bilan global en consommation en énergie primaire, compte tenu du potentiel en énergie renouvelable. Il existe une multitude de façons de réduire la consommation énergétique des habitations, du comportement plus responsable, à un niveau d'isolation plus élevé, en passant par le remplacement des systèmes et appareils par des modèles plus performants. Nous avons décidé ici de nous accorder avec les standards énergétiques existants concernant les bâtiments en Wallonie (PEB, basse énergie, très basse énergie et passif), de façon à pouvoir mesurer leur impact dans le bilan global, et ainsi tirer des conclusions quant au standard énergétique le plus judicieux à atteindre lorsque l'on vise l'objectif zéro-énergie. Notons que la faisabilité de l'atteinte de ce type de standard en rénovation est une étude à réaliser au cas par cas, qui n'est pas l'objet de ce travail et sort dès lors du cadre de cette étude. Nous tiendrons compte néanmoins, dans la discussion finale, de la difficulté et du coût qui augmentent considérablement avec le niveau de rénovation.

En ce qui concerne le pôle du transport, nous ferons également l'hypothèse que les consommations sont réduites au préalable. Comme nous n'avons pas de standards auxquels nous référer dans ce cas-ci, nous évaluerons l'impact de plusieurs facteurs (changement des habitudes, report modal, intégration des voitures électriques, etc.) sur la consommation énergétique liée aux déplacements (chapitre 3), et nous choisirons nous-mêmes les différents scénarios à étudier dans le bilan global final.

4. Présentation des deux cas d'étude

Le champ d'application de cette étude est constitué d'un îlot urbain et d'un îlot périurbain. Le premier est localisé à Liège, dans le quartier Saint-Léonard. Il se situe au niveau de la rue Vivegnis, c'est pourquoi dans la suite de ce travail, nous utiliserons l'abréviation "îlot de Vivegnis" (à ne pas confondre avec la localité de Vivegnis, près de Visé). Le second est situé du côté de Neupré, à Rotheux-Rimièrle plus précisément. Nous l'appellerons ici "îlot de Rotheux". Ils sont tous deux situés en Région wallonne, dans la province de Liège. Ils sont brièvement présentés dans les lignes suivantes, puis un tableau récapitulatif de leurs principales caractéristiques permettra d'établir une nette comparaison entre ceux-ci.



fig. 3 : Localisation des deux îlots étudiés dans la Province de Liège (source: maps.google.fr)

4.1. Ilot urbain : Vivegnis

Le quartier Saint-Léonard se situe à quelques centaines de mètres du centre historique de Liège, bordé entre les Coteaux de la Citadelle et le quai de la Meuse. C'est un quartier dynamique, qui fait l'objet actuellement de nombreux projets de revitalisation et de rénovation urbaine. Citons, notamment, le projet SUN (Sustainable Urban Neighbourhoods), actif depuis 2009, visant à instaurer une dynamique de développement durable dans plusieurs quartiers, dont celui de Saint-Léonard. L'étude réalisée dans ce travail est donc dans la lignée des projets récemment lancés.

L'îlot choisi se situe au croisement de la rue Vivegnis et de la rue Maghin, au nord du quartier. Ce choix résulte de l'observation de l'ensemble des îlots urbains, qui sont très souvent multifonctionnels. Cet îlot présente l'avantage, pour cette étude, d'être affecté uniquement à la fonction résidentielle, tout en étant à proximité directe d'une grande variété de services. Le bâti de cet îlot, comme celui de l'ensemble du quartier, date de la rapide période d'urbanisation qui a touché le quartier au 19^{ème} siècle. Il est bien représentatif des îlots urbains par sa forte densité bâtie et le peu d'espace place libre en coeur d'îlot. On observe également l'ajout d'un très grand nombre d'annexes pour subvenir aux besoins actuels des habitants. Il est composé de 57 habitations, majoritairement mitoyennes, bien que l'on trouve quelques maisons quatre façades en coeur d'îlot. Le nombre de sonnettes à l'entrée de certaines habitations témoigne cependant d'une division de celles-ci en plusieurs logements. On compte ainsi 97 ménages au sein de ces 57 maisons.

D'un point de vue de l'accessibilité aux transports en commun, l'îlot est situé à proximité du pôle principal du réseau de transport en commun de Liège, à savoir la place saint-Lambert, et à 4km de la gare. Il est également proche de l'axe fort qui relie Herstal, et qui devra accueillir le futur tram de Liège. L'accessibilité aux transports en commun pour cet îlot résidentiel est donc un atout majeur.



fig. 4: Ilot urbain de Vivegnis, quartier Saint Léonard, Liège (Belgique) (source: maps.google.fr)

4.2. Ilot périurbain: Rotheux

Le village de Rotheux-Rimière appartient à la commune de Neupré, située au sud de Seraing, à 17 km du centre de Liège et 15 km de la gare des Guillemins. L'îlot choisi représente quasiment l'entièreté du village, bien qu'il ne comporte que 55 habitations (et 55 ménages). Ce choix permet donc de confronter deux îlots avec la même échelle, en ce qui concerne le nombre d'habitations. Au niveau de la superficie, on constate par contre que l'îlot de Rotheux est 12,4 fois supérieur à celui de la rue Vivegnis. Il s'agit donc d'un îlot très peu dense, avec une majorité de maisons quatre façades. Un peu moins de la moitié des habitations ont été construites avant 1950, et environ 20 % après 1996 (Marique, 2012a). L'îlot est principalement résidentiel. On n'observe aucun terrain consacré à l'agriculture, mais il y a quelques bâtiments destinés à d'autres fonctions, comme des bâtiments religieux ou des entrepôts, dont la consommation éventuelle sera négligée dans la suite de ce travail. Le village comporte quelques services et commerces de proximité, mais il est dans l'ensemble relativement monofonctionnel. En ce qui concerne l'accessibilité aux transports en commun, elle est présente mais faible. Quatre bus s'y arrêtent, avec la possibilité de rejoindre le centre-ville en un peu plus d'une demi-heure.



fig. 5: Ilot périurbain de Rotheux-Rimière, Neupré (Belgique) (source: maps.google.fr)

4.3. Tableau comparatif

Dans l'ensemble de ce travail, les données relatives aux deux îlots proviennent soit de l'information cartographique du plan PICC, soit des données statistiques fournies par l'INS de 2001, ou encore de l'observation visuelle de ceux-ci.

	Ilot périurbain: ROTHEUX	Ilot urbain: VIVEGNIS
Nombre d'habitations	55	57
Nombre de ménages	55	97
Taille moyenne du ménage	2,74 personnes ³	1,86 personnes ³
Nombre d'habitants	151	180
Superficie de l'îlot	120.236 m ² (12,02 ha)	9.692 m ² (0,97 ha)
Densité bâtie de l'îlot (toute surface bâtie comprise, sauf annexes)	639 m ² bâti au sol/ha (0,5%)	3619 m ² bâti au sol/ha (37%)
Densité d'habitations	4,57 habitations/ha	58,8 habitations/ha
Densité de ménages		
Superficie chauffée moyenne par habitation	213 m ²	136 m ²
Superficie chauffée totale	11.721 m ²	7.727 m ²
Type d'habitations		
4 façades	76,4 %	7 %
3 façades	20 %	17,5 %
2 façades	3,6 %	75,5 %

tab. 1 : Données relatives à l'îlot de Rotheux et l'îlot de Vivegnis

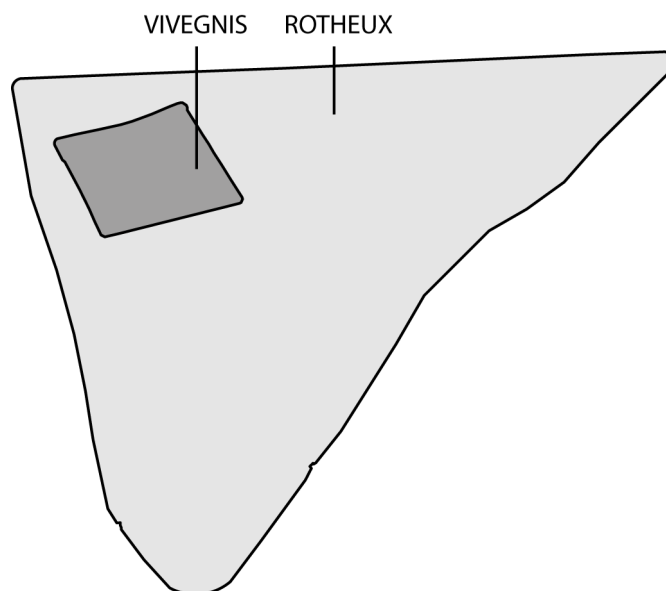
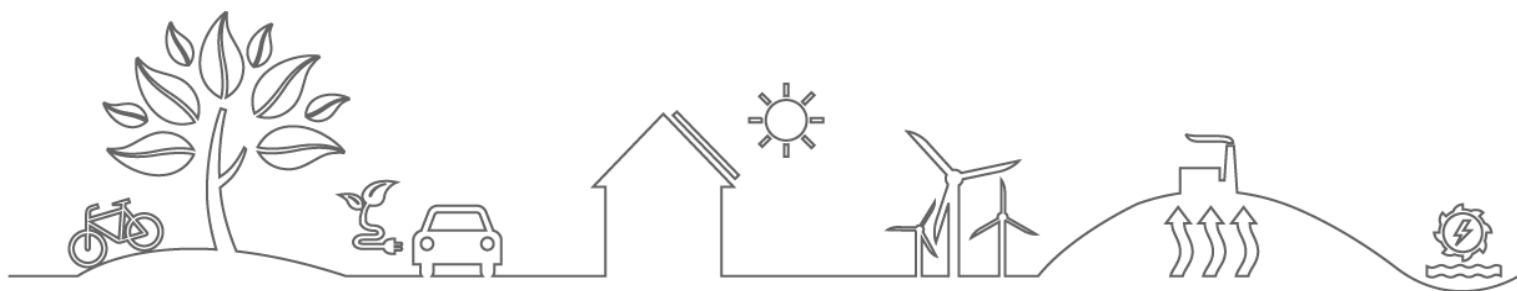


fig. 6: Comparaison de la superficie des deux îlots

³ Source: Données statistiques fournies par l'INS de 2001.

Chapitre 2 : Analyse



1. Les énergies renouvelables

Le terme énergie renouvelable compte un très grand nombre de définitions dans la littérature. La définition retenue ici est celle reprise par l'Agence internationale de l'énergie définissant l'énergie renouvelable comme "l'énergie dérivée de processus naturels en perpétuel renouvellement" (AIE & Eurostat, 2005). Cette signification est choisie, car elle met en évidence directement un des éléments limitateurs de l'exploitation de ce type d'énergie: l'énergie peut être puisée tant que le renouvellement est assuré.

Ce type d'énergie générée par les processus naturels est appelée énergie de flux. Il s'agit de l'énergie du soleil, du vent, de la terre, de la biomasse, de l'eau des fleuves, des lacs, des mers, ... On les distingue ainsi des énergies de stock issues des gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et de métaux fossiles (uranium), dont la consommation est limitée au stock disponible (Mérenne-Schoumaker, 2011). En général, on attend d'une énergie renouvelable que la source soit pérenne, que son exploitation soit respectueuse de l'environnement, et qu'elle permette une production délocalisée, pour ainsi diminuer les pertes d'énergies dues au transport. Cependant, chaque énergie possède ses inconvénients et risques, et les énergies renouvelables ne font pas exception: des rendements trop faibles et des coûts d'installation non rentables, des processus de fabrication énergivores, de fortes dépendances aux conditions climatiques, une occupation du sol importante, etc. Il importe donc d'être conscient des possibles inconvénients.

Les énergies renouvelables dérivent toutes, directement ou indirectement, du soleil ou de la chaleur issue des profondeurs de la terre. Elles sont reprises brièvement ci-dessous, ainsi que leur(s) type(s) de production. Le but est de faire une première sélection des procédés qui peuvent être utilisés en Belgique, et qui pourraient nous intéresser dans le cadre de ce travail.

1.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie rayonnante représentée par la densité de flux énergétique, hors atmosphère, qui atteint la surface de la Terre. Celle-ci est donnée par la constante solaire $C = 1\,367 \text{ W/m}^2$. La quantité d'énergie finalement reçue par la surface de la Terre varie alors selon la situation géographique (latitude et longitude), les conditions climatiques, la période dans le temps et l'environnement physique. En Belgique, l'énergie solaire annuelle moyenne reçue est d'environ 1000 kWh/m^2 (APERe, 2013).

Il existe deux technologies qui permettent d'exploiter directement l'énergie solaire: le solaire thermique et le solaire photovoltaïque.

Le solaire thermique utilise des capteurs solaires permettant la transformation de l'énergie solaire en énergie de chauffage. Le capteur est constitué, entre autres, d'un fluide caloporteur et d'un absorbeur chargé de lui transférer le maximum d'énergie solaire possible. Ce type de capteurs, communément utilisé pour la production de chaleur, se distingue d'un autre type de capteurs, constitué de lentilles spéciales et associé à des installations de miroirs. Dans ce cas, l'absorbeur peut atteindre des températures supérieures à 3000°C , et est utilisé pour la production d'électricité solaire (Hegger et al, 2011). On les retrouve dans des grandes centrales, situées dans des endroits stratégiques, qui, grâce à ces capteurs à très haute température, produisent de la vapeur capable d'alimenter une turbine, générant ensuite de l'électricité. Ce type de centrale est appelé "centrale solaire thermodynamique", ou CSP (Concentrating Solar power Plant). Ce système n'est pas exploité en Belgique (la plus grande d'Europe se situe dans le sud de l'Espagne), mais est, selon l'IEA (International Energy Agency), très prometteur et devrait représenter d'ici quelques années une part importante de la production d'électricité à l'échelle planétaire.

Le solaire photovoltaïque exploite l'effet photoélectrique, c'est-à-dire le phénomène de transmission de l'énergie issue des photons de la lumière solaire aux électrons liés à la matière constituante du panneau photovoltaïque (Hegger, et al 2011). Le résultat de cette conversion lumineuse est un courant électrique directement exploitable. On retrouve des installations photovoltaïques aussi bien à l'échelle de grandes centrales, profitant d'une énergie lumineuse stratégique et réinjectant l'électricité produite sur le réseau, qu'à l'échelle plus petite du particulier, avec consommation directe ou non de l'électricité.

1.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne désigne l'exploitation de l'énergie cinétique du vent. Elle trouve son origine, une fois de plus, dans l'énergie solaire, responsable des mouvements de l'air à l'échelle planétaire. En effet, le réchauffement inégal de la surface de la Terre par les rayons solaires entraîne des différences de température, de densité et de pression qui engendrent les déplacements de l'air. Ceux-ci sont également influencés par la force de Coriolis résultant de la rotation de la Terre (Ngô, 2004).

L'éolienne, appelée également aérogénérateur, permet la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, utilisée afin de produire de l'électricité. Il existe plusieurs types d'éoliennes, qui diffèrent selon la puissance produite. Comme on le verra par la suite, la puissance est directement fonction de la hauteur de l'éolienne et de la longueur de ses pales, c'est pourquoi ces différents systèmes correspondent à des tailles différentes.

Les grandes éoliennes de grande puissance, regroupées généralement dans un parc éolien, sont destinées à alimenter les réseaux en électricité. Ces grands projets profitent des sites présentant un potentiel éolien favorable, comme c'est le cas en mer (parc offshore), sur les côtes ou sur des plateaux bien dégagés (parc onshore), où les vents sont forts et constants. Ce type d'éoliennes peut atteindre aujourd'hui, en théorie, des puissances de 10 MW (Lilien, 2009). En pratique, les plus grandes éoliennes atteignent généralement des puissances de 6 à 7 MW, pour un diamètre de pale avoisinant les 150 mètres. Cet ordre de grandeur peut être comparé à la demande en électricité annuelle de la Belgique, qui est de l'ordre de 85 TWh (Lilien, 2009).

En Wallonie, on trouve actuellement des parcs éoliens constitués de 3 à 11 éoliennes pour les plus grands projets, de puissance unitaire comprise entre 0,5 et 2,5 MW et pouvant atteindre plus de 70 mètres de diamètre. Plusieurs projets en cours, au stade de l'étude, comprennent cependant des éoliennes de puissance atteignant 3,5 MW (APERe, 2011a).

Les petites éoliennes couvrent la gamme de puissance inférieure à 100 kW. Selon l'IEC (International Electrotechnical Commission), auteur des normes internationales concernant les aérogénérateurs, la petite éolienne possède une surface de rotor maximale de 200 m² (norme IEC 61400). Cela correspond à un diamètre maximal d'environ 16 mètres (APERe, 2011b). Elle convient à la production d'électricité pour un site isolé, pour une ferme, pour une maison, pour un petit ensemble d'habitations ou encore pour de petites ou moyennes entreprises. Selon les besoins en électricité, on peut faire le choix d'installer un micro-éolien (puissance de quelques watts à 1kW), un mini-éolien (1 kW < puissance < 10 kW) ou un midi-éolien (10 kW < puissance < 100 kW) (APERe, 2011b).

En général, on ne parle de grandes éoliennes qu'à partir d'une puissance de 500 kW. Entre 100 kW et 500 kW, on parle de moyennes éoliennes (APERe, 2011b). Le principe de fonctionnement reste cependant identique d'une grande à une petite éolienne, seules quelques différences résident dans les composantes mécaniques du système. La suite de ce travail ne s'intéressera qu'aux petites éoliennes (puissance < 100 kW), qui sont adaptées à la production d'électricité sur site, et non de manière décentralisée dans un parc éolien. En effet, bien qu'une grande éolienne permettrait de produire suffisamment d'électricité pour tout un quartier, la hauteur de celle-ci et, par conséquent, la distance minimale nécessaire à respecter avec les habitations, empêchera son intégration au site.

Afin d'avoir une idée de ce que cela représente en terme de production d'électricité, on peut se baser sur le bilan des énergies renouvelables en Wallonie de 2009. En fin d'année, la puissance installée atteignait 319,4 MW pour les grandes éoliennes (puissance supérieure à 100 kW) et 0,3 MW pour les petites éoliennes (puissance inférieure à 100 kW). Ces 31 petites et 158 grandes éoliennes ont permis la production nette de 497,5 GWh, dont 0,17 GWh reviennent aux éoliennes de petites dimensions (ICEDD, 2011). En comptant une consommation par an des ménages en électricité de 3500 kWh/ménage, cela revient à alimenter 142 ménages. En fin de l'année 2011, on comptait déjà 246 grandes éoliennes pour une puissance installée de 541 MWh (SPW-DG04, 2013).

1.3 L'énergie géothermique

Par définition, l'énergie géothermique est "une énergie emmagasinée sous forme de chaleur sous la surface de la Terre solide" (directive EU 2009/28/CE). Celle-ci peut avoir deux origines: la chaleur profonde de la Terre et la chaleur du Soleil.

L'origine de la chaleur naturelle accumulée dans la Terre est liée à trois processus géothermiques (VITO Team geo et al., 2012 ; Ngô, 2004) :

- Le flux thermique provenant du noyau terrestre (dont la température avoisine les 4200°C) rayonne vers la surface de la Terre à travers le manteau du noyau tandis que celui-ci se refroidit lentement. Cependant, ce flux profond n'est pas réparti de façon homogène dans la croûte terrestre dans laquelle les techniques géothermiques puisent la chaleur, et ce processus lié à la formation de la Terre n'est responsable que d'une petite partie de la chaleur naturelle de celle-ci. Ce sont dans les zones volcaniques, là où le magma a la possibilité de remonter vers la surface de la Terre, que l'on trouve les geysers et autres sources très chaudes alimentées par ce flux, exploitables pour une géothermie à très haute température.
- Le frottement des plaques tectoniques créé par leur mouvement a pour conséquence de déformer et de chauffer la roche. Cette chaleur de frottement donne lieu à des sources d'eau chaude en certains endroits ponctuels de la croûte.
- Enfin, la radioactivité naturelle de certains éléments constitutifs de la croûte terrestre représente le processus thermique dominant, responsable de l'origine de la chaleur dans celle-ci. Ce processus de dégradation radioactive (décomposition progressive des éléments non stables vers des composants stables) libère de l'énergie qui est convertie en chaleur et s'accumule dans l'écorce ou se stocke dans des nappes d'eau souterraines, réservoirs naturels.

En ce qui concerne les couches supérieures de la Terre, la chaleur accumulée dans celles-ci a pour origine l'énergie solaire et le ruissellement de l'eau de pluie et non le flux de chaleur géothermique. Le sol, étant capable d'emmagasiner dans sa masse la chaleur absorbée, permet lui aussi de fonctionner comme un réservoir de chaleur. La technique alors utilisée pour exploiter cette source de chaleur naturelle est la pompe à chaleur géothermique (Hegger et al., 2011).

Selon la température de la source de laquelle est extraite la chaleur, on distingue différentes catégories d'utilisation de la géothermie, capables ou non de produire de l'électricité (Castello, 2004) :

- Géothermie « haute énergie »

La géothermie « haute énergie » concerne des températures au-delà de 150°C et nécessite des profondeurs très importantes ou des gradients géothermiques anormalement élevés. La centrale utilise les gisements de vapeur captés en profondeur afin d'alimenter des turbines chargées de produire le courant électrique.

- Géothermie « moyenne énergie »

La géothermie « moyenne énergie » correspond à des températures comprises entre 90°C et 150°C. À cette profondeur de quelques kilomètres, l'eau extraite des nappes rend possible la conversion de la chaleur géothermique en électricité à l'aide d'un fluide intermédiaire. À cette température, la géothermie peut également être utilisée pour des applications dans les industries ou pour alimenter un chauffage urbain.

- Géothermie « basse énergie »

La géothermie « basse énergie » est une utilisation directe de la géothermie dans le but de produire un chauffage direct. Cette technique correspond à des températures généralement comprises entre 30°C et 90°C, ce qui revient en Belgique à un forage de minimum un kilomètre (VITO Team geo et al., 2012). L'eau extraite des nappes, réchauffée par le sol, peut être ensuite utilisée directement ou par l'intermédiaire d'échangeurs (dans le cas d'eau corrosive) pour alimenter en chaleur un réseau urbain, le chauffage d'une serre, une station thermale, ou encore un bassin de pisciculture.

- Géothermie « très basse énergie »

La géothermie « très basse énergie » ou géothermie « superficielle » correspond à des températures de source entre 10°C et 30 °C, soit maximum quelques centaines de mètres de profondeur. Ce type de géothermie, exploitant la chaleur accumulée dans le sol résultant de l'énergie solaire, fait appel à une pompe à chaleur afin d'augmenter la température de la source à la température d'utilisation souhaitée. Il s'agit donc d'une utilisation indirecte de la géothermie, qui trouve son application dans le chauffage des locaux ou la climatisation des bâtiments, et dans la production d'eau chaude sanitaire.

Ici nous écartons directement la géothermie haute énergie qui n'est exploitée que dans les régions sismiques et volcaniques, où le flux de chaleur géothermique peut être décuplé par rapport au flux disponible dans nos régions, et n'est donc pas exploitée en Belgique (SPW-DG04, 2013). Nous ne tiendrons pas compte non plus de la géothermie moyenne énergie permettant la production d'électricité, car ce type de projet n'est aujourd'hui en Belgique qu'au stade de recherche, et même si le potentiel géologique laisse présumer de l'existence de sources accessibles à des températures suffisamment élevées, ces dernières nécessitent encore de nombreuses études et forages (et donc des coûts) avant d'être exploitées. On trouve cependant ce type de projet à l'échelle européenne, comme en Allemagne (APERe, 2012a).

1.4 L'énergie hydrothermique et aérothermique

L'hydrothermie et l'aérothermie sont des énergies emmagasinées sous forme de chaleur respectivement dans les eaux de surface et dans l'air ambiant (directive EU 2009/28/CE). Elles ont donc pour origine l'énergie solaire directement sous forme de chaleur qui réchauffe l'air ambiant et les cours d'eau.

Tout comme la géothermie très basse énergie, l'hydrothermie et l'aérothermie sont des énergies exploitées à l'aide d'une pompe à chaleur, qui, moyennant une alimentation électrique, permet d'élever la température de la source à une température correspondant aux besoins.

1.5 La biomasse

La biomasse est définie comme « la fraction biodégradable des produits, des déchets et résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux » (Directive EU 2009/28/CE).

Le terme biomasse-énergie désigne donc l'ensemble des agents énergétiques issus de matières organiques. Ces matières peuvent être d'origine végétale⁴, animale, ou être issues de la transformation de ces deux dernières (exemple: l'alcool issu de la fermentation du sucre des betteraves utilisé comme carburant). La biomasse englobe également l'ensemble des déchets organiques, ménagers et industriels. Les ressources de la biomasse utilisables sur le plan énergétique peuvent être divisées en plusieurs catégories, selon leurs origines:

Résidus de récolte	Il s'agit des produits issus directement de l'exploitation des forêts ou de l'entretien des paysages et des routes (bois ou paille)
Sous-produits organiques	Ce sont les résidus du traitement industriel du bois (sciures, écorces, copeaux, plaquettes, granulés, etc.) ou encore le lisier résultant de l'élevage d'animaux.
Déchets organiques	Les déchets urbains tels que les boues de station d'épuration et les ordures ménagères, ainsi que les déchets issus de l'agriculture comme le fumier.

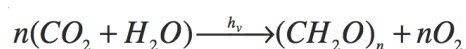
⁴ Cela comprend également les masses mortes végétales, mais qui n'ont pas encore été fossilisées. C'est là que se situe la différence avec les énergies fossiles résultant de l'énergie solaire stockée pendant une très longue période dans la matière fossilisée. La délimitation entre les deux débute par la tourbe. (Hegger et al., 2011).

Cultures énergétiques	Ce sont des plantations exploitées dans un but énergétique. On trouve les plantes oléagineuses (dont on extrait l'huile énergétique) comme le colza, les plantes ligneuses comme les taillis ou les miscanthus, ou les plantes à sucre ou amidon comme les betteraves.
-----------------------	--

tab. 2: Les catégories de la biomasse (sources: Hegger et al., 2011 ; Filloux, 2010)

On constate donc, par exemple, que le bois peut provenir directement de l'exploitation forestière, du traitement industriel du bois, ou encore de plantations.

La valorisation de la biomasse à des fins énergétiques est une façon indirecte d'exploiter l'énergie solaire, stockée temporairement dans la matière végétale. Celle-ci, durant sa croissance, absorbe une certaine quantité d'énergie solaire (h_v) et la transforme en énergie chimique stockée au sein de ses liaisons chimiques, par le processus de photosynthèse (Ngô, 2004):



L'équation de la photosynthèse illustre le fait que la croissance de la matière végétale est consommatrice en CO_2 , ce qui a des conséquences favorables sur l'environnement. La combustion de cette matière permet ainsi d'atteindre un cycle quasiment neutre en carbone, puisque seul le gaz carbonique absorbé par le végétal pendant sa croissance sera rejeté lors de la combustion. Néanmoins, l'entièreté du processus de mise en disposition de la biomasse pour exploitation doit être analysé en terme de consommation d'énergie primaire dans le bilan global.

On distingue trois procédés de valorisation énergétique de la biomasse:

- *Valorisation sous forme de chaleur par combustion*

Le bois-énergie fournit, comme le gaz, le pétrole et le charbon, de la chaleur par réaction chimique lors de la combustion. Le combustible, contenant principalement des hydrocarbures (combinaisons multiples de carbone et d'hydrogène) réagit avec l'oxygène de l'air pour former du gaz carbonique et de l'eau (sous forme de vapeur étant donné la température), avec un dégagement de chaleur (réaction exothermique).

La biomasse sous forme de combustible est utilisée pour produire de la chaleur, ou pour produire de la chaleur combinée à de l'électricité lorsqu'elle est utilisée dans une unité de cogénération.

- *Valorisation sous forme de gaz par biométhanisation ou gazéification*

La gazéification désigne le procédé qui permet de transformer un combustible solide, le bois, en un mélange gazeux grâce à un agent oxydant, de l'air. Le gaz produit de cette manière est un gaz "pauvre", car son PCI est très faible. On peut obtenir un gaz deux fois plus riche en utilisant de la vapeur d'eau pour gazéifier le bois, qui, raffiné, peut servir à la production de biocarburants. Ce procédé n'est cependant pas encore développé en industrie et est toujours au stade de l'étude en Région wallonne. Le gaz pauvre est employé comme carburant dans des moteurs à combustion interne (turbine à gaz). Ils permettent donc de produire de l'électricité et de la chaleur lorsque celle-ci est récupérée. Uniquement dans ce cadre de la cogénération, et pour des puissances comprises entre 300 kW_{él} et 1000 kW_{él} (sinon les turbines ne sont pas adaptées), la gazéification du bois peut représenter une alternative à la combustion du bois. Ce procédé existe actuellement en Wallonie sur quelques projets de chauffage urbain, mais nécessite encore toute une série de travaux d'optimisation pour en faire une technique réellement compétitive (Crehay & Marchal, 2004).

La biométhanisation est un processus industriel qui reproduit la méthanisation. Elle consiste en la dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène, qui conduit à la production d'un mélange gazeux que l'on appelle biogaz. Le méthane est l'élément constitutif principal de ce mélange. L'avantage de ce processus, par rapport à une dégradation en condition aérobie (comme pour le compostage), est que la chaleur due à la réaction n'est pas dégagée immédiatement. C'est en brûlant le méthane, au moment choisi, que l'on pourra utiliser le potentiel énergétique du processus. Les ressources permettant la biométhanisation

sont nombreuses, mais la quantité de biogaz que l'on pourra en produire varie en fonction de son origine. Il s'agit principalement des résidus organiques biodégradables (mais pas les déchets ligneux qui ne peuvent être décomposés par les micro-organismes) tels que les résidus ménagers, alimentaires, les boues d'épuration, les effluents d'élevage, etc. Il peut s'agir également de cultures énergétiques, à condition qu'elles n'empêchent pas les cultures alimentaires.

Les utilisations des biogaz sont multiples. En Belgique, l'utilisation qui leur est préférée est la production d'électricité et de chaleur simultanément par l'alimentation d'un moteur à combustion interne. Des réflexions sur l'injection du biogaz, après une épuration efficace, sur le réseau gazier existant, mais n'ont pas encore abouti. Le biogaz peut également être converti en carburant pour les véhicules, mais ce n'est pas encore développé en Belgique (Bureau d'études IRCO, 2010).

- *Valorisation sous forme de carburant par transestérification*

Les biocarburants sont des produits de la biomasse, issus de la filière des cultures énergétiques. On distingue deux catégories de plantes énergétiques qui permettent la production de ces « carburants renouvelables » (ValBiom, 2004) :

Les plantes oléagineuses, c'est-à-dire les plantes desquelles on peut extraire des huiles végétales à partir de graines, sont utilisées pour produire du biodiesel (ou ester méthylique) grâce à une transformation appelée transestérification. Ce type de biocarburant peut être utilisé dans les moteurs diesel actuels, mais on trouve également les huiles végétales pures qui doivent être mélangées avec du diesel ou utilisées dans un moteur modifié. L'huile potentiellement utilisable en Wallonie est l'huile de colza, mais on trouve également de l'huile de tournesol. L'huile végétale peut également alimenter une unité de cogénération pour produire de l'électricité et de la chaleur simultanément.

Les plantes dont la fermentation permet d'obtenir de l'éthanol sont les plantes sucrées et amylacées, telles que les betteraves, cannes à sucre et le froment, le maïs, etc. On peut retrouver de l'éthanol dans les moteurs actuels à raison de 5 à 20 % (le reste étant de l'essence fossile), ou dans de très grandes proportions (jusqu'à 100 %), à condition que le moteur soit adapté. Lorsque l'éthanol est modifié pour devenir de l'éthyl tertio butyl ether (ETBE), il est mélangé à l'essence (à raison de 15%) dans le but d'augmenter la résistance de l'essence à la détonation et donc avoir une combustion mieux contrôlée⁵.

1.6 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie prélevée sur le cycle de l'eau, dont l'énergie solaire est à l'origine. Un quart de l'énergie solaire est absorbée par le cycle de l'eau au cours duquel l'eau évaporée des océans retombe sous forme de précipitations sur les continents de façon à former des rivières et ainsi rejoindre la mer. L'énergie exploitée provient des différences de hauteur, naturelles ou artificielles, du cours d'eau (Ngô, 2004).

Les centrales hydroélectriques utilisent la puissance délivrée par la chute d'eau, proportionnelle à la hauteur de la chute et au débit de l'eau, afin d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité. On distingue plusieurs types de centrales en fonction de leur puissance (Pagès et al., 2003):

Les grandes centrales sont de quelques MW et peuvent atteindre 50 GW pour les plus grands barrages (la grande éolienne: maximum 10 MW !). On parle de petites centrales hydroélectriques en dessous de 10 MW, de mini-centrales pour des puissances entre 0,5 et 2 MW, de micro-centrales pour des puissances comprises entre 0,2 et 0,5 MW, et de pico centrale pour les puissances inférieures. Lorsque l'on compare les puissances des centrales avec celles des éoliennes par exemple, on se rend compte que l'hydroélectricité possède une

⁵ La résistance à la détonation du carburant est donnée par l'indice d'octane. Plus celui-ci est élevé, plus la combustion est contrôlée. Des additifs antidétonants sont donc depuis toujours ajoutés à l'essence. Le plomb a été pendant longtemps utilisé, mais les exigences en terme de pollution l'ont supprimé du marché, car celui-ci détruit les pots catalytiques. On trouve aujourd'hui des antidétonants au benzène, mais qui sont cancérigènes. L'ETBE est donc une alternative intéressante.

puissance très importante qui la différencie des autres énergies renouvelables. Elle ne convient donc pas, à l'inverse de ces dernières, à des sites de faible densité avec des demandes relativement faibles (Ngô, 2004).

Le potentiel hydroélectrique existe en Belgique, bien qu'il soit relativement faible. Il existe tout de même actuellement 86 centrales hydroélectriques en Wallonie (DG04 – SPW, 2013). Ce type d'énergie possède un avantage certain d'un point de vue du réchauffement climatique, accompagné cependant de plusieurs impacts négatifs sur l'environnement, difficilement calculables. On entend par là les conséquences sur la qualité de l'eau ou l'écologie du cours d'eau, les altérations possibles du site (chutes, éboulement, ...), etc. Il existe notamment des normes européennes exigeant qu'un débit minimal soit laissé au cours d'eau afin de garantir la vie de celui-ci (Lovinfosse et al., 2003). On comprend aussi de cette manière que l'hydroélectricité peut difficilement devenir une production décentralisée accessible à tous, mais doit rester ponctuelle au niveau des cours d'eau de façon à en garantir la survie. Des progrès sont envisageables, mais à ce jour, la petite hydroélectricité pose plusieurs problèmes environnementaux et d'acceptation (Ngô, 2004).

Ainsi, les perspectives de l'énergie hydraulique en Belgique se trouvent plutôt dans l'amélioration des centrales existantes, ou la réhabilitation d'un ancien site. En ce qui concerne les plus petites puissances, le développement de l'énergie hydraulique se focalise sur les anciens petits moulins utilisant la force motrice de l'eau depuis des siècles. Leur rénovation permet à la fois de valoriser le patrimoine historique et de produire de l'électricité (DG04 – SPW, 2013).

En raison de l'impossibilité d'en faire aisément une production décentralisée et de sa faible potentialité par rapport à d'autres sources, l'énergie hydraulique ne sera pas retenue dans la suite de ce travail.

1.7 Les déchets

On associe généralement aux énergies renouvelables les déchets, pour lesquels plusieurs techniques de valorisation énergétique existent. Ils se distinguent cependant de celles-ci par leur dépendance au "stock" disponible. On distingue les déchets industriels, des déchets urbains et assimilés.

La première catégorie contient des produits non biodégradables, qui sont généralement directement utilisés comme combustibles dans une centrale thermique produisant de la chaleur ou de l'électricité. Ce type de valorisation est utilisé notamment dans des réseaux de chaleur urbains, à condition qu'ils soient proches de la centrale d'incinération de façon à limiter les pertes.

Par déchets urbains et assimilés, on entend l'ensemble des déchets produits par les ménages, les hôpitaux et le secteur tertiaire, qui contiennent ou non des produits biodégradables. Après tri de ceux-ci, on peut extraire les déchets d'origine organique qui peuvent être valorisés par le processus de biométhanisation. Ces déchets rejoignent alors les déchets agricoles et de l'exploitation forestière dans la catégorie de la biomasse (AIE & Eurostat, 2005).

1.8 Le cas de l'hydrogène

L'hydrogène fait beaucoup parler de lui ces dernières années, parce qu'il permet lui aussi, comme les énergies renouvelables, de lutter contre l'accroissement de l'effet de serre et de remplacer une partie de la consommation des combustibles fossiles. Il s'agit d'un vecteur énergétique, produit à partir d'une énergie primaire, qui peut être transporté, stocké, distribué, et converti en d'autres formes d'énergie. L'atome d'hydrogène est l'élément le plus abondant de la terre. On le retrouve dans l'eau, le pétrole et le gaz. Celui-ci est toujours associé à un autre élément, et l'extraction de l'hydrogène pur nécessite donc des procédés énergivores.

Actuellement, l'hydrogène est issu majoritairement de combustibles fossiles, ce qui contribue toujours à l'augmentation de l'effet de serre, et accentue l'épuisement des ressources. La fabrication de l'hydrogène à partir de l'eau est possible grâce à l'électrolyse de l'eau. Cela nécessite de l'électricité, dont l'origine de la production sera déterminante pour la qualité environnementale de la fabrication de l'hydrogène. Ce procédé

est cependant très cher (quatre fois plus cher que la fabrication à partir de gaz naturel), ce qui le rend très peu compétitif à ce jour (Ngô, 2004).

L'hydrogène fera sans aucun doute partie des vecteurs énergétiques de l'avenir, associé généralement à une pile à combustible, dispositif de conversion d'énergie, et utilisé dans le secteur du transport. Des recherches et des progrès technologiques sont néanmoins nécessaires avant d'en faire un vecteur énergétique propre et accessible.

1.9 Autres

Les recherches de nouvelles énergies renouvelables sont en plein essor et ci-dessus n'ont été décrites que les plus utilisées aujourd'hui. Citons par exemple quelques autres pistes, au stade de recherche, qui viendront peut-être compléter l'éventail des énergies puisées dans les processus naturels qui définissent notre environnement (Barré & Mérenne-Schoumaker, 2011):

- La biomasse marine permettrait de produire des algocarburants à partir de micro-algues. Par rapport aux biocarburants, cela permet de ne pas avoir de conflit avec l'eau douce et l'occupation des terres destinées à des besoins alimentaires.
- Les gradients de salinité produits lorsqu'un fleuve se jette dans la mer libèrent une certaine quantité d'énergie qu'il est possible d'exploiter
- L'énergie cinétique des courants marins, constants et prévisibles, pourrait être récupérée à l'aide d'hélices à la façon des éoliennes. On les appelle d'ailleurs les éoliennes subaquatiques. Cette récupération d'énergie est difficile, mais représente une piste à étudier. De la même façon, l'énergie des vagues peut être exploitée pour produire de l'électricité, ou encore l'énergie des marées, qui présentent l'avantage d'être prévisibles, bien qu'intermittentes. Il existe actuellement quelques centrales marémotrices et d'autres sites sont au stade de l'étude, mais il reste encore plusieurs défis aux niveaux technologique et écologique.
- ...

Dans le cadre de ce travail, le choix est fait d'avoir recours à des techniques et procédés qui sont utilisés déjà depuis quelques années et qui ont prouvé leur efficacité. Le but n'est pas de tester de nouvelles techniques qui sont toujours au stade expérimental, pour constater leurs conséquences sur le bilan énergétique global. Rappelons que le but est de voir dans quelle proportion les énergies renouvelables peuvent intervenir dans un bilan global, ce qui n'a de sens que si ces techniques sont maîtrisées et fiables.

1.10 Tableau récapitulatif

La figure suivante reprend les énergies renouvelables communément utilisées, et l'énergie utile fournie qui serait susceptible de nous intéresser dans le cadre de ce travail. Au vu de la discussion ci-dessus, certaines technologies ne seront pas étudiées, et d'autres seront approfondies par la suite. Ces dernières sont mises en évidence en couleur sur la figure.

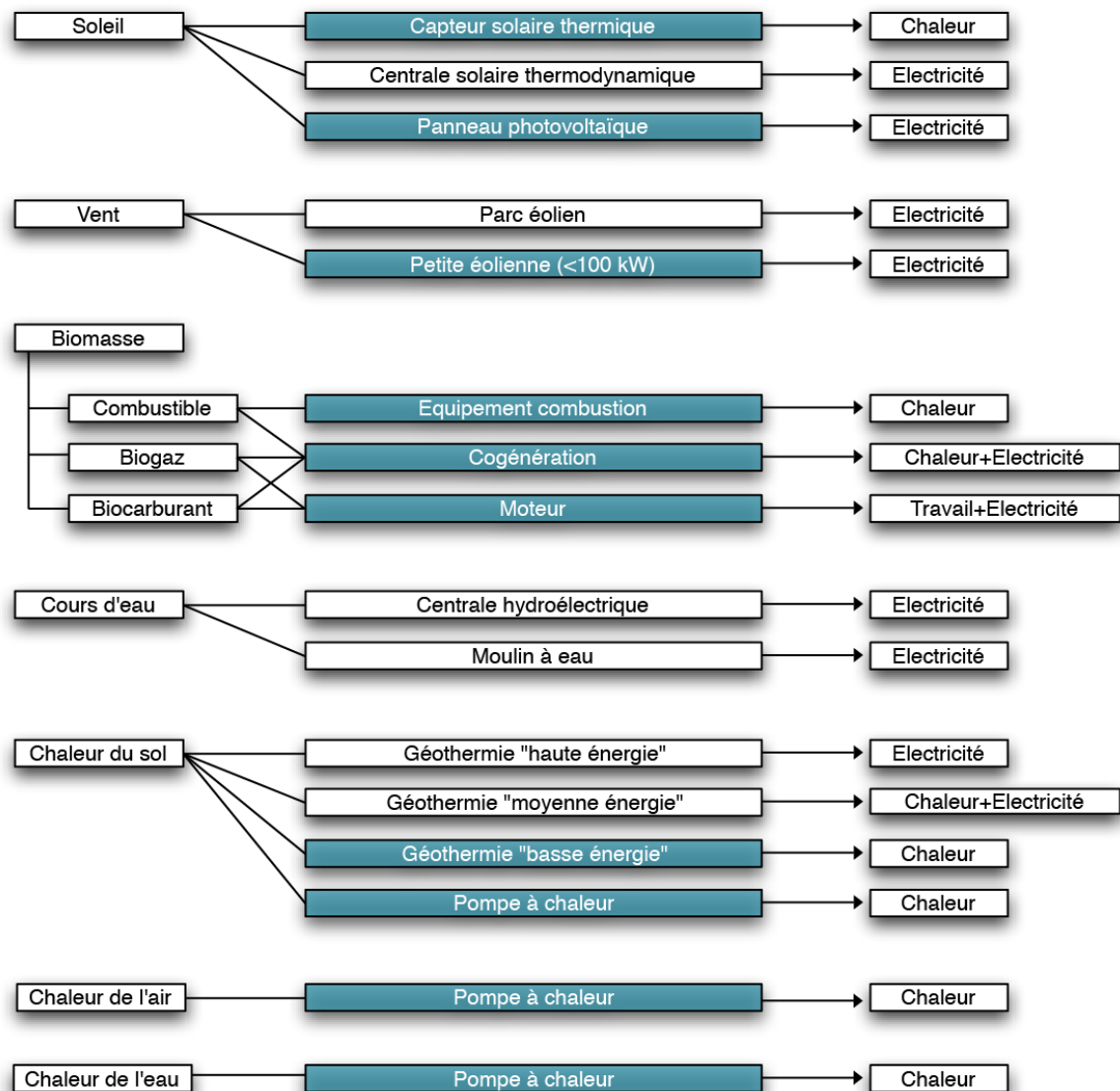


fig. 7 : Les énergies renouvelables les plus utilisées et leurs applications (source: APERe, 2013)

2. Application dans le secteur du bâtiment

Les procédés sélectionnés dans le tableau récapitulatif seront ici analysés. Nous commencerons par les technologies permettant la production d'électricité (la petite éolienne et le panneau photovoltaïque), puis les technologies utilisées pour la production de chaleur (le capteur solaire thermique, la pompe à chaleur, la géothermie "basse énergie" et la combustion du bois), et enfin la technologie qui permet la production des deux simultanément (la cogénération). Une brève explication de chaque système permettra de comprendre leur fonctionnement, et d'en déduire ensuite les critères qui influencent leur performance. Enfin, on déterminera les freins qui existent, actuellement et plus particulièrement en Wallonie, à leur pleine exploitation. Avec ces informations, nous serons alors capables de répondre aux deux questions qui nous occupent, à savoir :

- Quelle échelle de production choisir ?
- Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et/ou en milieu périurbain ?

Néanmoins, avant de répondre à la question de l'échelle, nous devons apporter quelques précisions quant à ce qu'induit la mutualisation des besoins à l'échelle de l'îlot. La centralisation de la source de production entraîne la création d'un réseau, réseau de chaleur ou réseau d'électricité. Même si le système de production permet la centralisation, il n'est pas certain que le réseau, lui, sera envisageable. Il y a donc un double critère à respecter pour la mutualisation des besoins. Avant d'étudier les procédés de production d'électricité, de production de chaleur, et de production d'électricité et de chaleur simultanées, on abordera donc la question des réseaux.

2.1 Les réseaux

L'intégration d'un système énergétique à l'échelle urbaine nécessite la création d'un réseau de distribution, d'électricité ou de chaleur, afin de combiner les demandes en énergie des différents consommateurs. Les réseaux électriques présentent des déperditions relativement faibles, et permettent ainsi un approvisionnement sur de grandes distances. Au contraire, les réseaux de chaleur sont sujets à des déperditions qui peuvent être très importantes. C'est pourquoi on ne les rencontre qu'à une échelle urbaine locale (Hegger et al., 2011). On distingue deux éléments qui participent à atténuer les bénéfices de la centralisation de la production de chaleur :

- Les pertes de distribution

La répartition de l'énergie au sein d'un réseau et son transport vers les bâtiments entraînent des déperditions d'énergie, fonction de la longueur et de la dimension des canalisations et de la température de fonctionnement. Pour des réseaux de bonne qualité, ces pertes sont cependant pratiquement négligeables, à condition que l'ensemble de l'installation soit correctement isolé (Union des Villes et Communes de Wallonie, 2009).

- Le coût d'investissement

L'implantation d'un réseau de chaleur, surtout dans un quartier existant, nécessite d'importants travaux de génie civil. Il ne faut pas non plus négliger le coût des sous-stations qui permettent l'échange de chaleur entre le réseau et chaque habitation. On sait néanmoins que la création d'un réseau dans un contexte bâti existant n'est pas un obstacle insurmontable, puisque c'est le cas de la plupart des récents projets en Wallonie (Union des Villes et Communes de Wallonie, 2009).

Vu le lourd investissement de départ, on considère un critère de rentabilité du réseau, seuil en dessous duquel l'installation de celui-ci n'est plus pertinente. Ce critère est en fait un indicateur de la densité énergétique, ou densité thermique, d'une entité où l'on désire installer un réseau de chaleur, exprimé par kWh de chaleur vendue annuellement, par mètre linéique de réseau (Le Dû, 2012). D'autres paramètres entrent en jeu dans la pertinence d'un réseau de chaleur, mais ce critère est celui qui permet d'assurer la viabilité financière de celui-ci. La quantité de chaleur qui sera vendue annuellement aux bâtiments dépend essentiellement de la surface chauffée de ceux-ci, et de leur niveau d'isolation (éventuellement le comportement des occupants, si ceux-ci n'occupent pas les bâtiments toute l'année). Dans le cas où cette quantité est trop faible, les revenus du réseau ne permettront pas d'amortir le lourd investissement de départ du réseau (MATRIciel, 2010).

Ce critère de rentabilité dépend de l'investissement de départ engendré par le réseau, c'est pourquoi il diffère d'une source à l'autre de la littérature. Pour les grands réseaux de chaleur installés dans les années 60-70, on observe des densités énergétiques de l'ordre de 8000 kWh/m linéique de réseau. Pour les réseaux plus petits et plus récents, la densité est généralement beaucoup plus faible, aux environs de 3000 à 6000 kWh/m, et descend même jusqu'à 1000 kWh/m dans certains cas particuliers (Le Dû, 2012). Une étude, réalisée à l'Université de Liège, fixe le critère à 2000 kWh/m linéique de réseau, par année, sur base de l'analyse de réseaux de chaleur existants en France et du prix moyen, par mètre courant, de l'installation (Pacot & Reiter, 2012). L'IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement) a publié quant à lui un critère de rentabilité, moins contraignant, de 1500 kWh/m linéique (MATRIciel, 2010).

On comprend donc que plus les bâtiments sont éloignés les uns des autres, plus ils devront être consommateurs d'énergie pour assurer la rentabilité du réseau. Cela pose la question non seulement de l'utilisation du réseau de chaleur en îlot périurbain peu densifié, mais aussi l'utilisation du réseau de chaleur alors que l'on tend vers une diminution des consommations des bâtiments. Au-delà de ce critère de rentabilité, d'autres éléments permettent d'assurer le bon fonctionnement d'un réseau de chaleur, et doivent également entrer en compte dans la décision de son installation (Le Dù, 2012) :

- Densité bâtie

On a vu que ce qui importait surtout était la densité thermique, plutôt que la densité bâtie. Cependant, il est intéressant de présenter ici les résultats d'une étude réalisée sur plusieurs écoquartiers en France, pour lesquels le réseau de chaleur était une solution pertinente, compte tenu de la densité de construction :

Quartier	Nombre de logements/ha	m ² /ha
Temps Durables – Limeil-Brevanne	132	10.500
Le Fort – Issy-les-Moulineaux	192	13.440
Centre Ste-Geneviève – Nanterre	130	9.100
Hoche – Nanterre	160	12.425
Bretigny-sur-Orge	57	3.990
Ginko – Bordeaux	67	4.690
Gare de Rungis – Paris	100	4.333
Ecovela – Viry	41	3.749
Vidailhan – Balma	39	1.470
Calais	87,5	7.000
Bastille – Fontaine	102	7.140

tab. 3: Exemple de quartier avec réseau de chaleur (source: Le Dù, 2012)

Ce tableau ne peut donc pas être considéré séparément de toute considération thermique. Cela dit, il permet de donner une idée de la pertinence d'un réseau de chaleur dans les deux cas qui nous occupent, comparé aux données qui ont été calculées dans le cas des deux îlots analysés ici.

- La forme urbaine

La mise en place des canalisations représente une part importante de l'investissement global du réseau. Or, le linéaire de canalisation nécessaire à la desserte d'un ensemble de bâtiments dépendra forcément de la forme urbaine de l'échelle considérée.

- La mixité d'usage

Lorsque plusieurs fonctions (logements, tertiaires, industries, loisirs, etc.) sont desservies par le réseau, on assiste à un effet de foisonnement qui tend à lisser les besoins en atténuant les « pics », durant l'année ou même à l'échelle de la journée ou de la semaine. Cet effet a une conséquence positive sur l'installation, puisqu'aussi bien la chaufferie, les canalisations et les sous-stations doivent être dimensionnées de façon à couvrir même les besoins instantanés les plus élevés, et sont dès lors surdimensionnées le reste du temps. Il est donc intéressant d'avoir une courbe des besoins la plus constante possible, pour que le système de production ait la durée de fonctionnement équivalente à pleine puissance⁶ la plus longue possible. La durée peut également être plus élevée lorsque l'on réduit les intermittences éventuelles entre les demandes de chaleur. Il ne faut cependant pas négliger l'intermittence de la demande. Si les fonctions présentent un pic

⁶ Appelée également « durée de fonctionnement », la durée de fonctionnement équivalente à pleine puissance exprime le rapport entre l'énergie utile livrée sur un an et la puissance installée du système. Si le réseau fonctionne à puissance nominale toute l'année, la durée est de 8760 heures. On considère qu'à partir de 5000 heures, l'installation est performante. En dessous de 2000 heures, on estime que la capacité de la production de chaleur n'est pas suffisamment exploitée (Le Dù, 2012).

de consommation élevé au même instant donné, l'intermittence sera très forte, et tendra à diminuer la durée de fonctionnement. Les îlots d'habitations, bien que la mixité soit nulle, présentent tout de même l'avantage d'une intermittence très faible.

Le critère de rentabilité ne peut à lui seul déterminer de la faisabilité de l'installation d'un réseau de chaleur. Néanmoins, il représente un indicateur efficace de sa pertinence.

2.2 Production d'électricité

2.2.1 La petite éolienne

Explication du système

Une succession de trois étapes dans l'aérogénérateur assure la capture de l'énergie du vent et la conversion en électricité. La première étape se situe au niveau des pales qui, sous l'action du vent, tournent et entraînent la rotation du rotor auquel elles sont reliées. Il s'agit de la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite, un multiplicateur de vitesse, constitué de deux arbres tournants (un à rotation lente et un à rotation rapide) et d'une transmission mécanique (des engrenages), permet d'augmenter la vitesse du rotor (de 12 à 15 tours/minute) jusqu'à une vitesse supérieure (environ 1500 tours/minute) afin que le mouvement puisse être utilisé par le générateur et qu'il fonctionne correctement. L'arbre à rotation rapide entraîne le générateur qui, dernière étape, produit du courant continu s'il s'agit d'une dynamo, ou du courant alternatif dans le cas d'un alternateur. Ces deux dernières étapes sont réalisées dans la nacelle qui abrite l'ensemble de ces composants (EWEA 2013; Filloux, 2010).

L'aérogénérateur est équipé également d'un dispositif de régulation et de contrôle qui régule la vitesse de rotation du rotor dans des limites acceptables, afin d'éviter que les pales ou le générateur ne soient endommagés. Il importe donc que le rotor puisse être freiné par ce dispositif de sécurité, ou par un frein d'urgence lorsque l'éolienne doit s'arrêter rapidement (Les Compagnons d'Eole et al., 2012).

On distingue deux types de petites éoliennes, selon l'orientation de l'axe de rotation (Les Compagnons d'Eole et al., 2012) :

- *Éoliennes à axe horizontal*

Il s'agit de l'éolienne que l'on rencontre généralement dans les parcs éoliens, constituée de trois pales tournantes. On trouve également des systèmes constitués d'une multitude de pales, bien adaptés aux vents de faible vitesse, mais très fragiles en cas de fortes intempéries, ou constitués uniquement de deux pales qui nécessitent de tourner plus rapidement pour produire la même énergie. Le nombre de trois pales est un compromis avec l'ensemble des contraintes.

- *Éoliennes à axe vertical*

Ce type d'éolienne, à l'inverse du précédent, ne capte pas l'énergie cinétique du vent provenant d'une direction préférentielle. Ces éoliennes s'adaptent donc mieux aux milieux urbains dont les obstacles multiples créent des turbulences modifiant la trajectoire du vent et le rendant imprévisible, mais produisent tout de même une énergie moindre. Elles sont facilement intégrées au bâti en venant s'installer en toiture du bâtiment, mais cela est parfois déconseillé, car les plus fortes turbulences se situent à cet endroit, et si le bâtiment n'a pas été conçu pour l'accueillir, il risque de subir de graves détériorations (APERe, 2011b).

Si l'éolienne est raccordée au réseau électrique, le courant produit sera soumis préalablement à un dispositif qui ajuste sa fréquence à celle du réseau - la rotation du rotor étant variable en fonction du vent - puis à un transformateur (Filloux, 2010). Le raccordement au réseau de distribution est permis tant qu'il n'a pas d'effet négatif, comme la saturation de celui-ci. Si l'éolienne n'est pas raccordée au réseau, l'électricité produite peut être consommée instantanément sur place, puis stockée (ou perdue). Le stockage de l'électricité sur un site isolé n'est cependant pas encore chose aisée, et surtout est coûteux. Les batteries au plomb, utilisées le plus

souvent, ne possèdent qu'un rendement de 50 % et peuvent contenir des substances dangereuses. De plus, elles ont un impact négatif sur l'environnement par leur processus de fabrication. De nouveaux types de stockage plus performants et plus intéressants voient le jour petit à petit, mais coûtent très cher et sont toujours au stade expérimental. Bien souvent, ce type d'éolienne autonome n'est installé que lorsque le raccordement au réseau électrique est impossible (IBGE, 2009).

Critères de performance

La puissance fournie par l'éolienne est l'énergie cinétique du vent récupérée par seconde au travers de sa surface. La formule ci-dessous permet d'évaluer cette puissance (Lilien, 2009):

$$\text{Puissance} = 0,5 * m_{\text{air}} * V^2 = 0,5 * \rho * S * V^3$$

Où V est la vitesse du vent (m/s) et m_{air} représente la masse d'air qui passe au travers des pales de l'éolienne par seconde (kg/s). Cette équation correspond donc à la récupération de l'énergie cinétique du vent de vitesse V (m/s) et de masse volumique ρ (kg/m³), passant au travers d'une éolienne de section S (m²).

On observe donc que plus le vent est important, plus la puissance du vent disponible sera grande, proportionnellement au cube de celui-ci. Cependant, comme une vitesse trop importante est dommageable, on considère généralement une plage de vitesse entre 4 m/s, en dessous de laquelle l'éolienne n'est pas capable de produire de l'énergie, et 25 m/s, au-delà de laquelle le rotor doit être freiné (EWEA, 2013). La vitesse du vent augmente avec la hauteur par rapport au sol. Le profil de vitesse en fonction de la hauteur varie selon la nature du sol, c'est-à-dire sa rugosité, ou sa capacité à freiner l'écoulement du fluide. Plus le vent est capturé à une hauteur élevée, plus il possède une vitesse importante, moins influencée par la surface du sol. Pour les petites éoliennes, la hauteur minimale, en dessous de laquelle le rendement est médiocre, est de 10 m (Architecture et climat, 2013). On constate également que la puissance augmente avec la section de l'éolienne, qui dépend directement du rayon des pales qui la constituent. Lorsque celui est doublé, la puissance est quatre fois plus grande.

La puissance du vent telle que calculée ci-dessus doit cependant être minorée par plusieurs facteurs, pour tenir compte des rendements propres aux trois étapes de la conversion de l'énergie cinétique en électricité, énoncées plus haut (Architecture et climat, 2013):

- Rendement aérodynamique du rotor (conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique)
- Rendement d'accouplement mécanique de la transmission (transmission de l'énergie mécanique au générateur)
- Rendement électrique du générateur (conversion de l'énergie mécanique en électricité)

Le rendement aérodynamique sera toujours inférieur à la limitation de Betz. La loi de Betz, démontrée par Betz en 1926, exprime le fait que la capacité de récupération de l'énergie cinétique du vent par l'éolienne est limitée à 16/27 (environ 60%) de la puissance du vent disponible. En ce qui concerne le rendement électromécanique, on considère que les petites éoliennes parviennent à récupérer 50 % de la limite de Betz (pour des vitesses de vent de 10 à 12 m/s) (Les Compagnons d'Eole et al., 2012). L'évaluation de la puissance fournie par l'éolienne devient alors:

$$\text{Puissance} = \eta_{\text{aéro}} * \eta_{\text{trans}} * \eta_{\text{élec}} * 0,5 * \rho * S * V^3$$

Comme il est difficile cependant de connaître de manière précise chaque rendement, c'est en général le rendement global de l'éolienne qui est donné, exprimé comme le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance du vent à disposition à un moment précis. Lorsque l'on regarde ce rendement global sur une plus longue période de temps, on parle de rendement global moyen. Il se situe aux environs de 20 % pour les petites éoliennes (35 % pour les grandes) (Architecture et climat, 2013).

L'équation de la puissance ci-dessus permet de connaître la puissance électrique débitée par l'éolienne pour une vitesse du vent donnée, à un instant précis. L'intégration de toutes ces puissances sur l'année, afin de

connaître l'énergie annuelle produite par l'éolienne (kWh), possède une grande faiblesse liée à la difficulté de connaître le profil exact des vitesses du vent sur l'année, qui peut varier sur une très courte période de temps et change d'année en année. De ce fait, les mesures seront toujours insuffisantes et incertaines, et le recours à des modèles mathématiques est obligatoire, avec les approximations que cela comporte (Les Compagnons d'Eole et al., 2012).

La performance de l'éolienne sera donnée, par le constructeur, sous forme de sa courbe de puissance électrique en fonction de la vitesse du vent. Bien que celle-ci soit relativement fiable dans le cas des grandes éoliennes, soumises à des normes et essais standardisés, il faut rester très prudent quant aux données relatives aux petites éoliennes dont le marché n'est pas aussi développé. Cette courbe permet, en outre, de prédire la production électrique de l'éolienne sur l'année si on connaît, de manière suffisamment précise, la distribution statistique des vitesses du vent sur cette période de temps. Elle permet, surtout, de mettre en évidence la vitesse minimale et maximale de l'éolienne, ainsi que sa puissance électrique maximale (puissance nominale) pour une certaine vitesse de vent donnée (Les Compagnons d'Eole et al., 2012).

Au vu de la variabilité du vent, on comprend aisément que l'éolienne fonctionnera en deça de sa puissance nominale pendant une partie de l'année. En Wallonie, on estime que l'énergie électrique produite par une petite éolienne sur une année correspond typiquement à entre 10 et 12% de l'énergie électrique qu'elle aurait pu produire en fonctionnant à puissance nominale toute l'année (Les Compagnons d'Eole et al., 2012). Pour tenir compte de ce point faible, on utilise un équivalent d'heures de fonctionnement à puissance nominale afin de dimensionner correctement l'engin. Par exemple, si le rapport est de 12%, la production de l'éolienne correspond à $0,12 * 8670 = 1051$ heures de fonctionnement à puissance maximale. Cela représente la productivité de l'éolienne sur toute l'année (= un certain nombre d'heures à puissance nominale). Pour une grande éolienne, on peut compter en Wallonie sur un équivalent de 1800 h à 2200 h de fonctionnement à puissance nominale (3 300 heures à la mer) (IBGE, 2009).

Les freins à l'exploitation du potentiel éolien

- *Variabilité du vent*

La variabilité du vent a pour conséquence que l'éolienne produit une puissance inférieure à sa puissance nominale, la plupart du temps. C'est là le gros défaut de l'éolienne, car non seulement elle ne fonctionne que rarement à pleine puissance, ce qui demande de la surdimensionner, mais elle ne donne pas l'assurance d'avoir une production stable d'électricité.

Afin d'assurer l'efficacité du système, on cherche à exploiter un vent dont la vitesse et la régularité seront maximales. Comme on l'a dit précédemment, la vitesse du vent augmente avec la hauteur, c'est pourquoi on valorise un mât le plus haut possible afin d'éviter l'effet de rugosité du sol. De plus, il faudra tenir compte de tout obstacle (comme la végétation ou les bâtiments) susceptible d'entraîner des turbulences de l'écoulement, de le ralentir, de le rendre irrégulier, imprévisible, et inutilisable par l'éolienne. L'effet peut être très important lorsque l'obstacle est un bâtiment, mais est moindre s'il s'agit d'un arbre puisque celui-ci, plus poreux, permet à une fraction de l'écoulement de le traverser. La zone d'influence atteint le double de la hauteur et plus de 20 fois la longueur de l'obstacle. Les pales de l'éolienne doivent impérativement se situer à une hauteur suffisante pour ne pas être dans la zone de turbulence engendrée par l'obstacle (Architecture et climat, 2013). Il est conseillé que les pales se situent à minimum 6 m au-dessus de tout obstacle dans un rayon de 75 m (Les Compagnons d'Eole et al., 2012).

Il ne faut pas non plus négliger l'effet du relief sur la vitesse du vent. Il peut avoir un effet bénéfique, en considérant l'effet d'accélération dû au relief lorsque l'éolienne est placée au sommet d'une colline par exemple. À l'inverse, elle peut subir les effets négatifs du relief lorsque celui-ci présente un obstacle à l'écoulement (Les Compagnons d'Eole et al., 2012). Pour toutes ces raisons, le potentiel éolien peut varier très fortement entre deux implantations distinctes de seulement quelques mètres.

Enfin, l'installation d'une éolienne devra tenir compte également de la direction des vents dominants du site. En Belgique, il s'agit de la direction sud-ouest, mais encore une fois, cette direction est soumise à des variations tout au long de l'année, qui a pour conséquence qu'une éolienne ne peut exploiter le vent le plus fort de manière constante.

- *Un potentiel insuffisant*

Au-delà des nombreux facteurs qui influencent la variabilité du vent, certaines inquiétudes concernent directement le potentiel éolien de base de nos régions. En Belgique, à l'exception du littoral, la vitesse du vent est inférieure à 5,5 m/s, pendant plus de 60 % de l'année (vitesse à 10 m de hauteur) (Architecture et climat, 2013). Alors que les petites éoliennes ne commencent à produire de l'électricité qu'à partir de minimum 4 m/s (2,5 m/s pour les plus performantes), et que la vitesse du vent peut être amoindrie par de nombreux facteurs, la rentabilité du système est parfois discutée.

- *Les contraintes urbanistiques*

L'installation d'une éolienne nécessite un règlement, de façon à être compatible avec toutes les autres affectations de l'espace environnant. Ce règlement est repris dans les contraintes urbanistiques, qui diffèrent si l'on est en présence d'une éolienne de petite puissance (<100 kW), ou une éolienne de grande puissance (> 500 kW) (APERe, 2010). Pour cette dernière catégorie, l'ensemble des obligations à respecter en Wallonie pour leur installation est repris dans le "cadre de référence", récemment mis à jour. Ce cadre reprend par exemple les distances minimales à respecter entre deux parcs éoliens, ou les distances minimales à respecter entre une éolienne et les habitations (trois fois la hauteur des mâts). C'est également lui qui renseigne les zones où l'éolienne est exclue, et les zones pour lesquelles le potentiel venteux est favorable. Ces données sont résumées sous forme cartographique, qui est reprise ici en annexe. Cette carte montre que seulement 3,5 % du territoire wallon est considéré comme une zone favorable à l'installation d'une (ou plusieurs) grande(s) éolienne(s) (Henry, 2013).

Ce cadre de référence est trop restrictif pour l'implantation des petites éoliennes, pour lesquelles la législation est parfois lacunaire. En règle générale, une éolienne de puissance inférieure à 100 kW sera toujours soumise à l'obtention d'un permis d'urbanisme, en vertu du Code wallon de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, du patrimoine et de l'énergie (CWATUPE – Art. 84, §1, 1°) (APERe, 2010). De plus, en vertu des activités, actes et travaux admis dans chacune des zones des 23 plans de secteur de la Région wallonne, définis par le CWATUPE (Art. 24 à 41), certaines zones excluent l'installation d'une petite éolienne. Il s'agit des zones forestières, d'espaces verts, naturels, et de parc. En principe, les zones agricoles l'excluent également, mais une dérogation peut être accordée si l'éolienne alimente l'exploitation ou le logement des exploitants dont l'agriculture est la profession (article 35 du CWATUPE (alinéa 2)). D'une manière générale, l'installation est autorisée dans les zones d'activité économique, et peut l'être sous dérogation dans les zones d'habitat et d'habitat à caractère rural lorsqu'il y a compatibilité avec le voisinage (APERe, 2010).

L'élaboration du permis d'urbanisme requiert, entre autres, une notice d'évaluation des incidences sur l'environnement, pour permettre de vérifier la compatibilité de l'installation avec le voisinage, notamment en ce qui concerne le bruit généré par l'aérogénérateur. Les niveaux de bruit maximum à l'émission admis en zones d'habitat et d'habitat à caractère rural sont de 50 dB(A) en journée et de 40 dB(A) la nuit. Cependant, ces niveaux de bruit maximum ne sont, d'un point de vue de la législation, qu'affectés aux éoliennes d'une puissance de 100 à 500 kW. Les plus petites éoliennes sont soumises aujourd'hui à une législation lacunaire en ce qui concerne l'impact sur l'environnement (APERe, 2010).

Au niveau des impacts sur la biodiversité et particulièrement sur les oiseaux, l'influence des grandes éoliennes est connue, mais pas celle des petites éoliennes. Cela peut être maîtrisé par une réflexion pertinente au niveau de l'implantation. Il faut prendre également en considération les ombres portées par l'éolienne. Quant à l'impact visuel, on ne peut pas le considérer comme une nuisance, puisqu'il reste subjectif à chacun.

- *Coûts*

Le coût d'une éolienne dépend du rotor installé, du type de fondation ou encore du choix du raccord au réseau ou non. Malgré les certificats verts accordés par tranche de 1 MkWh et les différentes aides financières, l'éolienne reste une installation très coûteuse. Il est difficile d'obtenir un prix précis, mais celui-ci va de l'ordre de 15 000 euros pour les éoliennes domestiques, jusqu'à 130 000 euros pour les plus grandes puissances (IBGE, 2009).

Conclusion

- **Quelle échelle de production choisir ?**

L'échelle couramment utilisée pour l'exploitation du potentiel éolien est la grande échelle du parc éolien, ou l'échelle domestique avec des petites éoliennes de quelques kW. L'échelle d'un îlot d'habitation est une échelle intermédiaire, peu exploitée aujourd'hui, mais qui semble pourtant avoir plusieurs avantages, notamment financiers. En effet, le prix non négligeable fait de l'éolienne une technique plus intéressante avec une mutualisation des besoins au sein d'un groupement d'habitations. Elle permet également un avantage en terme d'occupation du sol, vu les distances minimales à respecter entre l'éolienne et les habitations, autant pour laisser un écoulement du vent libre de tout obstacle que pour assurer un niveau de bruit confortable. Cependant, qui dit mutualisation des besoins, dit forcément augmentation de la puissance nécessaire, et donc de la taille de l'éolienne. Alors qu'une grande éolienne permettrait de subvenir aux besoins de tout un îlot d'habitation, et même plus, elle n'est cependant pas envisageable à cette échelle, d'un point de vue de son intégration. Un rapide calcul montre qu'une éolienne de puissance supérieure à 500 kW aurait une production bien supérieure aux besoins d'un îlot d'une cinquantaine d'habitations. L'échelle se situe donc plus du côté des éoliennes de plus faible puissance.

- **Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et en milieu périurbain ?**

Avant d'envisager l'implantation d'une éolienne, deux choses primordiales doivent être vérifiées:

- Consulter des cartes du plan de secteur afin de visualiser les zones, en fonction des contraintes et réglementations d'aménagement du territoire
- Evaluer le potentiel éolien du site (vitesse moyenne du vent, les endroits les plus favorables, la topographie, la direction du vent, les obstacles, etc.)

Seules les zones pour lesquelles le potentiel et la réglementation sont à la fois favorables seront susceptibles d'accueillir une éolienne. Vu ce qui a été dit précédemment, on peut faire les conclusions suivantes.

En milieu urbain, les éoliennes à axe horizontal ne peuvent être utilisées. Outre la densité qui ne permet pas l'espace suffisant, le vent ne sera jamais assez régulier et les turbulences auront un effet très négatif sur la production. L'alternative que sont les éoliennes à axe vertical permet d'installer d'une éolienne sur la seule surface libre des parcelles à savoir le toit, bien que cela soit dangereux si le bâtiment n'est pas prévu à la base pour la soutenir (les éoliennes nécessitent une fondation!). Elles n'ont pas encore fait leur preuve en terme de production d'électricité et sont toujours au stade de recherche et de développement. Il est donc déconseillé, à ce jour, de les installer, et nous ne tiendrons pas compte d'un éventuel potentiel éolien en milieu urbain dans le cadre de ce travail.

En milieu périurbain, on ne peut pas être aussi catégorique. L'éolienne est plutôt adaptée au milieu rural dont les grandes plaines permettent d'avoir accès à un vent fort et constant. Dans le cas de l'îlot périurbain, il se peut que les critères liés à l'implantation de la petite éolienne soient validés, les îlots étant de grandes dimensions, peu denses avec des hauteurs de bâtiment relativement faibles. Au vu de la rugosité qui influence fortement la vitesse du vent, il faudra éviter les terrains avec trop de végétation, ou une densité de bâti trop élevée. Il faudrait réaliser une étude précise du gisement éolien afin de prendre une décision. Cela ne peut être réalisé ici, mais nous évaluerons de manière simplifiée la production électrique permise par une éolienne de petite puissance dans ce milieu.

2.2.2 Les panneaux photovoltaïques

Explication du système

Un panneau, ou module photovoltaïque, est formé de plusieurs cellules, des diodes, formées par deux couches de matériaux semi-conducteurs. Ces deux couches sont dopées - des impuretés y sont insérées afin d'en modifier la conductibilité - pour qu'elles possèdent un surplus de charges positives (type p) ou de charges négatives (type n). L'absorption de l'énergie des photons permet aux électrons de la couche n de s'échapper de leur position, créant ainsi une différence de potentiel au sein de la cellule, captée par deux électrodes (Hegger et al., 2011).

On distingue deux types de cellules photovoltaïques :

- Les cellules cristallines, fabriquées depuis des dizaines d'années, à partir de silicium à l'état brut fondu et découpé. Selon la vitesse de refroidissement de celui-ci, on trouve des cellules monocristallines ou polycristallines.
- Les cellules à couches minces, technologie plus récente, sont obtenues par l'application directe d'une couche de silicium amorphe sur un support. Cela permet une économie de matière et d'énergie de fabrication. Le coût est moindre, mais le rendement est moins élevé.

Une cellule individuelle produit une puissance trop faible pour les applications courantes. Plusieurs cellules sont alors liées les unes aux autres en série, afin d'augmenter le voltage de l'ensemble. Protégées par deux feuilles de plastique ou de verre sur leur surface supérieure et inférieure, elles constituent ainsi un module, ou panneau photovoltaïque. Ils peuvent être de taille variable, mais les dimensions standards varient généralement entre 0,5 et 1,5 m² (Hegger et al., 2011).

Les panneaux peuvent être ou non combinés à un système de stockage. Dans le cas d'un site isolé, le stockage est nécessaire puisque le raccordement au réseau n'est pas possible. Tant que celui-ci est possible, il sera plus intéressant financièrement d'utiliser le réseau comme "stockage" de l'électricité produite non directement consommée.

Critères de performance

Le rendement électrique des cellules photovoltaïques est exprimé comme ceci (Hegger et al., 2011):

$$\text{Rendement} = \frac{\text{énergie solaire transformée en courant}}{\text{énergie solaire reçue}}$$

Celui-ci ne pourra jamais physiquement être maximum. En effet, l'entière des photons heurtant les cellules ne possède pas nécessairement toute l'énergie suffisante à la libération d'un électron. Cette énergie nécessaire, quant à elle, dépend du matériau utilisé. À titre d'information, elle est de 1,1 eV pour le silicium, et de 1,7 eV pour le silicium amorphe (Ngô, 2004). Dans le cas où le photon possède plus que l'énergie nécessaire, celle-ci sera perdue, libérée sous forme de chaleur. Les rendements pour les différents types de cellules sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Matériau	Rendement
Silicium monocristallin	17 %
Silicium polycristallin	15 %
Silicium amorphe	8 %

tab. 4: Rendement des cellules photovoltaïques (source: Hegger et al., 2011)

Ce rendement, lié au matériau de la cellule même, est influencé par la couleur de la cellule. Les couleurs foncées proches du noir favorisent l'absorption de la lumière, mais l'utilisation d'un revêtement antiréfléchissant permet l'utilisation d'autres couleurs.

En pratique, on s'intéressera surtout au rendement de l'installation photovoltaïque, soit le rapport entre l'énergie électrique fournie et l'énergie solaire reçue (De Herde & Massart, 2010). Celui-ci dépend non

seulement du rendement des cellules prises séparément, mais également de leur densité d'occupation du panneau et de la technologie qui les lie. Le rendement dépend également de l'énergie solaire reçue, qui dépend des variations saisonnières (inclinaison des rayons solaires, atténuation des rayons dans l'atmosphère, vent, couverture nuageuse, intempéries, etc.) et de l'implantation du panneau (inclinaison, orientation, albédo du sol, etc.). Enfin, l'onduleur, permettant de convertir le courant continu en courant alternatif, est un dispositif dont le rendement individuel tend également à diminuer la performance de l'ensemble du système, surtout s'il n'est pas dimensionné correctement.

Le rendement d'une installation peut être facilement évalué lorsque l'on connaît la puissance de crête du module, c'est-à-dire la puissance électrique délivrée dans des conditions standards d'ensoleillement (1000 W/ m²) et de température (25°C), donnée par le constructeur. Cela revient, en Belgique, à diviser cette puissance de crête par 1000 W/m² (De Herde & Massart, 2010).

Les freins à l'exploitation du potentiel solaire photovoltaïque

L'énergie solaire est disponible partout. Cependant, de nombreuses contraintes peuvent rendre difficile l'exploitation de ce grand potentiel. Outre les conditions climatiques que nous ne pouvons contrôler, responsables de la variabilité de la source énergétique, d'autres éléments interviennent dans la limitation et les difficultés d'utiliser l'énergie solaire.

- *La variabilité*

La variabilité de l'apport énergétique induit une production électrique non constante au cours de l'année. Parfois supérieure aux besoins, parfois inférieure à ceux-ci, leur courbe de production annuelle approche difficilement celle de la consommation. La solution à ce déphasage est le stockage, qui est la plupart du temps avantageusement effectué sur le réseau de distribution. Dans le cas contraire, lorsqu'il n'y a pas de raccordement au réseau possible, un dispositif de stockage onéreux est alors nécessaire.

- *L'accessibilité à la source*

La production électrique des panneaux pourra être limitée en fonction de l'accessibilité de ceux-ci à l'énergie solaire. La surface disponible pour les panneaux, leur ombrage, leur orientation et leur inclinaison sont des paramètres très influents sur la production de l'installation. Cela est d'autant plus important dans le cas qui nous occupe, puisqu'il s'agit de rénovation. Dès lors, l'exploitation du potentiel solaire dépend fortement du contexte bâti dans lequel il est intégré.

L'inclinaison et l'orientation optimales des panneaux dépendent de la hauteur du soleil et de son azimut, ceux-ci étant différents d'un pays à l'autre. En Belgique, le pourcentage de l'énergie incidente reçue annuellement par une surface, compte tenu de la diminution induite par une inclinaison et/ou une orientation non optimales, est repris dans le tableau ci-dessous.

		Inclinaison par rapport à l'horizontale (°)						
		0	15	25	35	50	70	90
Orientation	est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	Sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Sud	88%	96%	99%	100%	98%	87%	68%
	Sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

tab. 5: Pourcentage de l'énergie solaire reçue par une surface en Belgique (source: EF4, 2013)

Lorsque les panneaux sont orientés au nord-est et au nord-ouest, le pourcentage tombe à 68 % pour une inclinaison de 35°. Il n'est plus que de 62 % pour une orientation nord. On observe donc que l'optimum se situe au Sud, pour une inclinaison de 35°, mais l'énergie reçue reste intéressante pour des orientations entre le sud-est et le sud-ouest, et des inclinaisons comprises entre 15 et 50°. On évitera autant que possible de positionner les panneaux verticalement, ou au nord.

Dans un environnement bâti existant, l'inclinaison et l'orientation dépendent directement des toitures (ou autres surfaces), favorables ou non à l'exploitation du potentiel solaire. Notons qu'il existe cependant plusieurs alternatives. Par exemple, les systèmes orientables, dont l'inclinaison peut varier selon les mois tout au long de l'année, permettent de maximiser la production d'électricité, et de s'adapter à des pentes de toiture inadéquates. Les systèmes mobiles, eux, permettant de suivre le rayonnement solaire pendant la journée, apportent un gain de 25% par rapport à un système fixe (EF4, 2013). L'inconvénient de ces derniers, outre le surcoût, est qu'ils nécessitent un certain encombrement au sol et une fondation importante (impossible sur les toitures). Il existe également des modules semi-transparents, qui permettent d'offrir une alternative pour les bâtiments offrant une bonne surface vitrée au sud. Cela dit, leur performance est d'autant plus réduite que le module est transparent, ce qui laisse place à la discussion.

L'apport électrique des panneaux dépend également de la taille de la surface destinée à les recevoir, et des éventuelles ombres portées sur celle-ci. C'est à ce niveau qu'une différence survient entre le potentiel de l'énergie solaire en milieu urbain et en milieu périurbain. Dans le centre-ville, les îlots sont très denses, et les ombres portées sur les habitations peuvent être très importantes. De plus, les maisons, généralement mitoyennes et sur plusieurs niveaux, disposent d'une surface plus réduite en toiture pour la pose des panneaux, que les habitations constituées d'un ou deux niveaux (majoritairement quatre façades) rencontrées à la périphérie de la ville. On comprend donc instinctivement que le potentiel solaire photovoltaïque sera plus important en milieu périurbain qu'en milieu urbain, compte tenu de la densité bâtie et de la surface disponible à la pose des modules. Néanmoins, le potentiel sera propre à milieu précis, et il nécessite donc d'être évalué pour chaque situation.

- *L'impact sur l'environnement*

Une attention doit être apportée au processus de fabrication des cellules photovoltaïques, car il n'est pas sans impact sur l'environnement. Dans le cas des cellules de silicium, une certaine quantité de verre et de sable de quartz est utilisée. Cette quantité, à production d'énergie comparable, est moindre pour la production de cellules en couche mince, ce qui la rend plus intéressante. Néanmoins, ce type de cellules ne concerne actuellement qu'une faible part du marché (Hegger et al., 2011).

Conclusion

- Quelle échelle de production choisir ?

Le système en lui-même ne possède pas de critères de performance obligeant la décentralisation ou la centralisation de la production à l'échelle de l'îlot. Par contre, la centralisation pourrait être un réel avantage, puisqu'elle permettrait de ne solliciter que les toitures les mieux exposées de l'îlot. Ainsi, la production électrique par mètre carré de surface de panneau sera plus importante, puisqu'ils profiteront du meilleur ensoleillement disponible sur l'îlot. Cela entraîne par conséquent une meilleure rentabilité du système, une économie des matériaux, et une diminution de l'emprise des panneaux sur les toitures.

Notons que cette optimisation des panneaux ne peut être envisageable que dans le cas où chaque habitant de l'îlot y trouve un avantage. Il est évident qu'un habitant ne produira pas d'électricité pour son voisin si il n'y trouve pas également un bénéfice.

- Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et en milieu périurbain ?

A priori, l'exploitation de l'énergie solaire à l'aide de panneaux photovoltaïques est envisageable partout en Belgique. Comme on l'a vu cependant, le potentiel photovoltaïque dépendra de facteurs tels que la densité bâtie et la surface disponible à la pose des panneaux, qui semblent plus favorables en milieu périurbain qu'en milieu urbain. Il dépend également d'autres facteurs comme l'inclinaison et l'orientation des surfaces destinées à recevoir les panneaux, qui eux sont propres à un milieu bâti donné, qu'il soit urbain ou périurbain. L'unique façon de connaître réellement la différence entre les potentiels solaires photovoltaïques urbains et périurbains est de les évaluer précisément.

2.3 Production de chaleur

2.3.1 Les capteurs solaires

Explication du système

Le capteur solaire est constitué principalement d'un absorbeur et d'un fluide caloporteur chargés de capter l'énergie solaire, et d'un système de transport et de stockage (ballon de stockage), permettant le déphasage entre le rayonnement solaire et l'utilisation de la chaleur transformée. On distingue plusieurs types de capteurs:

Types de capteurs	T° de fonctionnement	Application
<i>Absorbeurs nus</i> Pas de coffre isolant, pas de vitrage	30-40 °C Bon rendement uniquement à faible température en raison des fortes déperditions	Chauffage des piscines
<i>Capteurs plans</i> L'absorbeur est isolé dans un coffre et protégé par un vitrage spécial	60-90 °C Les déperditions sont limitées par le coffre et le vitrage	Production d'eau chaude sanitaire et de chauffage
<i>Collecteurs d'air</i> Idem que capteurs plans, mais le fluide caloporteur est remplacé par de l'air	40-50 °C	Chauffage à air des locaux
<i>Capteurs à tubes sous vide</i> L'absorbeur est placé dans un tube en verre, sous vide	70-130 °C Les déperditions par convection dans le capteur sont quasiment totalement évitées	Production d'eau chaude sanitaire et de chauffage (résidentiel ou industriel)

tab. 6: Les types de capteurs solaires thermiques (source: Hegger et al., 2011)

La performance des capteurs à tubes sous vide ne fait cependant pas l'unanimité, et dans des conditions optimales d'exposition solaire, le surcoût engendré n'est pas nécessairement justifié. Nous nous consacrerons donc ici plutôt aux capteurs plans, qui sont couramment utilisés.

La transformation de l'énergie solaire en énergie de chauffage est un processus mettant en scène plusieurs échanges de chaleur, responsables notamment d'un certain pourcentage de pertes thermiques. Le rayonnement solaire incident entre en contact avec le vitrage, pour lequel un coefficient de transmission élevé est souhaité. La part du rayonnement qui n'est pas réfléchi est donc directement transmise à l'absorbeur, tandis que le vitrage rayonne également vers celui-ci. Un effet de serre est alors créé entre le vitrage et l'absorbeur, qui tend à échauffer ce dernier. Il transmettra ainsi sa chaleur au fluide caloporteur (mélange d'eau et de glycol). Des pertes par convection surviennent au contact du capteur avec l'extérieur, et également au sein du capteur lui-même, puisque de l'air est présent entre le vitrage et l'absorbeur. Enfin, bien qu'un coffret isolant englobe généralement le système, des pertes par conduction peuvent persister avec l'extérieur.

Plusieurs capteurs sont ainsi reliés entre eux, en fonction de la production de chaleur nécessaire. Ils sont couplés à un ballon de stockage, où le fluide caloporteur circulant dans les capteurs cède sa chaleur à l'eau destinée au chauffage ou à l'eau chaude sanitaire. L'installation nécessitera généralement une pompe assurant la circulation des fluides, sauf si un mouvement naturel de ceux-ci est possible par le positionnement du ballon de stockage en hauteur par rapport aux capteurs (installation en thermosiphon).

Critères de performance

Le rendement d'un capteur, compte tenu des déperditions thermiques énoncées plus haut, s'exprime comme suit (Hegger et al., 2011):

$$\text{Rendement} = \text{Flux thermique transféré par le fluide} / \text{rayonnement solaire reçu}$$

Puisque le rendement du capteur dépend directement des déperditions thermiques de celui-ci, notamment avec l'extérieur, la différence de température entre l'air extérieur et l'absorbeur influence directement le rendement. Plus celle-ci sera faible, plus le rendement du capteur sera élevé (Hegger et al., 2011). Il vaut donc mieux privilégier une température souhaitée la plus faible possible, pour autant que le risque de légionellose soit évité.

Aux pertes thermiques des capteurs s'ajoutent également les pertes thermiques du circuit de transport et du stockage. Le rendement de l'installation sera fonction également d'un autre facteur: le taux de couverture solaire (%), ou fraction solaire. Il exprime le rapport entre l'apport énergétique des capteurs solaires thermiques, et la demande globale en chaleur du (des) bâtiment(s). Plus ce taux croît, plus le coût de l'installation augmente également, mais, à l'inverse, plus l'efficacité du système diminue. En effet, plus la surface de capteurs augmente, plus le ballon d'eau chaude verra sa température augmenter rapidement. L'énergie solaire, toujours disponible, ne pourra donc plus être exploitée. Le flux thermique transféré sera alors inférieur à ce qu'il aurait pu être, vu le rayonnement solaire incident reçu par le capteur. Avec une augmentation de surface trop importante, on observe donc un faible taux d'utilisation, ce qui tend à diminuer le rendement de l'installation. Cependant, une surface de capteurs minimale doit être installée afin d'assurer une production suffisante et éviter au maximum l'utilisation d'un appoint supplémentaire. Il en résulte donc qu'en terme de surface de capteurs, un équilibre doit être trouvé entre une surface suffisante pour la production (surtout en hiver) et une surface maximale pour garantir un bon rendement (surtout en été) (De Herde & Massart, 2010). En ce qui concerne l'eau chaude sanitaire, on estime que la fraction solaire optimale se situe entre 50 et 60 % de la demande annuelle (Soltherm, 2007).

Le flux thermique finalement transféré pour l'usage revient à la différence entre l'énergie thermique du fluide sortant du capteur, et celle du fluide entrant à nouveau dans celui-ci afin d'être chauffé. La chaleur utilisable, ainsi produite, n'est en général pas destinée à être utilisée directement, c'est pourquoi le système doit permettre le stockage. Le dimensionnement de ce volume de stockage est extrêmement important pour le rendement global, et doit être réalisé en adéquation avec le profil de consommation des occupants et le taux de couverture solaire. En effet, un trop faible volume d'eau entraînera la montée de température trop rapide dans le ballon de stockage et par conséquent une réduction du rendement, et un volume trop important ne permet pas à l'énergie solaire seule de chauffer l'eau. (De Herde & Massart, 2010).

On retiendra donc que le rendement d'un capteur solaire est principalement fonction de:

- la fraction solaire (ou taux de couverture solaire)
- la quantité d'énergie solaire reçue, fonction elle-même de l'implantation des capteurs (orientation et inclinaison) et du moment de la journée, de l'année.
- l'efficacité des nombreux échanges de chaleur
- la température de l'eau souhaitée (la plus faible possible)
- le stockage (dimensionnement et pertes)

Les freins à l'exploitation du potentiel solaire thermique

Les difficultés liées à la pleine exploitation du potentiel solaire thermique sont identiques au cas des panneaux photovoltaïques en ce qui concerne l'accessibilité à la ressource. Nous ajouterons donc ici uniquement les éléments complémentaires.

- *La variabilité*

L'énergie solaire varie selon les saisons, et les apports seront très différents en hiver ou en été. La demande en eau chaude sanitaire est constante tout au long de l'année et trouve donc un intérêt dans le solaire thermique, avec l'utilisation d'un système de stockage. Le cas du chauffage est différent: il est peu sollicité lors des mois plus chauds, alors que la production d'eau chaude est la plus forte. On comprend difficilement l'intérêt des capteurs solaires thermique pour le chauffage, sans la possibilité de stocker la chaleur d'une saison à l'autre. Dans le cadre de ce travail, les capteurs ne seront envisagés que pour la production d'eau chaude sanitaire.

- *L'impact sur l'environnement*

L'exploitation du potentiel solaire thermique n'est pas polluante, mais il convient cependant de considérer également la consommation électrique d'une part des auxiliaires nécessaires à l'installation (à réduire autant que possible), et d'autre part du système d'appoint nécessaire. Les capteurs seront toujours utilisés en combinaison avec un autre système, puisqu'ils ne couvriront pas l'entièreté des besoins (fraction solaire maximum pour une question de rendement) ou parce qu'ils ne serviront qu'au préchauffage de l'eau. L'impact sur l'environnement sera donc plus faible grâce aux capteurs solaires, à condition néanmoins que l'impact énergétique de l'appoint n'anéantisse pas ce bénéfice.

- *L'impact sur la santé*

Les systèmes nécessitant le stockage d'eau chaude favorisent le développement de la légionelle, bactérie dangereuse pour la santé. Celle-ci prolifère lorsque la température de l'eau stagnante varie entre 25 et 45 °C. Les solutions sont d'augmenter périodiquement la température de l'eau de stockage afin de tuer les bactéries, d'avoir recours à un système évitant à l'eau de stagner, ou de stocker l'eau à une température suffisamment élevée (De Herde & Massart, 2010). Dans ce dernier cas cependant, le rendement des capteurs s'en trouvent diminués.

Conclusion

- **Quelle échelle de production choisir ?**

Comme dans le cas du solaire photovoltaïque, on trouve un avantage à centraliser la production de chaleur sur les toitures les mieux exposées de façon à ce que les capteurs soient exploités d'une manière plus efficace et plus rentable. Cependant, ce système requiert la plus petite distance possible entre les capteurs et les points de puisage, de façon à garder les pertes thermiques dans les conduites les plus faibles possible. À première vue, la centralisation à l'échelle de l'îlot ne semble donc pas très judicieuse. Si cette échelle est choisie, il faudra s'assurer que les pertes thermiques induites par le réseau n'effacent pas le bénéfice apporté par la centralisation des capteurs, et que la rentabilité financière du réseau de chaleur ainsi créée est assurée.

Pour la production d'ECS, le quartier de Freiburg (Allemagne) a opté pour une production centralisée, avec un petit réseau de chaleur local, à partir d'énergie solaire. Cependant, ce ne sont pas les capteurs plans utilisés habituellement qui sont mis en place. Le quartier a opté pour des capteurs à tubes sous vide, qui permettent d'atteindre des performances plus élevées (IEA, 2013). Puisque la centralisation implique le partage des frais, l'obstacle du surcoût engendré par ce type de capteurs est surmontable.

- **Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et en milieu périurbain ?**

Tout comme dans le cas des panneaux photovoltaïques, le potentiel solaire thermique dépendra du milieu bâti considéré. Alors que le potentiel maximum est recherché dans le cas du photovoltaïque, le potentiel solaire thermique quant à lui sera limité au taux de couverture (ou fraction solaire, c'est-à-dire le pourcentage de la demande annuelle qui sera couvert par les capteurs) destiné aux capteurs. Ainsi, un milieu bâti plus favorable au potentiel solaire permettra d'utiliser moins de capteurs, à taux de couverture égale. De nouveau, il sera nécessaire d'évaluer précisément le potentiel solaire du milieu afin de connaître la surface de capteurs nécessaire.

2.3.2 Les pompes à chaleur

Explication du système

La pompe à chaleur est un dispositif qui permet d'augmenter la température de son fluide, initialement à une température correspondant à la température de la source dite « froide », à une température suffisamment élevée, de façon à être transmise à la source dite « chaude ». Il s'agit d'un cycle frigorifique constitué de 4 étapes. Le fluide caloporteur rentre en contact avec la source froide au travers d'un échange de chaleur situé dans l'évaporateur, ce qui a pour effet d'élever sa température et de le faire s'évaporer.

Lorsque le fluide, à l'état de vapeur, entre dans le compresseur, alimenté par de l'énergie électrique, il voit croître sa température sous l'augmentation de la pression. Cela lui permet, en passant ensuite dans un condenseur, de céder ses calories à la source chaude. Il en ressort à l'état liquide puis, après passage dans le détendeur, le fluide est à nouveau sous basse pression ; un nouveau cycle recommence. Ce cycle thermodynamique est réversible, et il peut dès lors répondre à la demande en froid du bâtiment en devenant un système de climatisation (De Herde & Massart, 2010).

La source « chaude » peut être un circuit de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire, ou encore l'air intérieur. Les pompes à chaleur peuvent être utilisées seules, ou en combinaison avec un autre système. La source « froide » peut, elle aussi, être sous la forme liquide ou gazeuse, en fonction du type de pompe à chaleur installée.

Dans le cas de la PAC aérothermique, la source froide est l'air extérieur, ou l'air d'un local extérieur au volume protégé. La PAC hydrothermique utilise l'eau de surface d'une masse d'eau suffisante comme source froide, pour autant que le processus n'affecte pas l'écosystème du plan d'eau ou du cours d'eau (MATRIciel, 2010). Enfin, on distingue deux systèmes de captage de chaleur relié à la PAC géothermiques (VITO Team geo et al., 2012) :

- *Système fermé avec sondes*

À une profondeur suffisante pour ne pas être influencé par les variations saisonnières, le mélange d'eau et de glycol circule dans un échangeur de chaleur soit vertical (entre 25 et 150 m de profondeur), soit horizontal (environ 1m de profondeur minimum). Le choix entre collecteurs horizontaux et verticaux dépend directement de la puissance à fournir et de l'espace disponible. Les premiers ont une production de l'ordre de 16 à 24 W par m², alors que les seconds permettent d'atteindre des puissances de 40 à 60 W par m de profondeur, en fonction de la constitution géologique du sol. En général, on considère que les collecteurs horizontaux nécessitent une surface de captage importante qui varie entre 1,5 et 3 fois la surface de chauffe (Filloux, 2010). Les sondes verticales occupent une faible surface au sol, mais nécessitent plusieurs forages.

- *Système ouvert avec pompage de l'eau*

Ces systèmes utilisent les nappes phréatiques comme source d'extraction de chaleur. L'eau, pompée d'une couche aquifère suffisamment perméable, cède ses calories à la pompe à chaleur avant d'être réinjectée, refroidie, dans cette même nappe. La profondeur du pompage varie en 20 m et 100 m.

Le problème des systèmes fermés est que l'on puise continuellement les calories disponibles dans le sol ce qui fatalement tend à faire baisser sa température jusqu'à, dans le cas extrême, le rendre inexploitable. En général, la température du sol à proximité de la sonde baisse d'une dizaine de degrés à la fin de la période de chauffe puis remonte à sa température originelle pour la période suivante, après une recharge naturelle (VITO Team geo et al., 2012). Cet inconvénient est résolu avec les systèmes ouverts, la nappe souterraine constituant un réservoir à température constante. De plus, ces systèmes ont l'avantage d'être moins chers à l'installation (pas de circuits), et d'utiliser l'eau de la nappe comme fluide caloporteur, éliminant les risques de corrosion. Cependant, il est aujourd'hui très difficile d'un point de vue administratif d'utiliser ces systèmes ouverts. Les risques et les impacts du forage et de l'exploitation de la nappe sont aujourd'hui au stade de la recherche, et l'obtention de l'autorisation d'exploitation relève du défi (Dassargues, 2013).

Critères de performance

La performance de la pompe à chaleur est exprimée par le coefficient COP (Coefficient Of Performance), défini comme « le rapport entre la quantité d'énergie transférée par la PAC (chaleur restituée dans le bâtiment) et l'énergie consommée pour réaliser ce transfert (énergie utilisée pour faire fonctionner le compresseur et celle consommée par les auxiliaires) » (SPW-DGO4, 2013). Le COP est donc à maximiser, et démontre l'importance de l'origine du courant électrique alimentant la pompe.

Il importe de préciser que la pompe à chaleur sera d'autant plus efficace que la différence de température entre la source froide et la source chaude est faible (Hegger et al., 2011). Or, la température du sol et de la

nappe, par exemple, sont généralement équivalentes à la température moyenne annuelle du lieu, c'est-à-dire 12-13 °C (Dassargues, 2013). Pour que la différence de température avec la source soit la plus faible possible, on comprend donc l'intérêt qu'il y a à combiner la PAC à des émetteurs à faible température, comme le chauffage par le sol.

Le COP saisonnier, ou SPF (Seasonal Performance Factor), est un facteur qui exprime la performance de la pompe à chaleur sur toute la saison de chauffe, tenant compte ainsi des caractéristiques météorologiques, de l'installation, du dimensionnement, etc. Il est plus faible que le COP de la PAC en elle-même, et vaut en moyenne entre 2,8 et 3,5 pour les PAC aérothermiques, et entre 3 et 4,5 pour les PAC hydrothermiques et géothermiques.

Les freins à l'exploitation des potentiels

- *Accessibilité*

La pompe à chaleur aérothermique possède l'avantage de pouvoir capter facilement la chaleur de la source froide, disponible partout. En ce qui concerne la pompe à chaleur géothermique, l'exploitation de la chaleur naturelle du sol est disponible partout, ne dépendant pas de l'historique géologique du sol. L'accessibilité à la ressource est dès lors limitée par la densité de la surface bâtie, et la possibilité d'accéder à un sol libre de tout impétrant (MATRIciel, 2010). La pompe à chaleur hydrothermique exploite, elle, une source qui n'est pas disponible partout. Il faudra donc faire appel à un relevé des cours d'eau et canaux susceptibles d'être exploités, et se trouver à proximité directe de l'un d'eux.

- *Température de la source froide*

La pompe à chaleur nécessite que la température de la source froide soit tout de même à une température suffisamment élevée. La température moyenne du sol de 12 à 13°C suffit généralement, et reste relativement constante. Dans le cas de l'exploitation hydrothermique, la température des eaux de surface est très variable en fonction de l'énergie solaire. En été, elle est trop chaude et peut difficilement être exploitée pour des demandes en froid éventuel. En hiver à l'inverse, l'eau est trop froide. En Wallonie plus particulièrement, les cours d'eau sont toujours trop froids. La Meuse en hiver atteint des températures de 2 ou 3°C, et il faudrait se situer près de Tihange si on voulait des températures plus élevées ! L'hydrothermie n'est donc pas une solution envisageable (Dassargues, 2013).

- *Température de la source chaude (émetteur)*

La performance de la PAC dépend du régime de température de l'émetteur. Ce système est bien adapté au chauffage des habitations fonctionnant à de faibles températures d'émission comme c'est le cas du chauffage par le sol (30-45°C). C'est pourquoi la pompe à chaleur est un système à n'utiliser que dans le cadre d'habitation basse énergie, très basse énergie ou passive (De Herde & Massart, 2010). Pour cette raison également, il faut être prudent en ce qui concerne l'utilisation de la PAC pour l'eau chaude sanitaire, afin d'éviter tout risque de développement de la légionellose. La température de la source chaude ne devra donc pas descendre trop bas, ce qui tendra cependant à diminuer le rendement du système.

- *Gestion du réservoir de chaleur*

En cas d'utilisation de la PAC géothermique avec un échangeur vertical (sondes géothermiques), le risque de rendre le sol inexploitable par un pompage excessif de l'énergie du sol existe. Dans le cas d'une conception passive, les besoins en chaleur sont réduits et on peut éviter ce phénomène. Dans le cadre de la rénovation cependant, les besoins de chaleur peuvent rester trop importants par rapport à la régénération du sol (MATRIciel, 2010).

- *Impact sur l'environnement*

La PAC est un système avec un faible impact sur l'environnement du point de vue de l'émission de CO₂ mais nécessite que l'on tienne compte néanmoins de l'alimentation électrique nécessaire à son utilisation. La PAC

géothermique, si elle est correctement utilisée, n'a pas d'impact supplémentaire sur l'environnement. En ce qui concerne la PAC hydrothermique, il faut s'assurer que son exploitation ne sera d'aucune nuisance pour la viabilité et l'écosystème du cours d'eau. Enfin, pour la PAC aérothermique, on constate des nuisances sonores parfois importantes.

- *Coût*

La PAC constitue un investissement de départ plus important qu'un système de production de chaleur traditionnel avec une chaudière. Dès lors, il est très important de s'assurer que son dimensionnement et son rendement permettent la pleine rentabilité de celle-ci.

Conclusion

- Quelle échelle de production choisir ?

La pompe à chaleur n'est destinée qu'à un usage décentralisé à l'échelle de chaque logement. En effet, on a vu que la performance est d'autant plus grande que la température de la source chaude est proche de celle de la source froide. Dans un système centralisé au niveau de l'îlot, il faudrait augmenter la température de la source chaude pour compenser les pertes de chaleur dues à la centralisation de la PAC par rapport aux émetteurs situés dans chaque habitation, ainsi que les pertes au niveau des échangeurs nécessaires. Dès lors, l'écart se creuse entre la température des sources froides et chaudes. L'efficacité du système est donc réduite, ce qui n'a pas d'intérêt. La conséquence de cette nécessité de régime de basse température rend donc la centralisation inintéressante (MATRIciel, 2010).

Cependant, dans le cas de la PAC géothermique, on peut concevoir que la surface des collecteurs horizontaux ou les sondes verticales servent à plusieurs habitations simultanément, si cela est intéressant financièrement. Ainsi, la source froide est centralisée, et alimente les PAC décentralisées, situées au niveau de chaque habitation. Attention toutefois dans ce cas à garantir la pérennité de la source avec une bonne gestion du pompage de la chaleur du sol (MATRIciel, 2010).

- Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et en milieu périurbain ?

C'est au niveau de l'accessibilité à la source froide qu'il existe une distinction entre le milieu urbain et le milieu périurbain. On élimine directement la PAC hydrothermique puisqu'on a vu que les cours d'eau de Wallonie ne le permettent pas. En ce qui concerne la PAC aérothermique, elle est à priori utilisable dans les deux cas, mais nécessite cependant un jardin, une cour où un espace extérieur suffisant orienté vers l'intérieur de l'îlot pour y installer l'unité extérieure.

Enfin, la PAC géothermique, semble difficilement envisageable en milieu urbain. On a vu qu'elle nécessitait un espace au sol suffisant libre de tout impétrant afin de capter la puissance nécessaire. Si on se souvient de la photo aérienne de l'îlot de Vivegnis, l'îlot, très dense, ne possède qu'une infime partie non bâtie en coeur d'îlot, inexploitable.

2.3.4 La géothermie basse température

Explication du système

On a vu qu'une distinction doit être faite entre la géothermie qui exploite l'eau des couches aquifères réchauffée par des processus géothermiques, et la géothermie exploitant l'inertie du sol, réchauffé par l'énergie solaire, grâce à des pompes à chaleur. C'est le premier cas qui nous occupe ici.

La chaleur accumulée dans la croûte terrestre se propage et chauffe les eaux souterraines. La détermination du flux de chaleur géothermique Q disponible pour l'exploitation peut être réalisée au moyen de mesures de température dans les forages. Son expression est la suivante (VITO Team geo et al., 2012) :

$$Q \text{ (W/m}^2\text{)} = k \text{ (W/m.K)} * \Delta T \text{ (K/m)}$$

Où k , la conductibilité thermique de la roche et ΔT , le gradient de température sont des fonctions de la structure du sous-sol et donc de l'histoire géologique du site. Cependant, l'hypothèse d'un gradient thermique linéaire peut être faite et on considère, en Belgique, que la température du sol augmente de 30°C tous les kilomètres. On estime alors que le flux de chaleur géothermique, en Belgique, est en moyenne de 0,055 W/m². En général, les forages pour l'exploitation de la géothermie « basse température » ont une profondeur de minimum un kilomètre (VITO Team geo, 2012).

Le système d'exploitation de ce flux de chaleur traditionnel, et utilisé en Belgique, est le "doublet géothermique". Celui-ci est constitué d'un puits d'exploitation dans lequel l'eau chaude est pompée, d'un échangeur thermique, et d'un puits de réinjection situé à une certaine distance du réservoir de production pour éviter de le refroidir (VITO Team geo et al., 2012).

Critères de performance

La production thermique du système et donc la puissance thermique fournie par la géothermie W_{th} (Watt) est calculée comme suit (VITO Team geo et al., 2012):

$$W_{th} = q * \rho * c_v * \Delta T$$

La puissance dépend donc de caractéristiques intrinsèques à l'eau de la source présente dans la couche aquifère à savoir sa densité ρ (kg/m³) et sa capacité calorifique c_v (J/kg.°C), ainsi que son débit q (m³/s). Pour atteindre une puissance nécessaire, le débit recherché est en général supérieur à 100 m³/h (VITO Team geo et al., 2012). De plus, on voit que la puissance augmente avec la différence de température du doublet, entre le puits de production et le puits d'injection. On comprend ici la nécessité que le puits d'injection soit relativement éloigné du puits de production, de façon à assurer la température élevée de la source.

Ainsi, la puissance finalement fournie par le doublet dépend essentiellement de la puissance fournie par la source, par conséquent de la profondeur du forage et des caractéristiques de la nappe, ainsi que de la performance de l'échangeur de chaleur chargé de transférer l'énergie thermique de la boucle géothermique au réseau de chaleur, par exemple.

La performance globale du doublet géothermique est exprimée par le COP (Coefficient Of Performance), qui tient compte de la puissance nécessaire à la pompe pour extraire l'eau de la source (VITO Team geo et al., 2012):

$$\text{COP} = \text{Puissance fournie (MW}_{th}) / \text{Puissance nécessaire de la pompe (MW}_{\text{elec}})$$

On retiendra donc que la performance du doublet augmente lorsque l'écart entre la température de production et de retour d'eau augmente, et lorsque le débit de la nappe augmente (ce qui a pour effet de diminuer la puissance nécessaire au pompage).

Les freins à l'exploitation du potentiel géothermique

La géothermie présente un avantage indiscutable qui est sa régularité (Castello, 2004). L'utilisation de la géothermie permet de s'affranchir des irrégularités engendrées par la dépendance au climat des énergies solaires et éoliennes. Elle est uniquement dépendante des caractéristiques intrinsèques du sous-sol qui, une fois étudiées, permettent une exploitation régulière de la ressource, constante si la ressource est bien gérée, et sans stockage encombrant puisque celui-ci se trouve dans le sol.

Certains éléments limitent cependant l'exploitation de ce grand potentiel:

- *L'accessibilité*

La géothermie est une énergie que l'on exploite localement. Qu'elle soit utilisée à une échelle urbaine ou une à échelle résidentielle, elle doit être consommée sur place (Castello, 2004). Or, les potentiels géothermiques ont une répartition inégale sur le territoire. Cela implique qu'un gisement géothermique de qualité (couche aquifère suffisamment perméable, critères de température et de débit adéquat, etc.) n'est pas toujours

présent sous un site désireux d'exploiter ce type de géothermie. La géothermie profonde n'est donc pas une énergie renouvelable accessible par tous, car elle est fonction de l'endroit géographique où l'on se trouve.

Lorsque l'on désire profiter d'une température de la source de 40°C ou plus, par exemple dans le cas de l'alimentation d'un réseau de chaleur urbain, les sites potentiels d'exploitation sont limités. En Wallonie, le sous-sol est en grande partie constitué de roches peu perméables, empêchant l'utilisation de la géothermie profonde puisqu'elle nécessite des nappes aquifères suffisamment perméables. On ne trouve ce type de réservoirs, en Wallonie, qu'à Mons, dans la province du Hainaut. D'autres réservoirs adéquats se situent dans le nord-est de la Belgique (VITO team geo et al., 2012).

Il faut rester prudent toutefois par rapport aux incertitudes des données géologiques, et l'impossibilité de connaître exactement la situation des réservoirs géothermiques. Dans le cas de la ville de Mons, le potentiel géothermique dans la couche calcaire perméable a été découvert par hasard au début du siècle dernier dans le cadre de travaux de creusement de galeries souterraines. Un forage de 2500 m de profondeur en 1972, à Saint-Ghislain, a permis de confirmer l'existence d'une source de 73°C disponible pour l'exploitation géothermique. En 1981, un forage de 1500m de profondeur est réalisé dans le village de Ghlin et prouve que le réservoir géothermique s'étend vers l'est (APERe, 2007).

Aujourd'hui, la Wallonie réfléchit à la possibilité d'exploiter plus amplement la géothermie en mettant en place une cartographie du potentiel géothermique de la Wallonie et trois projets pilotes dans le but de valider cette carte. La carte ci-dessous n'est en rien définitive et a été publiée en 2011, sans aucune certitude puisque les forages ne sont pas encore réalisés.

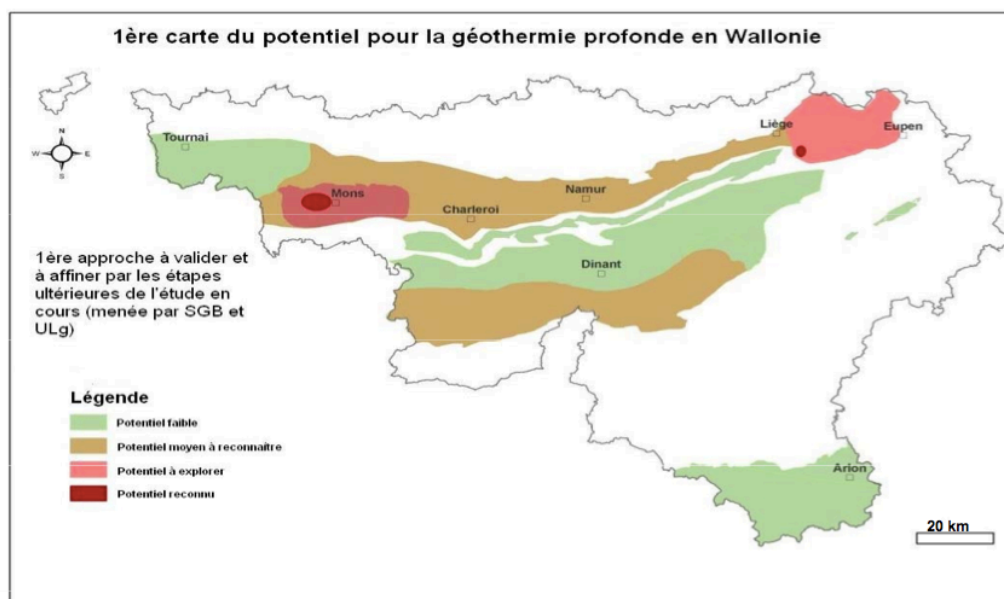


fig. 8: Potentiel pour la géothermie profonde en Wallonie – étude menée par la SGB et l'ULg (source: Nollet, 2011)

- Température de la source chaude (émetteur)

La géothermie profonde permet d'extraire de l'eau à une température suffisamment chaude pour permettre la production de chauffage du bâtiment, peu importe le type d'émetteur mis en place, et pour produire de l'eau chaude sanitaire. C'est le cas lorsque la source géothermale se trouve à proximité directe de son application. Lorsque le doublet géothermique est relié à un réseau de chaleur, l'eau pompée aux environs des 70°C voit sa température diminuer le long du réseau et ne suffira donc pas à alimenter des chaudières classiques dont les températures de régime avoisinent les 70/90°C. Si l'on veut tirer le meilleur parti de la géothermie, il importe donc que les émetteurs soient pensés en conséquence, et fonctionnent à des moyennes et basses températures (APERe, 2012a). Les réseaux de chaleur exploitant la géothermie sont

généralement des dispositifs “en cascade”, dans lesquels les besoins de chaleur sont répartis de façon décroissante le long du circuit.

- *Gestion du réservoir de chaleur*

La géothermie est une énergie renouvelable sous certaines conditions. La technique du doublet géothermique permet de réinjecter l'eau extraite du sol dans le même réservoir de façon à assurer que cela soit une énergie renouvelable. Toutefois, cette eau a été refroidie et pour un doublet efficace, la différence de température entre l'eau prélevée puis réinjectée est très importante. Il y a donc lieu de s'assurer que la distance entre les deux puits soit suffisante de façon à n'engendrer aucune baisse de la température de la ressource pendant la durée de vie de l'installation. Notons que si l'espace en surface du sol est limité, on peut procéder à des forages en diagonale de façon à garantir la distance entre les deux puits. (Castello, 2004).

- *Impact sur l'environnement*

L'énergie géothermique, par sa très faible émission de CO₂ nécessaire à son exploitation, est une énergie qui n'a pas de répercussion sur la dégradation du climat, à condition évidemment d'avoir un COP satisfaisant (Castello, 2004). Par contre, l'exploitation d'un aquifère n'est pas sans risque d'impact sur l'environnement: rabattement de nappe trop important, interactions avec des captages voisins, pollution des aquifères, etc. (MATRIciel, 2010).

- *Manque de données*

Le manque d'informations sur la constitution des couches géologiques de notre sous-sol est également un frein au développement plus ample de l'activité géothermique. Des forages sont nécessaires, mais les résultats obtenus restent aléatoires (Filloux, 2010). Ces incertitudes sur la géologie locale pourraient avoir des conséquences environnementales non prévues, engendrer des surcoûts, ou mettre en péril l'efficacité de toute une installation.

- *Coût*

Terrassements, forages, études préalables,... L'installation d'un projet géothermique demande un coût d'investissement énorme, sans pourtant avoir l'assurance d'une exploitation efficace, vu la difficulté de connaître toutes les données nécessaires relatives au sous-sol ! Bien que le coût d'exploitation soit faible, l'investissement de départ reste un frein à son développement.

Conclusion

- **Quelle échelle de production choisir ?**

D'une manière générale, la géothermie profonde n'est envisageable que dans le cas d'une centralisation de la production de chaleur. C'est d'ailleurs cette centralisation qui permet d'exploiter la géothermie, puisqu'elle est doit être implantée à l'endroit le plus favorable à son exploitation. De plus, le coût important de l'investissement de départ de l'installation nécessite un partage des coûts et un pluriraccordement aux réseaux.

Cependant, la géothermie “basse énergie” ne peut être envisagée dans le cas de l'îlot résidentiel qui nous occupe. Vu le lourd investissement de départ de l'installation de géothermie profonde, la question de la viabilité du réseau se pose. En effet, le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de l'Ouest (France), estime le montant de l'investissement aux environs de 10 millions d'euros, ce qui nécessiterait un minimum de 5000 raccordements de logements-équivalents (CETE de l'Ouest, 2013). Au niveau de la Belgique, le nouveau projet géothermique à Mons nécessite un investissement de 6 millions d'euros, comprenant les études préalables, le forage, la centrale de chauffe et le réseau de chaleur (APERe, 2012a). Vu l'engouement actuel pour la géothermie profonde, les industries ne tarderont pas à développer techniques et matériels afin de réduire les coûts de l'installation. Mais à ce jour, cette technique n'est pas rentable à l'échelle d'un îlot. Elle

doit être pensée pour un réseau urbain à plus grande échelle, avec des besoins de chaleur plus importants et avec un taux de raccordement plus élevé. Plusieurs îlots peuvent alors s'y raccorder.

- Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et en milieu périurbain ?

Dans le cas de la géothermie profonde, c'est d'abord la situation géographique par rapport au gisement géothermique qui importe. Ensuite, puisque son exploitation est généralement liée à un réseau de chaleur, on comprend qu'il sera certainement plus pertinent de l'exploiter en milieu urbain avec une plus grande densité bâtie, d'un point de vue de la rentabilité financière du réseau.

2.3.4 Le bois énergie

Explication du système

Il existe différentes façons d'utiliser le bois-énergie. On retrouve, avec les rendements les plus faibles, les foyers ouverts dont les pertes importantes limitent fortement la performance de chauffage de ces systèmes. Ce rendement peut être amélioré avec les foyers fermés, mais il est encore plus intéressant dans le cas des poêles. Cependant, ces systèmes ne sont adaptés qu'à des puissances relativement faibles, et sont généralement décentralisés dans chaque pièce du bâtiment. On trouve, pour les puissances plus importantes, les chaudières bois, dont le fonctionnement est identique aux chaudières à énergie fossile. Elles permettent de couvrir une large gamme de puissance et de produire simultanément chauffage et eau chaude sanitaire (Filloux, 2010).

Le bois-énergie fournit, comme le gaz, le pétrole et le charbon, de la chaleur par réaction chimique lors de la combustion. Le combustible, contenant principalement des hydrocarbures (combinaisons multiples de carbone et d'hydrogène) réagit avec l'oxygène de l'air pour former du gaz carbonique et de l'eau (sous forme de vapeur étant donné la température), avec un dégagement de chaleur (réaction exothermique). La quantité d'air nécessaire doit impérativement être respectée. Dans le cas contraire, la combustion sera incomplète et il en résultera des produits imbrûlés, comme du monoxyde de carbone, très dangereux pour la santé. Notons également que l'air permettant la réaction comporte d'autres éléments, notamment de l'azote qui risque, lors de la combustion, de se transformer en oxydes d'azote, éliminés également dans les fumées et responsables en partie des pluies acides. En fonction de la nature du combustible, d'autres éléments encore pourront se retrouver sous forme d'éléments nocifs dans les fumées (Architecture et Climat, 2013).

L'agent énergétique est un combustible solide, généralement le bois, sous forme : de bûches (après sciage et fendage) ; de bois déchiqueté appelé également plaquettes (après déchiquetage) ; ou de pellets (pressage à haute densité de farine de bois) (Hegger et al, 2011). On trouve également des céréales en tant que combustible, mais cette filière est encore peu développée et, étant donné les problèmes éthiques que cela soulève, nous n'en parlerons pas ici.



fig. 9: Plaquettes (gauche) – Pellets (centre) – Bûches (droite)⁷

⁷ Bois déchiqueté: <http://www.build-trotters.com> Pellets: <http://www.ehi.eu> Bûches: <http://www.combustiblesparis.com>

Les grandes caractéristiques des combustibles cités ci-dessus sont reprises dans le tableau suivant :

	Bûches	Plaquettes	Pellets
Avantages	Prix attractif	Automatisation de l'installation, manutention aisée, homogénéité	Automatisation de l'installation, combustion très forte, usage facile car l'espace de stockage nécessaire est plus petit
Inconvénients	Très hétérogène, place suffisante de stockage et séchage, manutention importante	Demande de volume de stockage très élevé	Prix
Humidité	Variable avec le temps de séchage: 50 % pour le bois vert 20 % pour le bois à l'abri pendant 2ans	Comme pour les bûches (de 20 à 50 %)	Très faible (max 12 %)
PCI⁸ (varie avec l'humidité)	De 2100 à 3900 kWh/tonnes	Le PCI des plaquettes vient de celui du bois d'origine	De l'ordre de 4600 kWh/tonnes
Prix	De l'ordre de 20 à 40 € la stère ⁹ , en fonction de son taux de séchage. Il faut environ 6,5 stères pour produire 10.000 kWh, ce qui revient à 130-260 euros.	Le prix dépend de l'origine du bois. Il est de l'ordre de 16 à 22 € le map ¹⁰ lorsqu'il s'agit de sous produit de l'industrie du bois. Il faut environ 10 map pour produire 10.000 kWh, ce qui revient à 160-220 euros.	De l'ordre de 150 à 250 € la tonne, mais varie au cas par cas. Il faut environ 2000 kg de pellets pour produire 10.000 kWh, ce qui revient à 300-500 euros.

tab. 7: Les combustibles bois et leurs caractéristiques (source: Crehay & Marchal, 2004)

Les bûches sont utilisées très fréquemment pour les chauffages domestiques, car elles sont moins chères que les combustibles fossiles. Cependant, elles ne permettent pas d'automatiser la chaudière, ce qui ne les positionne pas comme combustible préférentiel pour les chauffages collectifs de plus grandes puissances.

Les plaquettes représentent les sous-produits de l'exploitation, des bois de rebut ou encore des déchets provenant des industries. Elles peuvent aussi provenir de cultures énergétiques, mais leur valorisation est plus intéressante dans le premier cas. Bien que les plaquettes nécessitent une transformation supplémentaire (le déchiquetage), elles présentent l'avantage par rapport au bois de pouvoir automatiser l'alimentation de la chaudière depuis le transport. Elles sont en général moins chères que les bûches, mais peuvent difficilement convenir à de plus petites installations étant donné le volume très important de stockage nécessaire.

Enfin les pellets sont des sciures de bois, ou des particules de très petite dimension, qui sont séchées et pressées en un matériau dense et cohérent. Le grand avantage des pellets est leur contenu énergétique par unité de volume. Il résulte d'une part de la compression qui augmente la quantité de matière par unité de volume, et d'autre part du faible taux d'humidité (environ 12 %), dû au séchage préalable au pressage. Ils sont cependant le combustible bois le plus cher.

⁸ Le PCI est le pouvoir calorifique inférieur du combustible, qui ne tient compte que de la chaleur sensible dégagée de la combustion, c'est-à-dire celle que l'on récupère directement. Il se distingue du pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui comprend toute la chaleur dégagée par la combustion, y compris celle de l'eau qui est finalement perdue (seule la chaudière à condensation permet de récupérer cette chaleur).

⁹ 1 stère est un empilement de bûches dans un volume de 1m x 1m x 1m, dont le remplissage est fonction de la dimension des bûches utilisées. 1 mètre cube de bois plein = 1,6 stère. La masse volumique varie en fonction de l'essence, entre 500 et 1000 kg/m³.

¹⁰ : Le passage du bois plein au bois déchiqueté se fait avec une augmentation du volume. Un mètre cube de bois plein (1,6 stère) donnera lieu à 2,5 mètres cubes de bois déchiqueté plus de l'air, ce qu'on appelle 2,5 map.

Les chaudières bois trouvent leur application autant dans les maisons individuelles, que dans les réseaux de chaleur pour logements collectifs ou entreprises, aussi bien pour le chauffage que pour l'eau chaude sanitaire. Lorsqu'elles sont alimentées par des bûches ou des plaquettes, les chaudières bois possèdent un temps de réponse relativement lent (un petit peu plus rapide pour les pellets). Elles doivent donc être couplées à un ballon tampon, qui a l'avantage d'atténuer les variations de demande de chaleur et de permettre un rendement plus élevé de la chaudière (De Herde & Massart, 2010). Lorsque l'on installe un système d'appoint, comme en construction passive, l'inertie des chaudières est un inconvénient et on utilisera plutôt les poêles à pellets qui ont une réponse plus rapide (MATRIciel, 2010).

Critères de performance

Les conditions de performance dépendent fortement des caractéristiques du combustible. Comme on l'a vu, le PCI du bois-énergie varie avec le taux d'humidité. Les conditions de stockage sont donc primordiales pour la performance de l'installation.

Au niveau de l'installation même, les chaudières doivent fonctionner à leur puissance nominale le plus de temps possible. Si le régime de fonctionnement n'est pas celui pour lequel elles ont été dimensionnées, les conséquences sont:

- En sous-régime: le rendement de l'installation chute fortement. Notons également que le surdimensionnement est préjudiciable non seulement en terme de coûts d'investissements, mais également en terme de contraintes d'implantations qui sont déjà très importantes en ce qui concerne les chaudières bois (Filloux, 2010).
- En sur-régime: La durée de vie de l'installation est réduite considérablement (Crehay & Marchal, 2004).

Pour les plus grandes installations, comme dans le cas d'une chaufferie collective, la chaudière bois est généralement équipée d'une seconde chaudière alimentée par une autre énergie, de façon à couvrir la demande de chaleur pendant les phases d'entretien. Elle permet également de compléter la courbe de production, afin que la chaudière bois fonctionne le plus constamment possible à sa puissance nominale (Filloux, 2010).

Les freins à l'exploitation du potentiel bois combustible

- *L'accessibilité*

Le bois est la seule énergie renouvelable qu'il faut importer. Cela n'est plus vrai lorsque l'on profite de chaleur produite par des industries brûlant des sous-produits du bois, comme les menuiseries. À condition de se trouver à proximité directe de la source de chaleur (la chaleur ne peut être transportée sur une grande distance), celle-ci peut alimenter un réseau de chaleur urbain. Dans le cas d'une production individuelle à l'échelle de l'habitation, il s'agira généralement de bois-énergie à importer. On estime en général qu'au-delà de 50 kilomètres, le bois importé perd considérablement de sa valeur énergétique et environnementale, rendant son utilisation discutable (Filloux, 2010).

- *Le stockage*

Le stockage du combustible demande un volume important, plus important que dans le cas de l'énergie fossile. Cela vient de la charge calorifique du bois, qui est largement inférieure à celle du pétrole, notamment. En effet, le bois contient jusqu'à 10 fois moins d'énergie que le fioul pour un même volume. Cela implique qu'un important système de stockage est nécessaire, ainsi qu'une fréquence de livraison élevée.

Agent énergétique	Unité (volume)	Charge calorifique (kWh)
Pétrole	1 m ³ (1000 l)	10 000
Bûches	1 m ³ (1 mètre cube apparent = 1stère)	1700
Plaquettes	1 m ³ (1 mètre cube apparent)	800
Pellets	1 m ³ (1 mètre cube apparent)	3200

tab. 8: Charge calorifique des combustibles bois (source: Hegger et al., 2011)

Pour rappel, la diminution du PCI des plaquettes par rapport aux bûches vient du fait qu'un mètre cube de bois plein équivaut à 2,5 mètres cubes de plaquettes. Le PCI des pellets vient de son pressage et de son faible taux d'humidité.

Au-delà de l'espace nécessaire, les conditions de stockage ont une très grande importance, puisqu'elles peuvent avoir des répercussions sur l'humidité du bois. Le PCI du bois diminue plus ou moins linéairement lorsque la quantité d'eau contenue dans le bois augmente. Notons que le séchage d'un bois très humide demande de l'énergie, et diminue donc la valeur énergétique finale du bois. Un bois avec un taux d'humidité relative de 50 % présente un PCI de l'ordre de 7,7 MJ/kg, alors qu'un bois anhydre pourrait avoir un PCI de 18,4 MJ/kg, soit plus du double (Crehay & Marchal, 2004).

- *Émissions nocives*

L'humidité possède également un impact néfaste sur le procédé de combustion. L'eau présente en surplus diminuera d'abord significativement la température de la chambre de combustion en utilisant de l'énergie pour s'évaporer. Ensuite, elle augmentera fortement le volume des gaz ce qui entraînera leur augmentation de vitesse de passage, empêchant ainsi tous les gaz combustibles de réagir avec l'oxygène. Il en ressort une combustion incomplète qui, comme il a été expliqué avant, produit du monoxyde de carbone (Crehay & Marchal, 2004).

Comme toutes combustions, le bois-énergie émet des polluants. Un moyen de les diminuer est de dimensionner correctement la chaudière afin de diminuer la fréquence de démarrage, plus émettrice de particules polluantes. Bien sûr, l'idéal est de ne pas avoir recours à la combustion du tout. Il existe cependant des filtres permettant l'épuration des fumées avant qu'elles ne s'enfuient dans l'atmosphère. Ils sont relativement coûteux, ce qui les rend accessibles aux plus grandes installations industrielles seulement (Crehay & Marchal, 2004). D'un point de vue environnemental, ces filtres s'imposent même si leur efficacité n'atteint pas 100 %.

Notons que l'évacuation des gaz de combustion est elle-même un inconvénient, même sans particules nocives. Afin d'assurer leur extraction, la dépression est maintenue à l'aide de ventilateurs. La présence de la cheminée et des fumées à proximité des habitations représente une gêne de confort importante pour celles-ci. La gêne est moindre lorsque la chaufferie est collective, puisqu'il n'y a plus qu'une cheminée et qu'elle peut être placée à l'endroit le moins préjudiciable.

- *Pérennité de la ressource*

La biomasse est une énergie renouvelable sous la condition que l'utilisation de celle-ci n'excède pas la régénération de la ressource. Dans le cas du bois issu des forêts par exemple, il est important de s'assurer que celle-ci est gérée de manière durable, ce qui est le cas de 96% des forêts en Wallonie (PEFC Belgium, 2013). En Belgique, le label certifiant que le bois provient d'une forêt gérée durablement est le PEFC ("Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes").

Conclusion

- **Quelle échelle de production choisir ?**

Ce type de chaufferie se prête particulièrement bien aux systèmes centralisés: coûts d'installation et de maintenance partagés, espace de stockage commun, possibilité d'exploiter les plaquettes (prix attractif) qui nécessitent l'espace de stockage le plus important, une seule cheminée d'évacuation des gaz, etc. De plus, la centralisation permet l'optimisation de la chaufferie, puisque les plus grandes chaudières ont un meilleur rendement thermique (Union des Villes et Communes de Wallonie, 2009). Elles ne sont pertinentes que si les chaufferies peuvent être automatisées, c'est-à-dire avec une chaudière à plaquettes ou à pellets.

On a vu cependant que la chaudière bois met un certain temps avant d'atteindre sa puissance nominale. Associée à une forte puissance, cette inertie peut représenter un inconvénient. Au quartier des Pléiades, à Visé, c'est une chaufferie au bois centralisée qui alimente un réseau de chaleur pour les habitations. Les

promoteurs ont installé deux chaudières, qui permettent d'offrir un temps de mise en route plus faible, et de fonctionner parfois l'une sans l'autre lorsque les besoins sont moindres (Baccarini, 2013).

Notons que la centralisation de la chaudière ne pourra être envisagée qu'à la condition de pouvoir installer un réseau de chaleur.

- **Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et/ou en milieu périurbain ?**

Installer ce type de chaufferie en milieu urbain n'est pas sans difficulté, même si elle est centralisée. Elle nécessite une accessibilité aisée et un volume suffisant pour l'espace de stockage. Dans un milieu urbain dense, ces deux éléments ne sont pas nécessairement rencontrés. Bien que les pellets demandent un espace de stockage plus réduit que les plaquettes, ils sont bien plus coûteux. De plus, la chaufferie sera source de nuisances pour les habitants, par le bruit qu'elle engendre et la présence de la cheminée d'évacuation des gaz. L'intérêt de la centralisation est la réduction des nuisances grâce à la distance prise avec les habitations, mais la densité bâtie du milieu urbain ne permet pas de s'en affranchir. Ainsi, la chaufferie au bois trouvera difficilement sa place dans un milieu urbain dense, mais est tout à fait envisageable dans un milieu périurbain.

Puisqu'il faut généralement importer le combustible, se pose la question du transport et de la situation géographique de l'îlot. Mais l'exploitation du bois-énergie est une solution particulièrement intéressante lorsque l'on peut profiter des déchets d'une industrie du bois à proximité. Citons comme exemple une menuiserie située à Bruxelles (Rue Faes), dont les déchets permettent, en majeure partie, de chauffer la menuiserie elle-même et l'appartement voisin. En fonction de l'activité de celle-ci, elle pourrait étendre sa production de chaleur pour plusieurs habitations ou même un quartier (MATRIciel, 2010).

2.4 Production simultanée d'électricité et de chaleur

Explication du système

La cogénération est le système qui permet de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur, à partir d'un unique combustible. Lorsque ce combustible ne fait pas partie des énergies fossiles, le système possède le double bénéfice de marier un système à haut rendement énergétique avec un combustible durable, qui tendent tout deux à diminuer les émissions de CO₂.

Le système de cogénération permet une utilisation des plus efficaces des combustibles. Lorsque ceux-ci sont utilisés pour la production d'électricité traditionnelle, deux tiers de l'énergie d'entrée sont perdus sous forme de chaleur. C'est cette chaleur que la cogénération permet de valoriser, pour le chauffage de locaux par exemple. L'efficacité de la cogénération n'est pas l'augmentation de l'énergie produite par une installation donnée, car ce n'est pas le cas. Par contre, ce système augmente fortement le rendement énergétique global, car il permet une conversion de jusqu'à 90 % du combustible en énergie utile, électricité et chaleur (OECD & IEA, 2011).

Les énergies renouvelables qui peuvent être utilisées à cette fin sont: la biomasse, les déchets industriels, la géothermie profonde et le solaire thermique à haute concentration (CSP) (OECD & IEA, 2011). Ces deux dernières solutions sont des systèmes de production d'électricité à grande échelle, ce qui n'est pas envisageable à l'échelle d'un îlot d'habitation, comme nous l'avons précisé au début de ce chapitre. Quant aux déchets industriels, il s'agit principalement de la récupération de la chaleur perdue par de grandes centrales électriques pour chauffer les habitations aux alentours. Or, ce qui nous intéresse ici, c'est plutôt un moyen d'autoproduire de l'électricité à l'échelle de l'îlot, tout en récupérant la chaleur. Il nous reste donc à explorer l'utilisation de la biomasse.

Rappelons-nous que la biomasse peut prendre une variété de formes. Qu'elle soit sous forme solide (bois énergie), gazeuse (biogaz) ou liquide (huile végétale), elle peut alimenter un groupe électrogène pour la production d'électricité et de chaleur.

Néanmoins, l'utilisation du biogaz ne sera pas étudiée ici. L'unité de biométhanisation n'est pas accessible pour les particuliers, pour deux raisons: d'une part, les moyens financiers nécessaires allant de 1 million à 10 millions d'euros ; d'autre part, le savoir-faire, les équipements et le suivi obligatoire de l'installation (Bureau d'études IRCO, 2010). Il en va de même pour les procédés permettant d'extraire de l'huile végétale. Alors que cette dernière, tout comme le bois, peut être achetée, le biogaz ne fait pas encore partie du réseau de gaz et est donc difficilement exploitable. Il doit être valorisé sur le site, ce qui ne concerne que les industries et quelques gros agriculteurs.

Si l'on désire utiliser la biomasse, il faudra choisir entre l'huile végétale et le bois. Bien que le bois, de loin le moins cher, semble la meilleure solution, il faut d'abord regarder un peu plus au fonctionnement du groupe électrogène avant de se décider. L'alternateur peut être actionné par une turbine à gaz, une turbine à vapeur, ou par un moteur à gaz ou diesel (Daoud, 2007) :

- Le *moteur à gaz ou diesel (moteur à combustion interne)* est équivalent à celui que l'on retrouve dans les véhicules. Il s'agit d'un moteur à explosion couplé à un alternateur. Ces modèles sont les plus fréquemment utilisés, et couvrent la gamme des plus petites puissances (de 30 kW_{éi} à 1 ou 2 MW_{éi}). Le combustible utilisé dans ce type de moteur est généralement du gaz naturel ou du mazout. Il est également compatible avec l'huile végétale, moyennant quelques petites corrections.
- Pour la gamme des puissances plus importantes (jusqu'à 100 MW_{éi}), on trouve les *turbines à gaz* (dérivées des réactions des avions). Le combustible (généralement du gaz naturel) est brûlé dans une chambre à combustion, dont les gaz produits servent à alimenter la turbine. Elle présente un rendement électrique moindre qu'un moteur pour les puissances plus faibles.
- Les *turbines à vapeur* sont alimentées par la vapeur haute pression générée par la combustion de n'importe quel combustible dans une chaudière classique. Elles ont la particularité de produire plus de vapeur que d'électricité, et ne sont intéressantes que pour de très grandes puissances (plus de 1 MW_{éi}). De plus, le coût d'investissement est plus élevé. Lorsque l'on se trouve face à de faibles besoins en chaleur, ou dans le cas de plus petites puissances, elles sont déconseillées, car le rendement électrique sera faible et l'installation difficilement rentable. Elles trouvent leur application principalement dans l'industrie, pour des applications de grandes puissances nécessitant plus de chaleur que d'électricité.

Le combustible bois est utilisé le plus souvent dans les turbines à vapeur. Depuis peu, il alimente également le moteur Stirling, utilisé pour la cogénération domestique de très petites puissances (de 1 à 2 kW_{éi}). Le chauffage urbain d'une cinquantaine de logements fait partie des gammes des faibles puissances couvertes par les unités de cogénération (mais pas suffisamment petite que pour utiliser le moteur Stirling). Le moteur à combustion interne, alimenté par de l'huile végétale par exemple, est donc le procédé recommandé. Il faudrait ajouter les besoins de grands établissements publics ou augmenter considérablement l'échelle pour atteindre des puissances permettant d'utiliser par exemple des turbines à vapeur alimentées par le bois combustible. Cet ordre de grandeur a été donné par le facilitateur cogénération, puis a été confirmé par la simulation avec le logiciel COGENcalc.

Critères de performance

La contrainte de la cogénération est que son fonctionnement doit être le plus régulier possible afin d'assurer son efficacité. Elle ne pourra pas couvrir les pointes des besoins thermiques, et devra être couplée à un autre moyen de production de chaleur. Il faut donc définir la base des besoins thermiques que la cogénération sera en mesure de couvrir, et dimensionner celle-ci de façon optimale pour y arriver (ICEDD, 2010a).

Pour garantir l'efficacité et la rentabilité d'une unité de cogénération, il est primordial que celle-ci fonctionne à charge constante le plus longtemps possible, afin d'éviter autant que possible les arrêts/relances. Ceux-ci auront pour conséquence non seulement de diminuer le rendement global de l'installation, mais également de raccourcir considérablement la durée de vie du moteur du groupe électrogène. C'est pourquoi l'unité de cogénération doit toujours se munir de (Lempereur, 2013):

- un volume tampon qui permet de lisser les demandes. C'est également à ce niveau que le fait de considérer un plus grand nombre de bâtiments est bénéfique, car le foisonnement des demandes permet également un lissage des demandes.
- une chaudière supplémentaire, qui fonctionnerait en complément l'année et seule en été, lorsque la cogénération est arrêtée car seules subsistent les demandes en eau chaude sanitaire. En effet, l'unité de cogénération ne pourra pas couvrir les pointes des besoins thermiques, et devra être couplée à un autre moyen de production de chaleur. Il faut donc définir la base des besoins thermiques que la cogénération sera en mesure de couvrir, et dimensionner celle-ci de façon optimale (ICEDD, 2010a).

De plus, pendant les périodes faibles en demande de chaleur, la cogénération perd de son intérêt. La cogénération n'est intéressante que si la chaleur peut être récupérée, sinon la production de l'électricité retombe à un rendement médiocre puisque la chaleur ne peut plus être valorisée. Le dimensionnement de la cogénération dépendra donc des besoins nets en chaleur, et également des heures de fonctionnement qui permettent de valoriser toute la chaleur produite. Le but étant d'installer la plus grande puissance possible, à condition que toute la chaleur et toute l'électricité produites soient valorisées (Daoud, 2007).

En plus d'être un système avec une grande efficacité énergétique, la cogénération possède un avantage intéressant: la diminution de la pointe quart-horaire électrique des bâtiments. Celle-ci, calculée comme la puissance maximale mensuelle sur quinze minutes, est la puissance sur laquelle est basé le tarif du contrat avec le réseau de distribution électrique. Double-gain: en plus de diminuer la consommation d'électricité au réseau, cette dernière est achetée à un régime tarifaire beaucoup plus avantageux (Daoud, 2007).

Les freins à l'utilisation de la cogénération

Au-delà des freins propres à l'exploitation combustible utilisé (cas de la biomasse, par exemple), il existe également d'autres freins inhérents à l'utilisation même de l'unité de cogénération.

- *Qualité de l'unité*

La cogénération installée doit être de qualité. Elle doit réaliser une réelle économie d'énergie primaire par rapport à la production séparée de chaleur et d'électricité associées aux mêmes besoins. En pratique, on estime qu'elle est envisageable à condition qu'elle permette une réduction des émissions de CO₂ supérieure à 5 % (MATRIciel, 2010).

- *Coût*

La cogénération est un lourd investissement de départ, qui nécessite des besoins en chaleur suffisamment élevés pour que son utilité soit justifiée. De plus, le gain sur l'électricité autoproduite par la cogénération sera d'autant plus important que les besoins sont grands, puisque celle-ci est dimensionnée selon les besoins en chaleur. On comprend ainsi que plus l'isolation des bâtiments est élevée, moins la cogénération sera intéressante (ou il faut alors augmenter le nombre de bâtiments reliés à l'unité de cogénération). Il n'y a cependant pas de limite chiffrée, et la rentabilité de l'unité de cogénération doit être étudiée au cas par cas (Lempereur, 2013).

Conclusion

- **Quelle échelle de production choisir ?**

La cogénération est destinée principalement à de grandes puissances, comme nous l'avons vu lors de l'explication du système. Il en résulte que ce type d'unité n'est pas adapté à l'échelle du particulier. Des unités de micro-cogénération voient de plus en plus le jour sur le marché, mais leur efficacité et leur rentabilité n'ont pas (encore) atteint celles des unités utilisées pour les plus grandes puissances. L'échelle de la cogénération sera donc la centralisation à l'échelle de l'îlot, à la double condition que les besoins de ceux-ci permettent la rentabilité de l'unité, et la rentabilité du réseau de chaleur que la centralisation induit.

Notons qu'il n'est pas certain cependant que la cogénération sera rentable à l'échelle d'un îlot d'habitation, car, comme il a été dit plus haut, sa faisabilité doit être étudiée au cas par cas, compte tenu des besoins en chaleur (et donc du niveau d'isolation) des bâtiments.

- Le système de production est-il envisageable en milieu urbain et en milieu périurbain ?

Au niveau de la cogénération, la distinction à faire entre milieu urbain et périurbain dépend du combustible utilisé; en effet, elle peut à priori être installée indifféremment dans les deux cas, pour autant qu'un réseau de chaleur soit pertinent.

3. Application dans le secteur du transport

3.1 Introduction

La situation actuelle du parc automobile n'est pas durable. Les carburants utilisés pour les transports sont des produits d'origine pétrolière, donc épuisables. On estime qu'en 2050, 1 Gtep¹¹ manquera à la production d'hydrocarbures naturels liquides, nécessaires à nos consommations d'énergie pour le transport. Cela s'élève à 3 Gtep pour 2100 (Bauquis, 2004). À la raréfaction des ressources pétrolières s'ajoute la nécessité de réduction des émissions de gaz à effet de serre. À chaque utilisation de la voiture, le moteur thermique libère du CO₂, et participe de ce fait à l'augmentation des émissions globales et de l'effet de serre. La première solution, évidente et nécessaire, est de changer nos habitudes. L'autopartage et le covoiturage sont des principes qui doivent entrer dans nos usages, afin d'augmenter le taux d'occupation des véhicules. Les transports en commun et l'utilisation du vélo devraient également devenir l'utilisation préférentielle par rapport à la voiture individuelle. L'attitude aujourd'hui, dans la planification de nouveaux quartiers, est de mettre à disposition des habitants un grand nombre de services à proximité de façon à promouvoir la multifonctionnalité, permettant d'encourager les modes doux et même jusqu'à interdire l'utilisation de la voiture dans certaines zones (cas du quartier de Vauban à Freiburg, en Allemagne). La seconde approche consiste à recourir à des alternatives énergétiques pour ce secteur. Il peut s'agir d'un nouveau type de carburant ou d'un nouveau type de vecteur énergétique. En particulier (Bauquis, 2004) :

- Les *hydrocarbures de synthèse*. Cette alternative comprend 3 familles de « nouveaux » carburants : les biocarburants, les carburants produits à partir d'autres énergies fossiles (gaz ou charbon), et enfin ceux produit par la carbonisation de l'hydrogène
- Les *nouveaux vecteurs énergétiques*. Il s'agit de l'hydrogène et l'électricité

Nous nous intéresserons, dans le cadre de cette étude, uniquement aux biocarburants et à l'introduction de l'électricité dans le transport (moteurs électriques), puisque ce sont les deux alternatives qui permettent d'exploiter des énergies renouvelables (l'hydrogène est un vecteur énergétique produit, actuellement, à 98% à partir d'hydrocarbures ou de charbon). La directive européenne de 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables exige qu'en 2020, 10 % de l'énergie consommée par le secteur du transport soit d'origine renouvelable (directive 2009/28/CE). Le secteur des énergies renouvelables dans le transport est actuellement dans une phase d'étude et de recherche, et ne garantit aucune certitude par rapport à l'avenir.

Faisons brièvement le point dessus.

¹¹ tep = Giga Tonne d'équivalent pétrole.

3.2 Les biocarburants

Le recours aux biocarburants est une solution étudiée afin de remplacer directement une partie de l'énergie fossile utilisée pour les carburants des transports. Les biocarburants sont des produits de la biomasse, issus de la filière des cultures énergétiques. On distingue deux catégories de plantes énergétiques qui permettent la production de ces « carburants renouvelables » (ValBiom, 2004) :

- Les *plantes oléagineuses* (plantes desquelles on peut extraire des huiles végétales à partir de graines) sont utilisées pour produire du biodiesel (ou ester méthylique) grâce à une transformation appelée transestérification. Ce type de biocarburant est utilisé dans les moteurs diesel actuels, mais on trouve également les huiles végétales pures qui doivent être mélangées avec du diesel ou utilisées dans un moteur modifié. L'huile potentiellement utilisable en Wallonie est l'huile de colza, mais on trouve également de l'huile de tournesol.
- Les plantes dont la fermentation permet d'obtenir de l'éthanol sont les *plantes sucrées et amylacées*, telles que les betteraves, les cannes à sucre, le froment, le maïs, etc. On peut retrouver de l'éthanol dans les moteurs actuels soit à raison de 5 à 20 % (le reste étant de l'essence fossile), soit dans de très grandes proportions (jusqu'à 100 %), à condition que le moteur soit adapté. Lorsque l'éthanol est modifié pour devenir de l'éthyl tertio butyl ether (ETBE), il est mélangé à l'essence (à raison de 15%) dans le but d'augmenter la résistance de l'essence à la détonation et donc avoir une combustion mieux contrôlée.

Les biocarburants présentent un avantage évident qui est la diminution de la consommation des énergies fossiles et donc de notre dépendance à ceux-ci, car les biocarburants peuvent être mélangés (en petite quantité certes) aux carburants fossiles dans les moteurs actuels. Puisqu'ils sont des produits de la biomasse, ils présentent un bilan global d'émissions de CO₂ très faible. De plus, la production locale est possible, mais uniquement chez les agriculteurs équipés (pas accessibles pour les particuliers).

Cependant, les impacts environnementaux et socio-économiques de leur production restent au cœur des débats. L'augmentation mondiale de la demande des matières premières agricoles pour la production des biocarburants de ces dernières années entretient la crainte de la concurrence convoitant ces mêmes matières premières agricoles, à des fins alimentaires. Cela est d'autant plus préoccupant que la croissance démographique importante d'ici 2050 (3 milliards d'individus de plus) augmentera également les besoins alimentaires (Dronne et al., 2011).

Dans certains pays, le débat est vif également sur l'emprise des multinationales, qui ne font plus des agriculteurs locaux les producteurs privilégiés des biocarburants. Alors que la production au niveau local permet aux agriculteurs de diversifier leurs sources de revenus et de gérer convenablement les cultures afin de garantir la sécurité alimentaire, les grandes multinationales n'offrent pas cette assurance, travaillant sous la logique du profit : une production intensive destinée à l'exportation (Lievens, 2009).

Enfin, les critiques sur le plan environnemental dénoncent un bilan des émissions des gaz à effet de serre plus lourd qu'annoncé. Il n'y a pas de doute, l'utilisation d'un litre de biocarburant à la place d'un volume identique de carburant fossile participe à la réduction des émissions de CO₂ (Dronne et al., 2011). Mais réfléchir en terme d'émissions de CO₂ par litre de carburant est trompeur. Si on parle en terme de kilomètres parcourus, le bilan est tout autre. En effet, lorsqu'un moteur est alimenté en partie par un biocarburant, la distance parcourue sera moins importante qu'avec ce même réservoir contenant uniquement un carburant fossile. Dès lors, pour que le bilan des émissions formulé par litre de carburant soit équivalent à ce qui est annoncé, les kilomètres effectués par la voiture doivent également être diminués (Frigon, 2008). De plus, si la culture des plantes énergétiques a été établie sur des territoires initialement occupés par des forêts, la perte du stockage en carbone de ceux-ci rend le bilan des émissions également moins favorable (Dronne et al., 2011).

D'autres éléments encore alimentent la controverse, comme les coûts de production élevés et l'efficacité énergétique des biocarburants, puisque cette dernière dépend de la nature de la matière première (Dronne et al., 2011).

En réponse à ces débats, le développement des biocarburants de seconde génération est en cours de recherche. Ils sont élaborés non pas à partir de plantes destinées à l'origine à l'alimentation, mais à partir de la ligno-cellulose, le constituant le plus abondant dans la biomasse. Il peut s'agir soit de produits issus directement de l'exploitation forestière, soit des résidus et déchets agricoles, urbains ou ménagers, soit encore de plantes de culture comme les taillis, le miscanthus, etc. L'absence de concurrence directe avec les cultures alimentaires, l'abondance de la matière première et la meilleure efficacité énergétique (en terme de rendement de la biomasse) en font un carburant prometteur. Ils devraient faire leur entrée sur le marché dans une dizaine d'années (Dronne et al., 2011). Cependant, dans le cas où la matière première provient de cultures, la question de la mobilisation des terres entre en jeu, puisqu'elle pourrait engendrer une concurrence indirecte avec les terres destinées à l'alimentaire (Dronne et al., 2011). Ces carburants de seconde génération ne feront donc pas, encore une fois, l'unanimité.

Actuellement, en Europe, les biocarburants représentent 5,75 % du marché des carburants (suite à la directive européenne 2003/30/CE imposant une proportion de 5,75 % en 2010). L'objectif européen d'une part de 10 % d'énergie renouvelable dans le secteur du transport (directive 2009/28/CE) laisse penser que les biocarburants auront une place importante dans les prochaines années. Pour y parvenir néanmoins, la Commission européenne définit des critères de durabilité à respecter pour les biocarburants et encourage la transition des biocarburants de première génération vers ceux de la seconde. La réalisation de cet objectif est encore incertaine et dépendra du développement des biocarburants de seconde génération, ainsi que des autres technologies exploitant des énergies renouvelables pour le secteur du transport (électricité et hydrogène) (Dupont, 2013).

Conclusion

Les biocarburants possèdent un potentiel important dans le défi mondial actuel que constitue l'épuisement des ressources fossiles. En effet, les biocarburants permettent assurément une réduction de la consommation d'énergie fossile, mais n'entraînent pas nécessairement une réduction de la consommation d'énergie primaire ! Leur rendement énergétique peut même être très faible, en fonction de la matière première à partir de laquelle il est produit (Dronne et al., 2011). Sur ce point encore, les avis et les études divergent, étant donné la difficulté de mener des analyses et des bilans énergétiques en tenant compte de tous les aspects énergétiques des biocarburants. Dans le cadre de ce travail, où le bilan repose sur les consommations d'énergie primaire, il est difficile d'intégrer les biocarburants, pour lesquels ce point précis est actuellement au stade d'étude. De plus, ce type de bilan ne pourra pas refléter les avantages des biocarburants que sont la réduction de la consommation d'énergie fossile et la diminution des émissions de gaz à effet de serre, et mettra plutôt en évidence leur faiblesse.

Sans un progrès scientifique et technologique, recherché notamment dans les biocarburants de seconde génération, les biocarburants ne représentent pas une solution viable à long terme. Face à l'incertitude scientifique actuelle, on comprend donc que le poids potentiel des biocarburants dans le bilan zéro énergie habitations – transports, inscrit dans une démarche de développement durable, est faible par rapport au poids d'une amélioration de l'utilisation des moyens de transport à savoir : limiter les utilisations de la voiture, favoriser les covoiturages et voitures partagées, utiliser au maximum les transports en commun, etc. C'est pour ces raisons que le potentiel des biocarburants ne sera pas étudié dans le cadre de ce travail.

3.3 Les véhicules électriques

Le véhicule électrique est une automobile qui a remplacé son moteur thermique par un moteur électrique. Il est souvent qualifié de « véhicule propre », car le moteur ne rejette pas de CO₂ ni de polluants comme le fait le moteur thermique. Cette qualité est très appréciée dans les centres urbains avec une surabondance de voitures. La comparaison avec le bilan environnemental du moteur thermique doit cependant tenir compte non seulement de la production de l'électricité consommée, à partir d'énergie renouvelable ou non, mais également de la fabrication des batteries (Centre d'analyse stratégique, 2011). Les émissions de CO₂/kWh

produit dépendent aussi du mix énergétique du pays. Pour être cohérent, il faudrait également tenir compte dans le bilan environnemental global du fait que ce changement de véhicule nécessite la construction de nouvelles automobiles adaptées, envoyant ainsi l'ensemble des véhicules thermiques aux oubliettes.

Le véhicule à moteur électrique n'est pas une solution récente puisqu'elle est étudiée depuis des dizaines d'années. Même si des progrès ont été réalisés au niveau du temps de recharge du véhicule (entre 5 et 8h à 220 volts), de la durée de vie et de la sécurité des batteries, de la compacité du système, et de l'autonomie des batteries (de l'ordre de 150 km en théorie, mais avoisinant les 80 km en pratique), ils sont des freins importants à son déploiement et au décolllement du marché. De plus, la vitesse de pointe de ces véhicules, bien que suffisante pour la circulation urbaine, reste inférieure à celle des véhicules thermiques. Actuellement, il n'existe pas de batterie sur le marché qui permettrait une autonomie intéressante permettant de diminuer la contrainte de recharges fréquentes, qui posséderait une longue durée de vie et qui serait fiable techniquement (Centre d'analyse stratégique, 2011). Nombreuses possibilités de nouveaux types de batteries sont étudiées pour le moment, mais une batterie de qualité restera onéreuse si bien qu'il est difficile d'estimer si un jour la voiture électrique pourrait être moins chère qu'une voiture thermique. Elle ne sera destinée, dans un premier temps en tout cas, qu'à certains marchés spécialisés. Le déploiement de la voiture électrique pour le particulier devra donc attendre certains progrès technologiques, mais de petits véhicules électriques légers, de 2 à 4 roues, pourront cependant rapidement changer notre manière de nous déplacer sur les plus petites distances (Centre d'analyse stratégique, 2011).

Toutefois le moteur électrique n'est pas l'unique alternative de la « filière électrique ». On assiste également à l'électrification progressive des moteurs thermiques, dont le potentiel en terme d'efficacité énergétique n'a cessé d'évoluer et n'a pas encore atteint son maximum (Centre d'analyse stratégique, 2011). On parle, notamment, de véhicules hybrides et de véhicules hybrides rechargeables. Ces véhicules sont tout deux composés d'une double motorisation, électrique et à combustion interne. Dans le premier cas, les déplacements en mode électrique ne peuvent dépasser les 2 km, car la batterie est de faible capacité, mais de grande puissance. Elle est utilisée en fait dans le but d'améliorer le rendement du moteur thermique en combinant propulsion thermique et électrique, mais l'entièreté de l'énergie consommée par le véhicule vient du combustible fossile, dont la conversion en électricité lors de la combustion dans le moteur thermique sert à alimenter le moteur électrique. Cela n'est pas le cas dans le véhicule hybride rechargeable, dont les batteries, de plus grande capacité, peuvent être rechargées (durée de recharge de 2h à 220volts) par une source d'électricité extérieure et permettent des déplacements en mode électrique allant de 15 à 30 km (Centre d'analyse stratégique, 2011). Pour les petites distances, en ville par exemple, le véhicule fonctionne donc uniquement grâce à l'électricité et permet d'avoir les avantages du véhicule électrique concernant l'absence de pollution. Pour les plus grandes distances, le véhicule passe en mode thermique, de façon à ne pas être freiné par la faible autonomie du moteur électrique et sa plus faible vitesse de pointe. D'un point de vue économique, le coût du véhicule hybride se rapproche de la voiture électrique, mais ne nécessite pas de batteries aussi coûteuses puisqu'on ne vise pas la même autonomie. De plus, le temps de la recharge de la voiture hybride n'est que de deux heures et peut se faire à partir de prises existantes de 220 volts, tandis que la voiture électrique nécessite qu'on installe de nouvelles prises sécurisées (Centre d'analyse stratégique, 2011).

Conclusion

On constate donc que le véhicule électrique et le véhicule hybride rechargeable se dessinent des destins différents. Le premier se destine plutôt à un avenir uniquement urbain, avec des petits véhicules légers permettant de courtes distances, sous réserve que les performances attendues des nouvelles batteries se confirment. Le véhicule hybride rechargeable semble lui pouvoir se substituer aux véhicules thermiques pour l'ensemble des usages et prendre plus facilement part au marché actuel (Bonnaure, 2009).

On peut se demander cependant quel est le réel avantage de recourir aux moteurs électriques si l'électricité consommée par ceux-ci provient d'une énergie fossile qui nécessite plusieurs étapes de production énergivores, et qu'ils participent finalement à l'augmentation de la puissance de la demande globale en électricité. Mais ces véhicules possèdent deux potentiels importants qui, ensemble, contribuent à justifier

leur emploi. Tout d'abord, l'électricité consommée peut être produite à partir d'énergie renouvelable. Il y a deux façons de recharger ces voitures, soit directement à partir du réseau électrique, soit à partir de production décentralisée d'électricité. La première possibilité supposerait donc de modifier le mix énergétique existant pour y intégrer une plus grande proportion d'énergie renouvelable, ce qui n'est pas imaginable actuellement. La seconde possibilité est réalisable notamment à l'échelle de l'îlot d'habitation, et est plus intéressante puisqu'elle permet, en plus, de limiter les pertes liées au transport de l'électricité. Le second potentiel intéressant des véhicules électriques est la possibilité de lisser les demandes globales en électricité, en les rechargeant pendant les heures creuses des demandes journalières des habitations. Ainsi, ces véhicules deviennent un moyen de stocker l'électricité produite aux heures creuses en rechargeant leurs batteries. Cela est d'autant plus important si on considère la production décentralisée d'électricité à l'échelle de l'îlot, puisque le problème du stockage à cette échelle n'a pas encore de solution.

Malgré ces avantages, l'investissement global des véhicules électriques restera un obstacle à leur utilisation chez les particuliers. En ce qui concerne le transport public, on y trouve la possibilité d'étaler l'investissement lié aux infrastructures de recharge sur plusieurs utilisateurs. Il est donc raisonnable de penser que le rôle des véhicules électriques dans les prochaines années sera plus important dans le secteur public - avec l'introduction du tram ou des véhicules de locations électriques - que chez les particuliers (Rienstra & Nijkamp, 1998).

4. Conclusion

A la page suivante est repris un tableau récapitulatif des différents systèmes de production parcourus dans ce chapitre, avec les différents critères qui permettent d'envisager l'opportunité de la *centralisation du système à l'échelle de l'îlot ou non*, et si il est envisageable en milieu urbain et/ou en milieu périurbain. Ce tableau sert d'outil d'aide à la décision lorsque l'on veut intégrer les énergies renouvelables dans le bilan global énergétique. Il peut être appliqué directement dans le cas des deux îlots étudiés dans ce travail, et détermine la démarche à suivre pour la suite de cette étude.

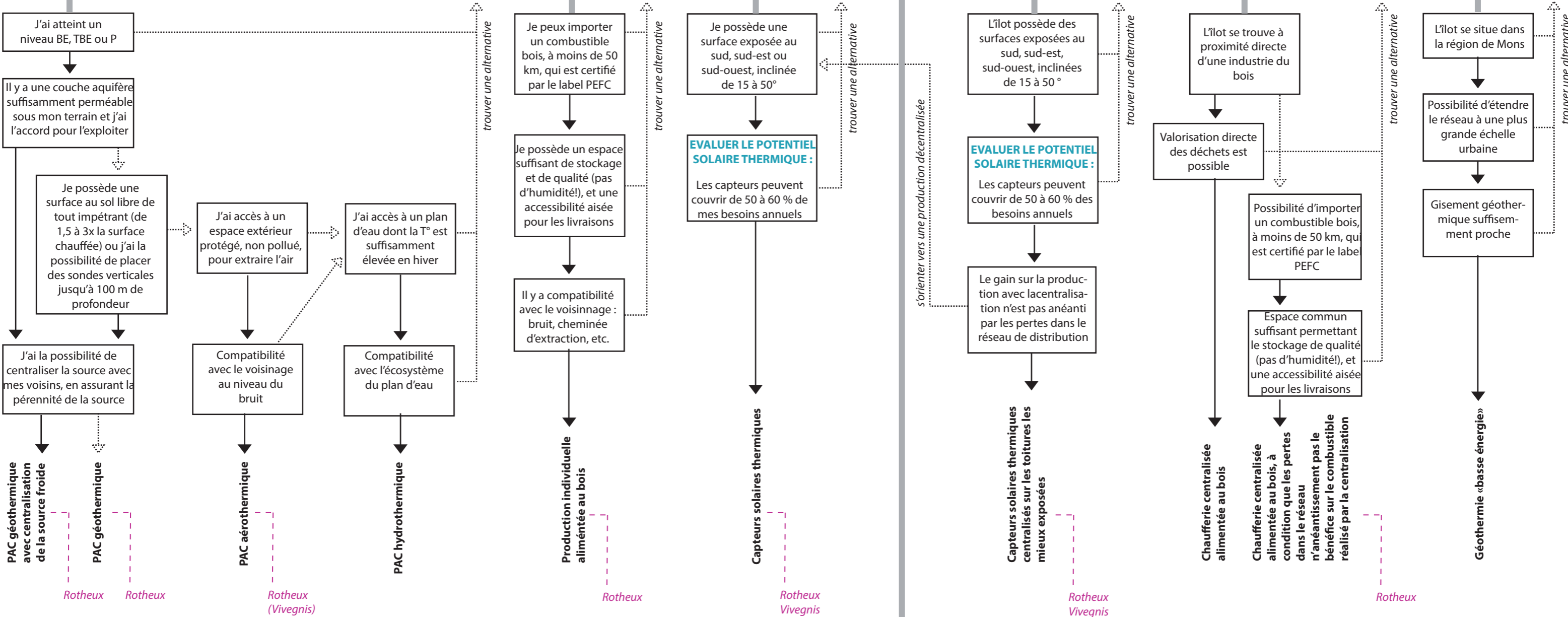
PRODUCTION DE CHALEUR

— OUI
 NON
 - - - Envisageable à...

J'ai la possibilité de mutualiser la production de chaleur avec mes voisins et
LE RESEAU DE CHALEUR CREE RESPECTE LE CRITERE DE RENTABILITE

NON OUI

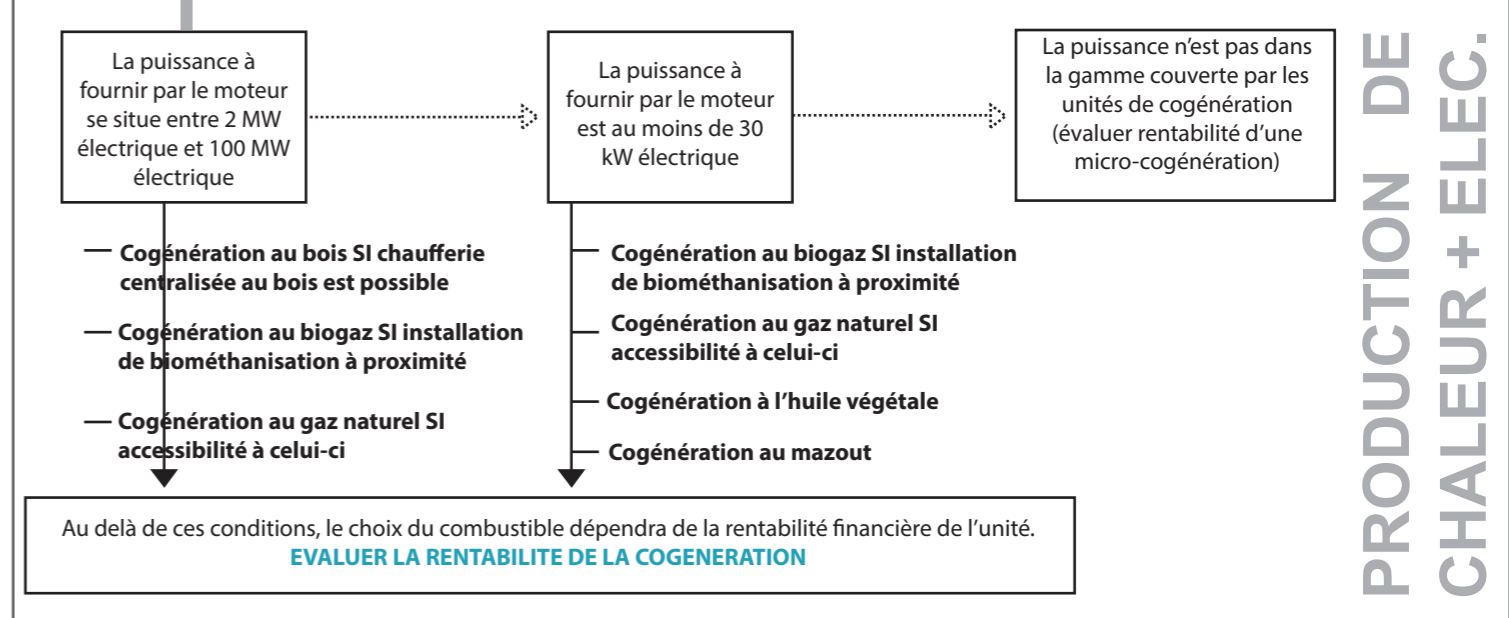
La production doit être DECENTRALISEE. Pour choisir le système le plus adapté à mon site, je dois identifier si : **La production peut être CENTRALISEE. Pour choisir le système le plus adapté à mon site, je dois identifier si :**



Dans le cas où aucune alternative n'est envisageable...

Dans le cas où la production de chaleur à partir d'énergie renouvelable n'est pas possible à l'échelle individuelle ou à l'échelle de l'îlot, ou insuffisante, il sera nécessaire de recourir aux systèmes exploitant les énergies fossiles, ou encore faire partie d'une échelle urbaine plus grande permettant d'exploiter un système tel que la géothermie basse énergie.

Notons que la cogénération, même si elle n'exploite pas d'énergie renouvelable, reste un système d'une grande performance énergétique, qui permet une économie de l'énergie fossile, en comparaison aux systèmes traditionnels. Il sera donc intéressant de l'envisager dans ce travail, même si elle n'exploite pas d'énergie renouvelable.



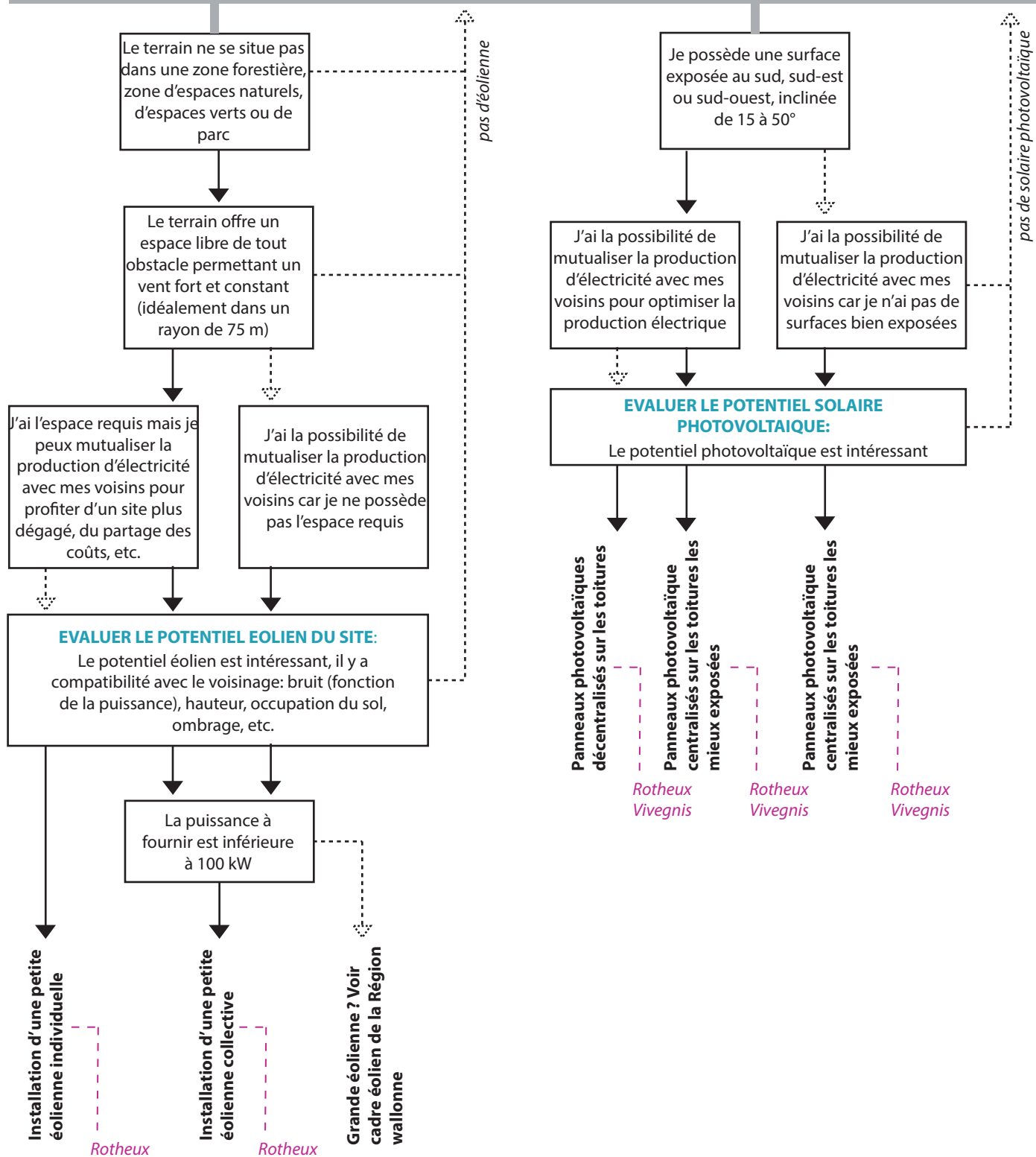
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

— OUI

- - - - - NON

- - - - - Envisageable à...

Pour choisir le système le plus adapté à mon site, je dois identifier si :



SI NON...

Dans le cas où la production d'électricité à partir d'énergie renouvelable n'est pas possible à l'échelle individuelle ou à l'échelle de l'îlot, ou insuffisante, il sera nécessaire de se raccorder au réseau de distribution.

Les énergies renouvelables pourront y être intégrées grâce à des systèmes à grande échelle tels que les parcs éoliens, les centrales solaires thermodynamiques, les centrales hydroélectriques, la géothermie haute et moyenne énergie, ... Et toutes les autres techniques au stade de recherche à ce jour.

Avant toute chose, il est donc nécessaire d'évaluer la pertinence de la création d'un réseau de chaleur, sur base du critère de rentabilité trouvé dans la littérature. Ensuite, puisqu'on a vu que la cogénération apporte de nombreux avantages, mais qu'elle n'est envisageable que lorsque les besoins sont mutualisés, on déterminera la pertinence d'installer une unité de cogénération dans notre cas, à condition que le réseau de chaleur soit pertinent.

En ce qui concerne les systèmes de production de chaleur, on observe qu'à priori, les capteurs solaires peuvent être utilisés aussi bien en milieu urbain qu'en milieu périurbain, mais il est nécessaire d'évaluer le potentiel solaire du site pour connaître leur production. Leur centralisation ou non dépendra de la pertinence du réseau de chaleur et des pertes engendrées par celui-ci. Les pompes à chaleur, réservées à une production décentralisée dans chaque habitation et à des niveaux d'isolation élevés, ne pourront être facilement intégrées en milieu urbain. Nous excluons directement la pompe à chaleur géothermique, mais nous envisagerons la pompe à chaleur aérothermique, bien qu'elle comporte certaines conditions non nécessairement remplies en milieu urbain. Elles seront toutes deux envisagées par contre pour l'îlot périurbain. Enfin, le bois-énergie est une énergie renouvelable qui semble bien plus adaptée au milieu périurbain, c'est pourquoi nous ne l'envisagerons pas à Vivegnis. La centralisation ou non de la production dépendra de la pertinence du réseau de chaleur.

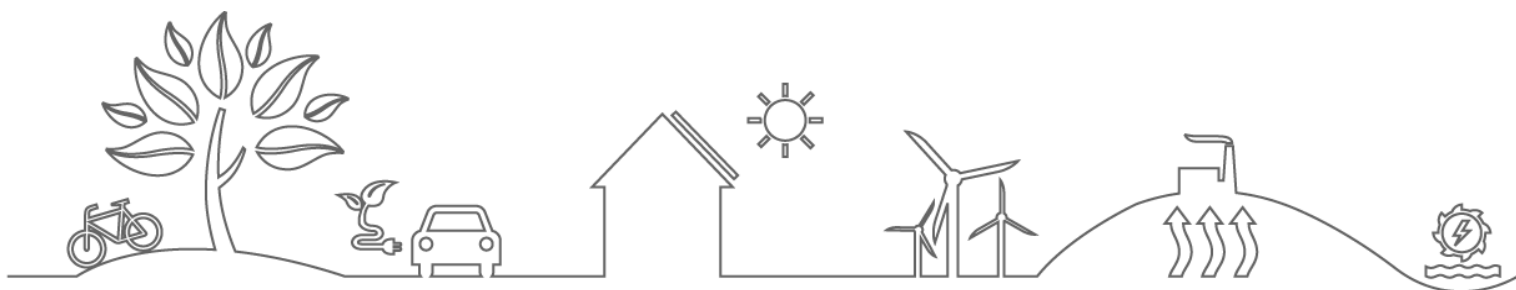
Pour la production d'électricité, les panneaux photovoltaïques, tout comme les capteurs solaires thermiques, peuvent être utilisés aussi bien en milieu urbain que périurbain, mais il sera également nécessaire de déterminer le potentiel photovoltaïque du site. En ce qui concerne l'éolienne, il est à exclure en milieu urbain, mais pourrait être envisageable à Rotheux. Nous devons aussi évaluer le potentiel éolien du site.

Au niveau du transport, nous avons pu constater que toutes les alternatives à la situation actuelle possèdent leur lot d'inconvénients, pour lequel nous ne sommes pas certains de trouver une solution viable à long terme et accessible à tous. Il est certain, dès lors, que notre réflexion sur le transport doit se porter sur nos habitudes, de façon à favoriser au maximum les déplacements les plus durables. Le vélo et la marche à pied se situent bien évidemment en première position. Mais pour l'ensemble des déplacements qui ne peuvent être réalisés par ces modes doux, l'augmentation du taux d'occupation des véhicules est une solution facilement réalisable avec un impact favorable à la fois sur le bilan des consommations et sur le bilan des émissions. Enfin, des réflexions existent aujourd'hui sur de nouveaux types de transport. Par exemple, à Liège durant l'été prochain, la Meuse se verra accueillir des dizaines de bateaux à propulsion électrique, accessible à tous, sans permis. Vers un nouveau mode de transport urbain ?

Dans le cadre de ce travail, on évaluera la production d'énergie renouvelable pour le transport au travers des moteurs électriques uniquement, et non au travers des biocarburants pour les raisons expliquées précédemment. On tiendra compte également d'un changement d'attitude venant des habitants de l'îlot envers leur mode de transport, puisqu'il s'agit probablement de la meilleure façon de réduire les consommations.

Le chapitre suivant est consacré à l'application concrète de ces résultats aux deux îlots étudiés : Rotheux (îlot périurbain) et Vivegnis (îlot urbain).

Chapitre 3 : Application



Le but de ce chapitre est de calculer tous les paramètres nécessaires à la réalisation du bilan global en énergie primaire de l'îlot, selon les trois pôles formant la base de ce travail.

- Les énergies renouvelables
- Le transport
- Les bâtiments

Comme nous l'avons conclu du chapitre 2, le pôle "énergies renouvelables" comprendra les calculs de l'évaluation de la pertinence d'un réseau de chaleur et d'une unité de cogénération, les calculs des potentiels solaires thermique et photovoltaïque des îlots de Vivegnis et de Rotheux, et le calcul du potentiel éolien uniquement pour Rotheux.

Mais avant d'en arriver là, nous évaluerons dans un premier temps les consommations énergétiques finales des pôles "transport" et "bâtiment", compte tenu de l'hypothèse générale d'une réduction de la consommation, avant d'envisager l'équilibre avec la production énergétique sur place.

Le passage de la consommation finale d'énergie à la consommation d'énergie primaire se fait grâce aux facteurs de conversion repris dans le tableau ci-dessous.

Facteur de conversion	Région wallonne	Région Bruxelles-Capitale
Carburant fossile	1	1
Combustible fossile	1	1
Electricité	2,5	2,5
Electricité autoproduite par cogénération à haut rendement	1,8	2,5
Biomasse	1	0,32

tab. 9: Facteurs de conversion d'énergie finale en énergie primaire (Plate-forme Maison Passive, 2013)

La réalisation du bilan entre les consommations d'énergie liées aux habitations, les consommations d'énergie liées aux transports et les apports en énergie renouvelable s'effectue en kWh, pour l'îlot et pour un an. On ramènera par moment cette valeur à des kWh par mètre carré de plancher chauffé ou par personne pour une année, de façon à faciliter la comparaison.

Le bilan zéro énergie s'effectue par définition sur une année, mais on regardera néanmoins les consommations d'énergie et les apports possibles mois par mois, afin de déterminer quels sont les systèmes énergétiques les plus pertinents à mettre en place. De cette façon, on tiendra compte également du profil de charge et de la possibilité de rapprocher le plus possible la courbe de production de la courbe de consommation.

1. Pôle transport

1.1 Méthodologie

La question de la réduction des consommations énergétiques liées au transport n'est pas aussi évidente que dans le secteur du bâtiment. Alors que l'on connaît l'influence par exemple d'une augmentation du niveau d'isolation d'une maison sur la consommation globale, il est difficile de quantifier l'impact des modifications du comportement actuel dans le secteur du transport.

Le but de ce chapitre est d'imaginer plusieurs scénarios plausibles qui permettraient, à priori, de diminuer les consommations. En particulier, nous allons essayer de savoir sur quels paramètres il faut agir préférentiellement pour obtenir une amélioration significative des consommations en énergie primaire.

La méthode utilisée a été développée dans la thèse “Méthodologie d’évaluation énergétique des quartiers périurbains. Perspectives pour le renouvellement périurbain wallon” (Marique, 2012a). Il s’agit d’une méthode quantitative d’évaluation des consommations d’énergie relatives aux déplacements principaux des habitants, qui permet de tenir compte entre autres des distances parcourues, des parts modales et de la fréquence des déplacements. Les différentes étapes pour l’obtention de la consommation globale en kWh/an pour le quartier sont expliquées brièvement ci-dessous.

Étape 1: Calcul du facteur de consommation du mode de transport

Le facteur de consommation en énergie finale (fm), propre à chaque mode de transport, est exprimé en kWh/personne.km parcouru. Il permet de faire la conversion de la consommation de chaque type de véhicule en une unité commune (le kWh), en tenant compte du taux d’occupation de celui-ci (plus celui est élevé, plus la consommation par personne sera faible), et des caractéristiques du véhicule. Le facteur de consommation variera donc selon le carburant utilisé, et selon que l’on soit en zone urbaine ou périurbaine, puisque les taux d’occupation des véhicules diffèrent.

Le tableau ci-dessous reprend les facteurs de consommation fm des différents modes de transports utilisés actuellement à Vivegnis et à Rotheux. Les déplacements à pied ou à vélo n’y sont pas repris puisqu’ils ne sont pas, à priori, consommateurs d’énergie. La répartition entre les voitures essence et diesel est de respectivement 45 % et 55 %, comme c’est le cas actuellement en Wallonie (Marique, 2013). Afin de connaître la quantité d’énergie primaire consommée, les facteurs de conversion d’énergie finale en énergie primaire sont intégrés au facteur de consommation pour donner le facteur de consommation en énergie primaire (EP) : Fm EP. Il est exprimé en EP/personne.km.

Dans la suite de cette partie consacrée au transport, nous ne parlerons plus qu’en terme d’énergie primaire, puisque cela permet de mesurer le gain énergétique réellement obtenu par les différents scénarios étudiés ci-après.

		Conso (litre/km)	Taux d’occ	Fm	Fm EP
URBAIN	Auto essence	8	1,25 ¹²	0,57	0,57
	Auto diesel	6,8	1,25 ¹²	0,54	0,54
	Bus	45	20 ¹³	0,22	0,22
	Train			0,15	0,375
PÉRIURBAIN	Auto essence	8	1,25	0,57	0,57
	Auto diesel	6,8	1,25	0,54	0,54
	Bus	45	10 ¹⁴	0,44	0,44
	Train			0,15¹⁴	0,375

tab. 10: Facteurs de consommation en énergie finale et en énergie primaire des modes de transport

Étape 2: Indice de performance des déplacements

L’indice de performance des déplacements (IPE), propre à chacun des types de déplacements étudiés, est exprimé en kWh/personne.trajet. Par exemple, dans le cas des déplacements relatifs au travail, l’IPE est déterminé comme suit: par mode de transport, on multiplie les kilomètres totaux parcourus par les travailleurs de la zone étudiée par le facteur de consommation correspondant. On somme ensuite toutes les valeurs obtenues pour chacun des modes de transport, et on divise le total par le nombre de travailleurs de la zone étudiée.

¹² source: Pissart, Architecture et Environnement & Stratec, 2013.

¹³ Donnée fournie par le service de la TEC.

¹⁴ source: A-F Marique, 2012a.

Étape 3: Consommation annuelle

On obtient aisément la consommation annuelle d'un quartier en multipliant l'IPE relatif de la zone étudiée par le nombre de personnes et de trajets correspondant au déplacement considéré.

1.2 Hypothèses

Les déplacements

Seuls les déplacements domicile-travail et domicile-école sont étudiés. En effet, ceux-ci sont systématiques et répétitifs, et permettent d'utiliser des données précises les concernant. Pour les autres déplacements, les données disponibles sont limitées, et il est difficile de tenir compte d'un certain systématisme.

Modes de transport

Les modes de transport pris en compte sont le train, la voiture en tant que conducteur et en tant que passager, le bus, le tram, le vélo et la marche. La moto n'est pas considérée vu sa faible part modale.

Données de base

L'enquête socio-économique générale de 2001, effectuée par la Direction générale Statistique et Information économique, forme la base de données des informations nécessaires au calcul. Ces données ne sont donc pas tout à fait représentatives de l'activité actuelle en terme de transport des habitants, mais la récolte in situ de ces informations précises n'était pas possible dans le cadre de ce travail. Ces données statistiques serviront donc de base pour calculer la consommation initiale, avant de modifier plusieurs paramètres relatifs aux différents scénarios, pour visualiser l'évolution de la consommation. Elles permettent de connaître, entre autres, le nombre de travailleurs, le nombre d'écoliers, le nombre de trajets par an et les distances parcourues par trajet pour chaque mode de transport, ainsi que la répartition modale. Cela permet de déterminer le nombre de km parcourus par mode et par travailleurs/écoliers par an, ainsi que les distances moyennes parcourues.

Pour connaître le détail des hypothèses posées et les explications de l'analyse des données de base, nous renvoyons à la thèse "Méthodologie d'évaluation énergétique des quartiers périurbains. Perspectives pour le renouvellement périurbain wallon" (Marique, 2012a).

1.3 Résultats

1.3.1 Situation actuelle

Les données statistiques permettent de mettre en avant les grandes différences entre l'îlot urbain et l'îlot périurbain sélectionnés, notamment au niveau de la répartition modale, comme le montrent les graphiques de la page suivante.

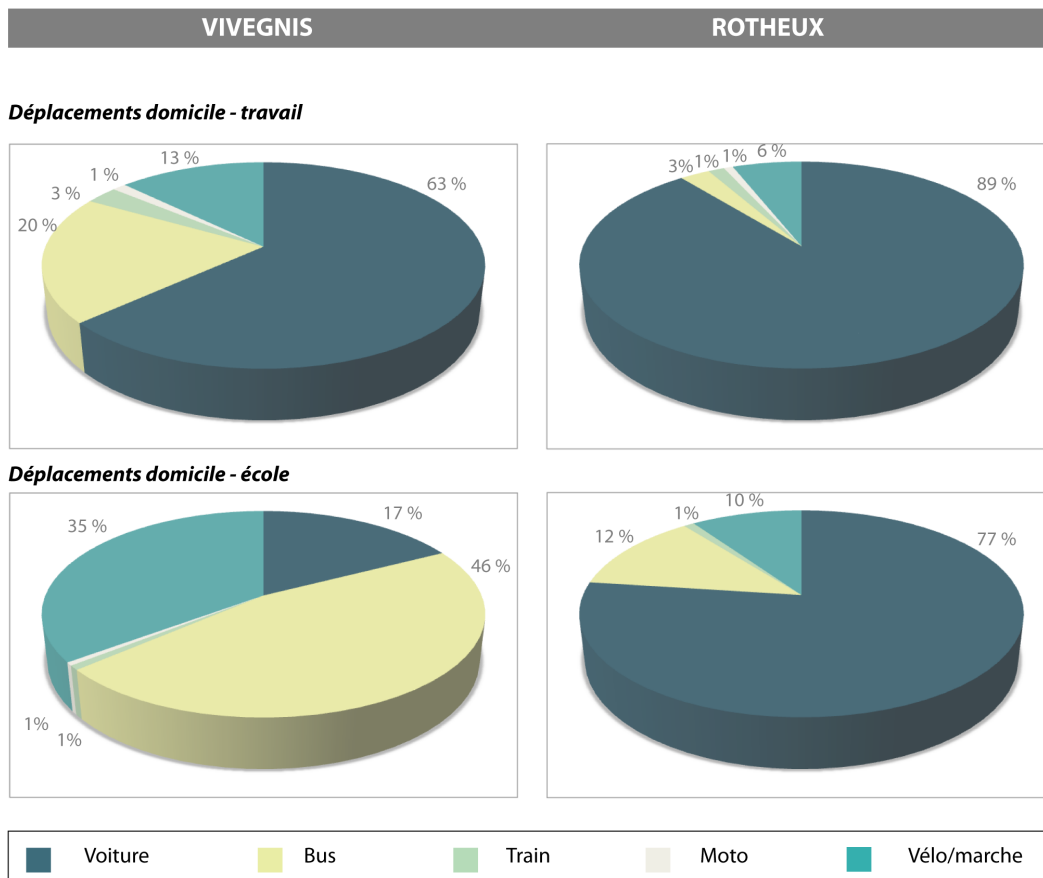


fig. 10: Tableau comparatif des répartitions modales de l'îlot de Vivegnis et de Rotheux en situation actuelle (source des données: ESE, 2001)

La voiture reste le moyen de déplacement privilégié de l'îlot périurbain de Rotheux, que ce soit pour les trajets vers le travail ou vers l'école, avec une très faible part de déplacements effectués à vélo ou à pied. Bien que la voiture soit également très présente pour les déplacements domicile-travail de l'îlot de Vivegnis, sa part modale diminue fortement pour les déplacements vers l'école, au profit des parts des transports en commun et des modes doux qui augmentent ainsi considérablement.

Ces observations sont à mettre directement en relation avec l'accessibilité au transport public, qui est très forte à Vivegnis et, à l'inverse, très faible à Rotheux, et avec la distance à parcourir, en moyenne, par les habitants, particulièrement pour accéder à l'école. On constate que les habitants de Vivegnis parcourent en moyenne 3,9 km pour rejoindre l'école, contre 9,7 km pour les habitants de Rotheux. Cela explique pourquoi la part des modes doux reste particulièrement faible à Rotheux (10%), alors qu'elle est plus importante que la voiture à Vivegnis (35%) en ce qui concerne les déplacements domicile-école. Les distances moyennes pour les trajets vers le lieu de travail sont de 16,7 km en centre-ville contre 22 km en zone périurbaine.

À partir de l'IPE calculé grâce aux données statistiques et aux facteurs de consommation donnés plus haut, on obtient la consommation annuelle en le multipliant par le nombre de travailleurs/écoliers, et le nombre de trajets par an. Le premier est donné par les statistiques. Pour le second, on considère ici 48 semaines de travail sur l'année, 5 jours par semaine (480 trajets sur l'année). Quant au déplacement domicile-école, il est plus difficile de quantifier le nombre de trajets puisque les statistiques ne font pas de différenciation dans la répartition scolaire entre maternel, primaire, secondaire et supérieur. On se basera alors sur le calendrier académique de la fédération Wallonie-Bruxelles qui donne la valeur de 180 jours scolaires (360 trajets sur l'année).

Le tableau ci-dessous présente la consommation énergétique (énergie primaire) obtenue pour la situation initiale, basée sur les données statistiques, dans le cas de l'îlot de Rotheux et de l'îlot de Vivegnis. La première colonne représente la consommation annuelle relative à un écolier (ou à un travailleur), calculée directement par la méthode, qui permet de faire la comparaison directe entre les deux îlots en ce qui concerne les consommations liées au transport (exprimée en kWh/écolier.an ou kWh/travailleur.an). On déduit la consommation annuelle à l'échelle de l'îlot considéré en multipliant cette valeur par le nombre d'écoliers (ou de travailleurs) habitant l'îlot (exprimée en kWh/an), présentée dans la deuxième colonne. La consommation annuelle de l'îlot est ensuite divisée par le nombre total d'habitants de celui-ci, toutes personnes confondues, de façon à obtenir une valeur représentative de la demande énergétique globale de l'îlot pour le transport, qui pourra alors être comparée à celle liée au bâtiment (exprimée en kWh/personne.an). La consommation annuelle par personne de l'îlot est reprise dans la troisième colonne.

	Conso annuelle pour 1 travailleur/écolier	Conso annuelle pour l'ensemble de l'îlot	Conso annuelle ramenée à une personne quelconque de l'îlot
ROTHEUX			
Déplacement: Domicile-travail	5.727 kWh/travailleur.an	263.442 kWh/an	1.745 kWh/personne.an
Déplacement: Domicile-école	1.851 kWh/écolier.an	57.391 kWh/an	380 kWh/personne.an
Total des déplacements		320.833 kWh/an	2.125 kWh/personne.an
VIVEGNIS			
Déplacement: Domicile-travail	3.866 kWh/travailleur.an	158.526 kWh/an	881 kWh/personne.an
Déplacement: Domicile-école	424 kWh/écolier.an	11.883 kWh/an	66 kWh/personne.an
Total des déplacements		170.409 kWh/an	947 kWh/personne.an

tab. 11: Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux en situation initiale

L'îlot de Vivegnis compte 180 personnes, et celui de Rotheux seulement 151. Malgré cela, on constate que la consommation annuelle globale pour le transport à Rotheux (320.833 kWh/an) est quasiment le double de celle à Vivegnis (170.409 kWh/an).

On remarque cependant qu'il y a proportionnellement moins de travailleurs et d'écoliers à Vivegnis (environ respectivement 22,5 % et 15 % de la population) qu'à Rotheux (environ 33 % et 21 % de la population), ce qui justifie, en partie, la plus faible dépense énergétique de l'îlot de Vivegnis. Mais la raison prédominante de cet écart important trouve son explication dans les observations faites plus haut par rapport aux distances à parcourir pour rejoindre l'école ou le lieu de travail, dans la répartition modale et dans les facteurs de consommation, propres à chacun des deux îlots. Tous ces facteurs sont illustrés à travers la valeur de la consommation énergétique annuelle d'un écolier ou d'un travailleur. Ainsi, la consommation d'un travailleur de Vivegnis représente 68 % de celle d'un travailleur de Rotheux, et la consommation d'un écolier vaut 23 % d'un équivalent à Rotheux. Ce dernier chiffre met en évidence l'importance que peut avoir la possibilité de prendre un transport en commun ou d'utiliser les modes doux pour se rendre à l'école comme c'est le cas à Vivegnis, alors qu'à Rotheux la voiture reste le mode privilégié pour s'y rendre.

Enfin, la consommation annuelle par personne de l'îlot (toutes personnes confondues) permet de tenir compte de la consommation relative à un travailleur et à un écolier, et de la proportion de travailleurs et d'écoliers dans chacun des deux îlots.

On constate que la consommation relative au déplacement domicile-travail couvre une part beaucoup plus importante que celle relative au déplacement domicile-école, à l'échelle d'un îlot. La figure 11 de la page suivante représente les consommations annuelles par personne pour les deux déplacements étudiés, dans le cas de Rotheux et de Vivegnis.

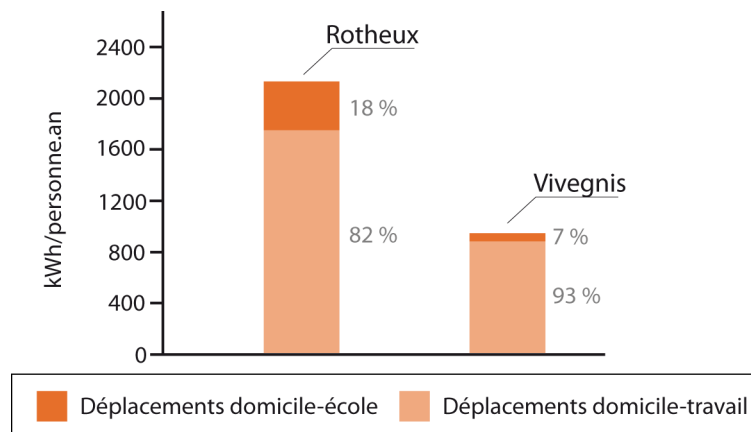


fig. 11 : Consommation annuelle en kWh/personne.an pour les déplacements domicile-travail et domicile-école, pour l'îlot de Vivegnis et de Rotheux

Afin de comparer l'influence des différents paramètres, on reviendra toujours à la consommation en kWh/personne.an pour le transport (les deux déplacements compris), de façon à voir quels paramètres permettront une réduction de la consommation globale en énergie pour le transport.

Les différents paramètres qui vont servir de variables sont des paramètres qui dépendent directement des personnes de l'îlot. Par exemple, nous savons que la réduction de 20 % des distances parcourues à Rotheux permet de diminuer les consommations de 20 % (Marique, 2013). Mais ce genre de facteur dépend de la localisation de l'îlot, et l'augmentation de la mixité fonctionnelle aux alentours n'est pas nécessairement à la portée d'action des habitants de l'îlot. Ainsi, nous n'étudierons que les facteurs relatifs aux habitudes des habitants, qui permettraient de diminuer les consommations.

1.3.2 Influence de l'utilisation du véhicule électrique

Il a été expliqué auparavant la différence entre les différentes voitures à moteur électrique et le destin qui se profilait pour chacune d'elle.

Il avait été conclu que pour le milieu urbain, où les déplacements sont généralement de courte distance, le véhicule à moteur électrique le plus propice à se développer est le petit véhicule léger, de 2 à 4 roues.

En milieu périurbain, c'est la voiture hybride rechargeable qui permettrait de se substituer à la voiture thermique. Dans le cadre de ce travail, nous ne ferons pas de distinction en faisant l'hypothèse que, pour un certain pourcentage des habitants, les distances parcourues se feront à l'aide d'un véhicule utilisant l'électricité.

La consommation électrique de ce type de véhicule varie principalement en fonction de la vitesse et de l'utilisation des auxiliaires. Ceux-ci, principalement liés au confort thermique, varieront donc selon la saison.

On estime qu'en condition normale, sans besoin particulier de chauffage et de climatisation, la puissance requise pour les auxiliaires est de 300 W. Elle est de 1000 W en condition hivernale ou estivale, et de 3000 W dans des conditions hivernales très froides (-5°C à l'extérieur).

La figure de la page suivante illustre cette dépendance, et les valeurs données font l'hypothèse d'une route sans pente. (Centre d'analyse stratégique, 2011).

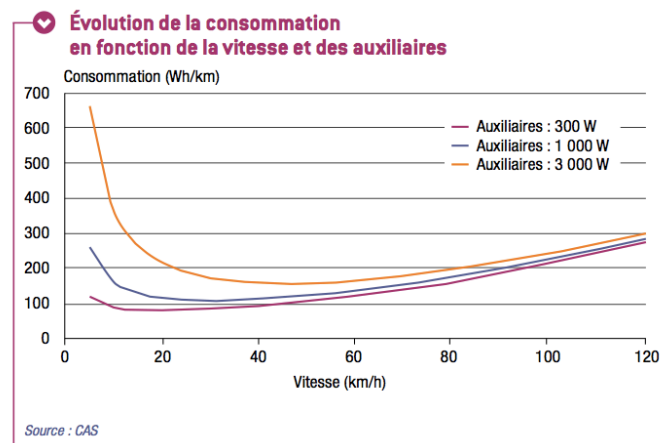


fig. 12: Influence de la vitesse et des auxiliaires sur la consommation électrique (source: Centre d'analyse stratégique, 2011)

La pente de la route, la circulation, les accélérations et freinages influencent également les consommations électriques. C'est pourquoi on se base généralement sur des consommations calculées sur cycle normalisé (vitesse moyenne de 33,6 km/h), correspondant à un parcours urbain suivi d'un parcours extra-urbain, sur autoroute (vitesse moyenne de 100 km/h) ou sur cycle urbain (vitesse moyenne de 18,8 km/h). La valeur de consommation électrique du véhicule pour chacun de ces cycles est reprise sur la figure ci-dessous.

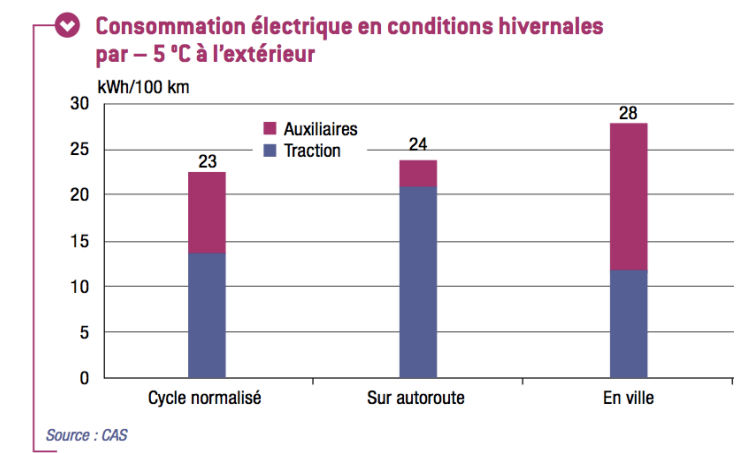


fig. 13: Consommations électriques des voitures électriques sur différents cycles (source: Centre d'analyse stratégique, 2011)

Les valeurs de la figure ci-dessus se placent en conditions hivernales extrêmes par -5°C à l'extérieur, avec une consommation des auxiliaires de 3000 W. Puisqu'on étudie ici la consommation sur l'année, il serait dès lors préjudiciable d'utiliser ces consommations. On tiendra compte d'une consommation de 1000 W pour les auxiliaires, de façon à tenir compte d'une certaine moyenne sur l'année. On obtient une consommation de 17,3 kWh/100km en ville, et 16,8 kWh/100km sur cycle normalisé. En terme d'énergie finale, la consommation est moindre que pour les voitures essence et diesel, qui consomment respectivement 71,6 kWh/100km et 67,2 kWh/100 km. En terme d'énergie primaire, tout dépend de l'origine de l'électricité qui alimente les véhicules ! Nous ne savons pas a priori s'il sera possible de produire sur place, et à partir d'énergie renouvelable, l'énergie électrique nécessaire aux véhicules.

Voilà pourquoi à ce stade, les consommations énergétiques, compte tenu de l'intégration des voitures électriques, seront calculées de deux façons. D'abord, les consommations seront calculées en faisant l'hypothèse que l'électricité provient du réseau, nécessitant donc un facteur de conversion en énergie

primaire de 2,5. Les facteurs de consommation en énergie primaire (Fm EP) utilisés sont repris dans le tableau ci-dessous.

Type de voiture	Fm (kWh/personne.km)	Fm EP (EP/personne.km)
Auto essence	0,57	0,57
Auto diesel	0,54	0,54
Auto électrique urbaine	0,14	0,35
Auto électrique périurbaine	0,13	0,325

tab. 12: Facteurs de consommation en énergie finale et en énergie primaire des véhicules électriques

Ensuite, les consommations seront calculées en faisant l'hypothèse que l'électricité nécessaire provient d'une énergie renouvelable in situ. Sous cette condition, l'énergie consommée par les voitures électriques peut donc être déduite de la consommation énergétique. À la fin de ce chapitre, nous serons capables de vérifier si la production d'électricité pour ces véhicules sur le site est possible ou non.

L'auto électrique est introduite dans les modes de transport, aussi bien pour les déplacements domicile-travail que domicile-école, en considérant une succession de répartitions différentes des voitures diesel, essence et électrique, pour mesurer son influence sur la consommation globale. La répartition est actuellement 45 % de voiture essence, et 55 % de voiture diesel, et les différents scénarios imaginés sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Scénario	DIESEL	ESSENCE	ELECTRIQUE
A (Situation initiale)	55 %	45 %	0 %
A1	(41,25 %)	33,75 % = $\frac{3}{4}$	(25 %) = $\frac{1}{4}$
A2	(27,5 %)	22,5 % = $\frac{1}{2}$	(50 %) = $\frac{1}{2}$
A3	(13,75 %)	11,25 % = $\frac{1}{4}$	(75 %) = $\frac{3}{4}$
A4	0%	0%	100 %

tab. 13 : Scénarios d'introduction des véhicules électriques

Les résultats sont repris dans les deux tableaux ci-dessous, correspondant aux deux hypothèses posées quant à l'origine de l'électricité alimentant les voitures. Le gain énergétique est exprimé en pourcentage d'énergie primaire économisée par rapport à la situation initiale.

Résultats obtenus selon l'hypothèse que l'électricité nécessaire à l'alimentation des voitures provient du réseau:

SCÉNARIO	A (situation initiale)	A1	A2	A3	A4
% auto élec.	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
ROTHEUX					
Total pondéré des dépl.	2.125 kWh/personne.an	-9,6 %	-19,3 %	-28,9 %	-38,5 %
VIVEGNIS					
Total pondéré des dépl.	947 kWh/personne.an	-7,7 %	-15,4 %	-23,1 %	-30,8 %

tab. 14 : Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux dans le cas de l'introduction des véhicules électriques alimentés par le réseau

Résultats obtenus selon l'hypothèse que l'électricité nécessaire à l'alimentation des voitures peut être déduite de la consommation, car elle est produite sur place avec une énergie renouvelable:

SCÉNARIO	A (situation initiale)	A1	A2	A3	A4
% auto élec.	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
ROTHEUX					
Total pondéré des dépl.	2.125 kWh/personne.an	- 23,3 %	- 46,7 %	- 70 %	- 93,3 %
VIVEGNIS					
Total pondéré des dépl.	947 kWh/personne.an	- 21 %	- 42 %	- 62,9 %	- 83,9 %

tab. 15: Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux dans le cas de l'introduction des véhicules électriques alimentés par de l'énergie renouvelable produite sur place

D'une manière générale, on constate que le gain est plus important à Rotheux qu'à Vivegnis. Encore une fois, cela est dû à la répartition modale qui diffère d'un îlot à l'autre. Puisque la voiture possède une part plus importante à Rotheux qu'à Vivegnis, il est normal que les variations de paramètres la concernant aient plus d'influence dans le premier cas.

Comme nous l'avons remarqué au chapitre 2, la voiture électrique alimentée par le réseau participe à l'augmentation globale de la demande du réseau, phénomène qu'il serait plutôt intéressant d'inverser. C'est pourquoi nous nous concentrons ici sur la possibilité de produire l'électricité nécessaire in situ, ce qui permet d'atteindre des diminutions de la consommation en énergie primaire extrêmement importantes.

Pour chacun des scénarios d'introduction de la voiture électrique, il est donc nécessaire de connaître la quantité d'électricité annuelle qu'il faut produire pour que ces gains énergétiques puissent être atteints.

Pour calculer cette valeur, on se base sur les statistiques pour connaître le nombre de km parcourus sur l'année, pour les deux types de déplacements étudiés, par mode de transport, en l'occurrence ici la voiture (pour l'ensemble de l'îlot). En fonction des différents scénarios, on en déduit la part des km qui sera parcourue par une voiture électrique. La consommation électrique à produire est alors calculée compte tenu de la consommation des véhicules, qui est de 0,168 kWh/km à Rotheux (cycle normalisé) et de 0,173 kWh/km à Vivegnis (cycle urbain). Ce calcul simplifié constitue évidemment une approximation puisque la consommation électrique dépend de beaucoup de facteurs et ne sera pas constante sur le trajet. Cependant, cela permet d'obtenir ce qui nous intéresse, c'est-à-dire un ordre de grandeur réaliste de la production électrique nécessaire. Ces valeurs sont reprises dans le tableau ci-dessous, pour chacun des scénarios imaginés.

	Km totaux /an en voiture	A1 (25%)		A2 (50%)		A3 (75%)		A4 (100%)	
		km/an	kWh/an	km/an	kWh/an	km/an	kWh/an	km/an	kWh/an
ROTHEUX									
Domicile-travail	451.762	112.941	18.974	225.881	37.948	338.822	56.922	451.762	75.896
Domicile-école	89.306	22.327	3.751	44.653	7.502	66.980	11.253	89.306	15.003
Total			22.725		45.450		68.175		90.899
VIVEGNIS									
Domicile-travail	247.453	61.863	10.702	123.727	21.405	185.590	32.107	247.453	42.809
Domicile-école	10.593	2.648	458	5.297	916	7.945	1374	10.593	1.833
Total			11.161		22.321		33.482		44.642

tab. 16 : Consommations électriques des véhicules électriques selon les différents scénarios d'introduction

Ces valeurs seront donc à comparer avec les résultats du pôle "énergies renouvelables". Lorsque la consommation des véhicules peut être prise en charge par l'îlot, l'utilisation de ceux-ci sera prise en compte dans le bilan. Notons que pour les consommations électriques utilisées dans le calcul, l'autonomie des véhicules est estimée à 97 km en zone urbaine, et 79 km en centre-ville (Centre d'analyse stratégique, 2011). Dans le cas des véhicules tout électriques, on peut donc faire l'hypothèse qu'ils seront rechargés systématiquement sur le lieu de production, aux heures creuses de la demande électrique des bâtiments. Cependant, dans ce travail, aucune distinction n'a été faite si par exemple le véhicule électrique est une voiture hybride rechargeable, dont l'autonomie en utilisation électrique est plus faible. En ville où les distances sont réduites, l'hypothèse reste valable. En zone périurbaine, cela demanderait de vérifier si les distances parcourues le permettent, en fonction du véhicule utilisé.

1.3.3 Intégration du tramway

Le tramway à Liège est un sujet d'actualité et il semble important d'en tenir compte dans cette étude. Le projet actuel renseigne un arrêt à moins de 500 mètres de l'îlot de Vivegnis, ce qui veut dire que l'on peut assurément l'intégrer dans le mix des modes de transport utilisés par ces habitants.

L'objectif du tram est double: désaturer le réseau de bus actuel en offrant un service de transports en commun structuré et de qualité, et induire un transfert modal de la voiture vers les transports en commun. Le tram possède de plus d'autres avantages tels qu'une capacité élevée, pas de pollution en cours d'utilisation, diminution du bruit des centres urbains, création d'espaces urbains, etc.

L'étude d'incidences sur l'environnement publiée en janvier 2013 nous informe des objectifs qui pourraient être atteints en imaginant la situation projetée, avec l'insertion de la ligne de tram: "La mise en place du tram couplée à la restructuration du réseau de bus qu'elle rend possible permettrait d'inciter 4 600 voyageurs par jour à quitter leur voiture pour utiliser le réseau TC pour tout, ou une partie de leur trajet". (Pissart & Stratec, 2013).

Cette étude explique par la suite que la situation projetée fait l'hypothèse d'un transfert modal de la voiture vers le tramway de 2%, soit l'équivalent de 4 400 voyageurs reportés, pour tout ou une partie de leur trajet, sur la ligne de tram (4 600 sur l'ensemble du réseau de transport en commun, bus et tram). De plus, une restructuration du réseau de bus en parallèle diminuera le nombre de bus.km (- 6492 bus.km/jour sur le périmètre de l'agglomération liégeoise). Cela permet d'éviter une concurrence inutile entre les transports en commun, et de profiter de la capacité et du confort du tramway (Pissart & Stratec, 2013).

Ces prédictions restent dans l'ensemble cependant peu précises et les hypothèses posées ne sont pas explicitement développées, ce qui rend ces données difficilement utilisables dans le cadre de ce travail. De plus, le report modal de la voiture vers les transports en commun attendu, de 2%, est donné sur l'ensemble de l'agglomération, alors qu'il sera très probablement beaucoup plus important dans le centre-ville, où se situe l'îlot de Vivegnis. Nous allons donc plutôt étudier nos propres hypothèses de transfert modal afin de mesurer l'impact du tramway.

Le tramway induit un transfert modal de la voiture vers les transports en commun, en améliorant la structure globale du réseau et le service des transports publics. Mais il a été observé que ce sont généralement les personnes qui utilisaient les bus auparavant, qui utilisent le tram lorsque celui-ci est introduit dans le réseau. Dans cette logique, le tram sera introduit ici dans la répartition modale en considérant le mode TC, qui ne contient plus seulement les bus, mais les bus et le tram, et on étudiera l'impact d'un transfert modal de la voiture vers ce mode TC.

Afin de tenir compte des facteurs de consommation qui diffèrent selon le mode de transport (bus ou tram), on tiendra compte d'une répartition générale entre les voyages parcourus par les transports en commun de 33 % en tram, et de 67 % en bus. Cette répartition est celle du réseau de transport en commun de Valenciennes, qui a déjà été comparée au futur réseau de Liège à plusieurs reprises.

Notons que nous n'investiguons ici que l'influence d'un report modal, sans considérer l'impact potentiel de celui-ci sur les distances moyennes parcourues.

Pour calculer la consommation relative au transport en tramway, nous avons besoin de déterminer le facteur de consommation relatif à celui-ci. La consommation par km et passager dépend d'un réseau de transport en commun à l'autre puisqu'il met en relation la consommation du véhicule avec son taux d'occupation. Or, ce type de donnée n'existe pas encore pour Liège, et nous devons nous baser sur d'autres réseaux existants. Nous nous baserons dans ce travail sur les valeurs données par la STIB (Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles), pour l'année 2006, à savoir (STIB, 2013):

- 70,8 millions de voyages en tram enregistrés
- Une consommation électrique de 67.691.113 kWh pour le tram
- En moyenne, un voyage avec la STIB est de 4,3 km.

Ces hypothèses ne semblent pas incompatibles avec la ville de Liège, sachant que le tracé complet de la ligne 1 sera de 19km. On pourrait penser que le taux d'occupation du tram dans la capitale sera plus important qu'à Liège, mais ces données tiennent compte de l'ensemble du réseau, y compris les zones périphériques. En ce qui concerne l'îlot de Vivegnis, il est en plein centre et proche du tram ; il y a sans doute beaucoup de chance que le taux d'occupation y soit plus élevé que dans certaines autres zones de la ville. L'hypothèse choisie est donc d'utiliser les valeurs de la STIB.

En divisant la consommation électrique (67.691.113 kWh) par le nombre de voyages enregistrés (70,8 millions), on obtient la consommation pour 1 passager. En divisant cette valeur par le déplacement moyen d'un voyage qui est de 4,3 km, on obtient un facteur de consommation de 0,22 kWh/km.passager, et un facteur de consommation en énergie primaire de 0,55 kWh/km.passager (facteur de conversion de 2,5). Ce dernier est donc presque équivalent à celui de la voiture (0,54 pour l'auto diesel et 0,57 pour l'auto essence) ! Comme ces valeurs découlent chacune de plusieurs hypothèses, on ne peut pas affirmer qu'un passager d'un tram consommera plus ou moins d'énergie primaire qu'une personne en voiture. Cependant, la proximité de ces deux valeurs permet de mettre en évidence l'importance de l'origine de l'énergie électrique alimentant le tram, considérée ici comme provenant du réseau. On peut en conclure également que le gain énergétique potentiel lié au tram provient essentiellement de la restructuration et de l'amélioration globale du réseau en transport en commun, incitant les gens à l'utiliser plus qu'auparavant.

Enfin, les différents reports modaux de la voiture vers le mode TC étudiés sont de 10 %, 20%, 30% et 50%. Pour mieux visualiser à quel transfert réel cela correspondant dans le cas de l'îlot de Vivegnis étudié, l'interprétation du report modal en terme de nombre de travailleurs (ou écoliers) est reprise dans le tableau ci-dessous.

	Déplacement domicile-travail	Déplacement domicile-école
B - Situation initiale	41 travailleurs (19 680 trajets) 26 travailleurs utilisent la voiture 8 travailleurs utilisent les TC 7 travailleurs utilisent un autre mode	28 écoliers (10 080 trajets) 5 écoliers utilisent la voiture 13 écoliers utilisent les TC 10 écoliers utilisent un autre mode
B1 - Report de 10 %	Transfert de 4 travailleurs du mode voiture au mode TC	Transfert de 3 écoliers du mode voiture au mode TC
B2 - Report de 20 %	Transfert de 8 travailleurs du mode voiture au mode TC	Transfert de 5 écoliers du mode voiture au mode TC
B3 - Report de 30 %	Transfert de 12 travailleurs du mode voiture au mode TC	/
B4 - Report de 50 %	Transfert de 21 travailleurs du mode voiture au mode TC	/

tab. 17 : Interprétation chiffrée du report modal de la voiture vers les transports en commun

Le tableau suivant présente les nouvelles consommations d'énergie primaire relatives aux différents scénarios de report modal, compte tenu de l'ensemble des hypothèses préalablement expliquées. De nouveau, le gain est exprimé en terme de pourcentage d'énergie primaire économisée par rapport à la

situation initiale. On considère simultanément les reports pour les déplacements domicile-travail et domicile-école, puis uniquement pour les déplacements domicile-travail au-delà du report de 20%.

SCÉNARIO	B (situation initiale)	B1	B2	B3	B4
Report modal	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
VIVEGNIS					
Déplacement: Domicile-travail	3.866 kWh/travailleur.an	- 7,7 %	- 17,7 %	- 27,8 %	- 47,9 %
Déplacement: Domicile-école	424 kWh/écolier.an	+ 4,5 %	- 7,3 %	- 7,3 %	- 7,3 %
Total pondéré des dépl.	947 kWh/personne.an	- 6,8 %	- 17,1 %	- 26,5 %	- 45,2 %

tab. 18 : Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis dans le cas d'un report modal de la voiture vers les transports en commun (tram et bus)

Le report modal de la voiture sur le mode TC est donc un moyen très efficace de réduire les consommations. Notons cependant qu'un report de 50 % est un peu extrême puisque cela suggère que presque l'entièreté des utilisateurs de la voiture utilise désormais les transports en commun, bus ou tram. Un report de 10 ou 20 % est cependant totalement envisageable.

Notons qu'il existe une conséquence non souhaitée de l'intégration du tram, qui n'est pas reprise dans le report modal considéré ci-dessous. Celui-ci, par sa capacité, sa rapidité et sa possibilité d'accueillir des vélos à bord, pourrait engendrer également un report modal des modes doux vers le mode TC. Ce phénomène tenderait donc à augmenter la consommation en énergie primaire liée au transport. Comme il n'est pas souhaité, et que l'intégration du tram doit faire en sorte d'offrir un maximum d'espace aux modes doux, nous n'en avons pas tenu compte ici.

Enfin, le gain énergétique lié au tram ne semble en définitive pas si intéressant qu'il n'y paraît étant donné que l'on travaille ici en énergie primaire. Pour s'en rendre compte, le point suivant investigate les scénarios de report modal de la voiture vers les transports en commun, en ne considérant cette fois-ci que le bus.

1.3.4 Influence d'un report modal de la voiture vers le bus

Les scénarios de report modal étudié ici sont un report de 10 % et de 20 %, simultanément sur les déplacements domicile-travail et domicile-école. Les reports supérieurs n'ont plus leur place ici puisqu'ils supposent une forte amélioration du réseau de transport public, qui n'est pas possible en ne tenant compte des bus uniquement. Le tableau ci-dessous reprend les gains énergétiques par rapport à la situation initiale. On constate donc que le gain en terme d'énergie primaire est plus important dans le cas présent, que lorsque le tram faisait parti du mode TC. Ces résultats démontrent l'influence importante d'un report modal. Si celui-ci est de 20%, les consommations énergétiques peuvent être diminuées quasiment de 25 % à Vivegnis.

SCÉNARIO	C (situation initiale)	C1	C2
Report modal	0 %	10 %	20 %
VIVEGNIS			
Déplacement: Domicile-travail	3.866 kWh/travailleur.an	- 11,3 %	- 22,5 %
Déplacement: Domicile-école	424 kWh/écolier.an	- 20 %	- 34,9 %
Total pondéré des dépl.	947 kWh/personne.an	- 11,9 %	- 23,4 %

tab. 19: Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis dans le cas d'un report modal de la voiture vers les transports en commun (bus)

Puisque le tram ne fait plus partie du mix des modes de transport, les scénarios de report modal peuvent être également étudiés pour l'îlot de Rotheux. Les résultats sont repris au tableau ci-dessous.

SCÉNARIO	C (situation initiale)	C1	C2
Report modal	0 %	10 %	20 %
ROTHEUX			
Déplacement: Domicile-travail	5.527 kWh/travailleur.an	- 3,6 %	- 7,1 %
Déplacement: Domicile-école	1851 kWh/écolier.an	- 1,1 %	- 2,4 %
Total pondéré des dépl.	2.125 kWh/personne.an	- 3,2 %	- 6,3 %

tab. 20: Consommation en énergie primaire liée au transport à Rotheux dans le cas d'un report modal de la voiture vers les transports en commun (bus)

On constate que le gain énergétique est moindre que dans le cas de l'îlot urbain. Pour le comprendre, il faut revenir aux facteurs de consommation des bus qui diffèrent de la zone urbaine à la zone périurbaine. Dans le premier cas, celui-ci est de 0,22 kWh/personne.an, ce qui le rend très intéressant par rapport à la voiture (0,54 et 0,57). En zone périurbaine, il atteint la valeur de 0,44 kWh/personne.an (taux d'occupation plus faible), ce qui rend la réduction énergétique moins importante, par rapport à la situation sans report modal. Puisque le gain induit par le report ne peut égaler celui obtenu à Vivegnis, nous devons penser à d'autres manières de réduire la consommation énergétique liée à la voiture. C'est ce que nous verrons au point suivant qui explore l'influence du covoiturage.

1.3.5 Influence du covoiturage sur les déplacements domicile-école

On peut aisément concevoir que plusieurs écoliers de chaque îlot résidentiel se rendent au même établissement scolaire. Dans le cas des déplacements domicile-travail, il est plus difficile d'admettre cette hypothèse, bien que le covoiturage pourrait se faire au moins sur une partie de la distance parcourue. On étudiera donc ici uniquement l'effet du covoiturage sur les déplacements domicile-école, en considérant des taux d'occupation moyens successifs de 1,5, 2, 2,5 et 3 personnes par véhicule. Les facteurs de consommation en énergie primaire calculés pour chacun des scénarios sont repris dans le tableau ci-dessous.

SCÉNARIO	D (situation initiale)	D1	D2	D3	D4
Taux d'occup	1,25	1,5	2	2,5	3
Fm EP essence	0,57	0,48	0,36	0,29	0,23
Fm EP diesel	0,54	0,45	0,34	0,27	0,22

tab. 21 : Influence du covoiturage sur le facteur de consommation en énergie primaire

À partir de ces nouveaux facteurs de consommation, les consommations énergétiques sont une nouvelle fois calculées. Pour chacun des scénarios, le gain sur l'énergie primaire est exprimé en pourcentage par rapport à la situation initiale. Ces résultats sont repris dans le tableau de la page suivante.

SCÉNARIO	D (situation initiale)	D1	D2	D3	D4
Taux d'occup	1,25	1,5	2	2,5	3
ROTUEUX					
Déplacement: Domicile-travail	5.727 kWh/travailleur.an	=	=	=	=
Déplacement: Domicile-école	1.851 kWh/écolier.an	- 14 %	- 31,8 %	- 42,7 %	- 51,2 %
Total pondéré des dépl.	2.125 kWh/personne.an	- 2,5 %	- 5,7 %	- 7,2 %	- 9,2 %
VIVEGNIS					
Déplacement: Domicile-travail	3.866 kWh/travailleur.an	=	=	=	=
Déplacement: Domicile-école	424 kWh/écolier.an	- 8 %	- 18,4 %	- 24,8 %	- 29,7 %
Total pondéré des dépl.	947 kWh/personne.an	- 0,5 %	- 1,3 %	- 1,7 %	- 2,1 %

tab. 22 : Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux dans le cas d'un covoiturage pour les déplacements domicile-école

L'influence du covoiturage est, logiquement, plus marquée à Rotheux qu'à Vivegnis. Cela est dû au fait que la voiture possède une part modale de 77 % à Rotheux, contre seulement 17 % à Vivegnis (pour les déplacements domicile-école). Les résultats obtenus permettent de conclure que le covoiturage est un moyen performant de réduire les consommations énergétiques, puisque la consommation annuelle d'un écolier peut être diminuée de 42,7 % à Rotheux et de 24,8 % à Vivegnis en doublant le taux d'occupation des voitures (scénario A3).

Cependant, le résultat qui nous intéresse ici est le gain obtenu au niveau de l'ensemble de l'îlot, illustré par la consommation énergétique de l'ensemble des deux déplacements étudiés pour tout l'îlot (travail et école), ramenée à une personne quelconque de l'îlot (kWh/personne.an). Les gains obtenus tiennent compte donc du fait que les déplacements domicile-école ne représentent qu'une faible part de la consommation liée au transport, comme nous l'avons vu précédemment. L'allure du gain énergétique, exprimé en kWh/personne.an est illustrée sur la figure ci-dessous.

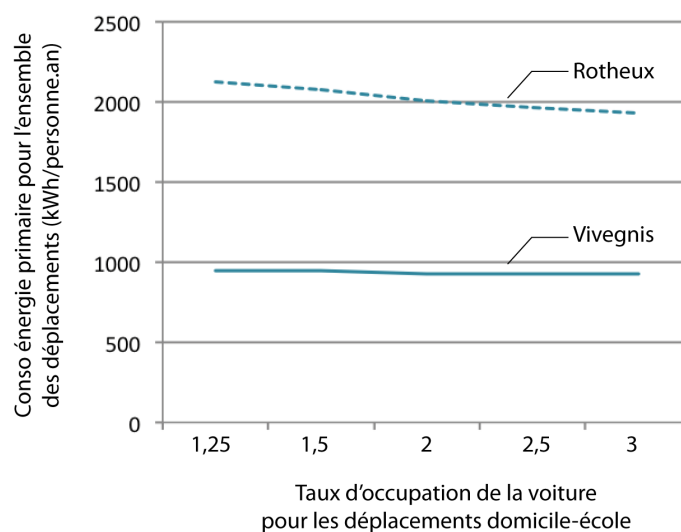


fig. 14: Influence du covoiturage pour les déplacements domicile-école sur la consommation d'énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux

On constate donc qu'à Rotheux, le covoiturage pour les déplacements domicile-école reste un moyen relativement efficace de diminuer la consommation énergétique liée au transport, puisque la consommation pour l'ensemble de l'îlot sera diminuée de 7,2 %, pour un scénario de taux d'occupation doublé.

À Vivegnis, en revanche, la faible part modale de la voiture couplée à la faible proportion des déplacements domicile-école dans le bilan, font que le gain, dans les mêmes conditions, ne sera que de 1,7 %.

Bien évidemment, aucun gain n'est négligeable ! Mais cela illustre le fait que le covoiturage n'est pas le moyen le plus efficace de diminuer les consommations dans le cas de l'îlot de Vivegnis, et qu'on privilégiera plutôt le report modal de la voiture vers le réseau de transport en commun, puisque la desserte est importante, et que le gain énergétique l'est aussi.

1.4 Conclusions

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque facteur influent étudié dans les paragraphes précédents (intégration des voitures électriques, intégration du tramway, report modal et covoiturage), un scénario de réduction de la consommation en énergie primaire plausible, afin de les comparer entre eux, et de choisir celui que nous allons garder pour la réalisation du bilan global.

GAIN SUR LA CONSOMMATION EN ÉNERGIE PRIMAIRE		
Scénario de réduction	ROTHEUX	VIVEGNIS
Covoiturage pour les déplacements domicile-école (2,5 personnes/voitures)	- 7,2 %	- 1,7 %
Report modal de 20 % des trajets en voiture vers les bus (pour les deux déplacements)	- 6,3 %	- 23,4 %
Report modal de 20 % des trajets en voiture vers les "bus + tram" (pour les deux déplacements)	/	- 17,1 %
100 % de voitures électriques (ce gain uniquement si production électrique sur site)	- 93,3 %	- 83,9 %

tab. 23 : Gain sur la consommation en énergie primaire obtenu pour les différents scénarios étudiés

D'un point de vue de la consommation en énergie primaire, l'intégration du tramway ne permet pas un gain aussi important que l'amélioration du réseau de bus. Mais le réel avantage du tram n'est pas dans le gain énergétique, mais plutôt dans la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Il permet également d'améliorer le confort des centres urbains puisqu'il ne pollue pas lorsqu'il est en fonctionnement, et permet une structuration plus forte du réseau de transport en commun.

Dans le cadre de cette étude, on préférera étudier le scénario d'un report modal vers les bus (sans tram), qui permet un gain plus important sur la consommation en énergie primaire.

Ce report modal a cependant peu d'impact à Rotheux, là où la voiture reste le principal mode de transport. Pour Rotheux, on utilisera plutôt le scénario de covoiturage sur les déplacements domicile-école, qui possède un impact plus important. Le scénario du report modal vers les bus ne sera donc utilisé que pour l'îlot de Vivegnis.

Enfin, on constate que l'intégration des voitures électriques permet un gain remarquable sur la consommation en énergie primaire, à condition que l'électricité nécessaire à leur alimentation soit produite sur le site. Ce scénario sera évalué pour l'îlot de Vivegnis et de Rotheux, compte tenu de la quantité d'électricité à produire pour chacun d'eux, calculée précédemment.

Notons que de nombreux scénarios peuvent être encore étudiés, comme l'intégration des bus hybrides, qui pénètrent de plus en plus dans le réseau des transports en commun. Il serait donc intéressant de réaliser une étude plus détaillée, en utilisant une autre méthode permettant plus aisément leur intégration.

2. Pôle bâtiments

2.1 Méthodologie

Il est intéressant, avant toute chose, de visualiser les parts relatives des différents postes énergétiques qui composent les maisons unifamiliales (voir figure ci-dessous). On voit clairement que l'importance de la consommation de chauffage sur le bilan global est prépondérante, puisqu'elle représente les $\frac{3}{4}$ de la consommation énergétique de la maison. Vient ensuite la consommation d'eau chaude sanitaire avec une part de 11 %, puis le poste électricité représentant 10 % de la consommation. Ce dernier comprend l'ensemble des appareils électriques, l'électroménager, les auxiliaires et l'éclairage. Notons que cette répartition représente une moyenne sur tout le stock bâti existant, et qu'elle ne concorde plus dès lors avec les nouvelles constructions d'aujourd'hui.

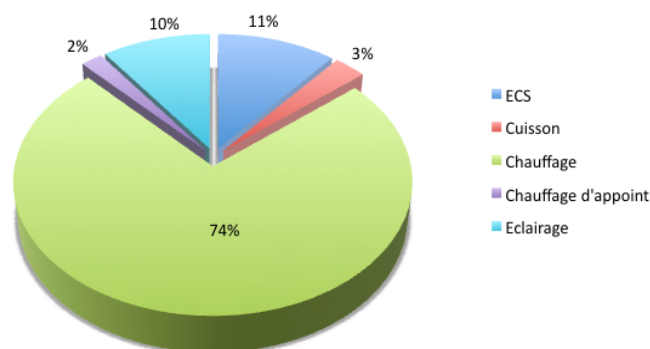


fig. 15: Parts relatives des postes énergétiques des habitations dans la consommation finale d'énergie (source: ICEDD, 2005)

L'ensemble des consommations liées au pôle habitation calculées dans ce travail sont reprises dans le tableau ci-dessous. Pour chacune d'elle, il est précisé la base de calcul qui sera utilisée. Les consommations découlent soit directement de la taille du ménage occupant l'habitation, soit de paramètres relatifs au bâtiment lui-même. Dans le deuxième cas, une typologie des bâtiments constituant l'îlot doit être mise en place.

CONSOUMATIONS	BASE DE CALCUL
Consommation de chauffage ¹⁵	Paramètres liés au bâtiment
Consommation d'ECS	Paramètres liés aux occupants
Consommations électriques	
Auxiliaires	Paramètres liés au bâtiment
Ventilation mécanique éventuelle	Paramètres liés au bâtiment
Appareils électriques, éclairage	Paramètres liés aux occupants
Cuisson ¹⁶	Paramètres liés aux occupants

tab. 24 : Bases de calcul des postes énergétiques des bâtiments évalués dans ce travail

Notons qu'en réalité, les consommations liées aux paramètres du bâtiment sont également influencées par les paramètres relatifs aux occupants à savoir le comportement humain et le mode de vie. Par exemple, la gestion optimale du thermostat permettrait de réduire considérablement les charges de chauffage, surtout

¹⁵ Les consommations liées au besoin en refroidissement ne sont pas évaluées ici, car elles peuvent être négligées en raison de notre climat. Le besoin en froid éventuel peut être résolu par une ventilation intensive, des protections solaires et des bonnes habitudes (Marique et al., 2012b)

¹⁶ On fait l'hypothèse d'une cuisson électrique.

dans le cas de bâtiments peu isolés, ainsi que la réduction de la zone chauffée de l'habitation lorsque la taille du ménage évolue. Le mode d'occupation est également très important, surtout lorsque les performances thermiques de l'enveloppe sont élevées. En effet, à niveau d'isolation donnée, plus le nombre d'occupants est élevé, plus l'impact des gains internes est important sur la consommation de chauffage. Il s'ensuit que si l'occupation d'une maison est inférieure à sa capacité, suite à l'évolution des modes de vie par exemple, la consommation de chauffage par mètre carré de la surface chauffée sera plus importante. Dans le cas d'un standard passif, l'exigence pourrait bien ne plus être atteinte (De Meester et al., 2013).

Cependant, bien qu'un comportement plus responsable permet d'améliorer le bilan énergétique global, c'est l'amélioration thermique du bâtiment qui aura le plus d'impact sur le bilan (De Meester et al., 2013). De plus, comme ces paramètres ne peuvent être généralisés et varient selon l'évolution du ménage, ils ne sont pas inclus dans le champ de l'étude réalisée ici.

La typologie choisie tient compte dans un premier temps de l'influence de la forme urbaine sur la consommation à travers le type de maison : maison 4 façades, 3 façades, ou maison mitoyenne. Il convient d'en tenir compte particulièrement dans ce travail de comparaison entre un îlot urbain et périurbain, puisque ces îlots sont constitués respectivement d'une majorité de maisons mitoyennes et de maisons 4 façades, la seconde catégorie étant plus énergivore que la première.

Une sous-typologie est ensuite réalisée pour tenir compte de la superficie de la surface de plancher chauffée, et du nombre de niveaux. Le détail de la typologie créée se trouve en annexe, avec la répartition des habitations des deux îlots dans chaque type et sous-type. Nous avons repris ci-dessous les résultats les plus intéressants, de façon à illustrer les grandes tendances de chacun de deux îlots.

D'abord, nous rappelons les pourcentages de maisons 4 façades, 3 façades et mitoyennes des deux îlots. Ensuite, nous présentons le pourcentage d'habitations correspondant à chaque sous-typologie, basée sur la superficie chauffée. A Vivegnis, ce sont les surfaces chauffées de 161 à 180 m² qui obtiennent le plus haut pourcentage, suivies de près par les surfaces chauffées entre 60 et 80 m². A Rotheux, ce sont celles de 261 à 280 m² qui dominent, puisqu'elles correspondent à ¼ des habitations.

	ROTHEUX	VIVEGNIS
<i>Typologie</i>		
Maisons 4 façades	76,4 %	7 %
Maisons 3 façades	20 %	17,5 %
Maisons mitoyennes	3,6 %	75,5 %
<i>Superficie chauffée (toute typologie confondue) en m²</i>		
Entre 60 et 80	3,6 %	17,5 %
Entre 81 et 100		15,8 %
Entre 101 et 120	16,4 %	10,5 %
Entre 121 et 140		12,3 %
Entre 141 et 160	12,7 %	14 %
Entre 161 et 180		19,3 %
Entre 181 et 200	10,9 %	
Entre 201 et 220	7,3 %	3,5 %
Entre 221 et 240	7,3 %	3,5 %
Entre 241 et 260		
Entre 261 et 280	25,5 %	
Entre 281 et 300	10,9 %	1,8 %
Plus de 300	5,5 %	1,8 %

tab. 25: Superficie chauffée des habitations de l'îlot de Rotheux et de Vivegnis

2.2 Hypothèses

Comme il a été expliqué au chapitre 1, ce travail prend le parti d'exiger une certaine rénovation énergétique préalable des bâtiments, avant d'envisager de tendre à un bilan zéro énergie grâce à la production in situ d'énergie renouvelable. Par rénovation énergétique, on entend ici précisément le fait de réduire la consommation énergétique globale de l'habitation, par la rénovation. L'efficacité énergétique d'un bâtiment dépend de nombreux facteurs, à savoir:

- Les paramètres propres au volume: sa compacité, son orientation, l'apport passif d'énergie solaire par les ouvertures,...
- La performance de son enveloppe: l'isolation thermique des parois, le type de vitrage, le pouvoir isolant du châssis, l'étanchéité à l'air, les ponts thermiques,...
- La performance des installations

L'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment par la rénovation est possible par l'augmentation des performances de son enveloppe et de ses installations énergétiques.

La réglementation en vigueur aujourd'hui concernant la performance énergétique des bâtiments est déterminée par la PEB. Elle tient compte de l'ensemble des facteurs influençant l'efficacité énergétique des bâtiments pour définir la réglementation suivante, appliquée depuis le 1er juin 2012:

	Valeurs U	Niveau K (isolation thermique)	Niveau E (performance à atteindre)	Climat intérieur
Bâtiments neufs ou assimilés	U_{\max} et/ou R_{\min}	K45	$E_W \leq 80$ $E_{\text{SPEC}} < 130$ kWh/m ² .an	Dispositif de ventilation et limitation du risque de surchauffe
Rénovation simple et importante	U_{\max} et/ou R_{\min} pour les éléments modifiés et neufs	/	/	Amenées d'air dans les locaux où les châssis de fenêtres ou de portes extérieurs sont remplacés

tab. 26: Réglementation PEB 2012 (source: SPW-DG04, 2013)

En ce qui concerne la rénovation, la PEB ne fournit pas de critère de consommation maximale ou de coefficient d'isolation thermique à respecter. Les critères des valeurs U_{\max} et/ou R_{\min} sont à respecter pour les éléments modifiés et neufs, mais pris seuls en considération, ils ne garantissent pas la performance énergétique du bâtiment.

L'efficacité énergétique peut également être définie par les standards basse énergie et très basse énergie qui visent respectivement un besoin net d'énergie de chauffage ≤ 60 kWh/ m².an (soit un K d'environ 30) et ≤ 30 kWh/m².an, bien qu'il n'existe pas de définition précise pour le second (De Meester, 2009). Ces standards sont une alternative à la réglementation de la PEB vis-à-vis de la rénovation, lorsque les objectifs à atteindre sont plus exigeants au niveau de la performance. Le standard le plus ambitieux aujourd'hui est le standard passif, dont les exigences sont les suivantes (Plate-forme Maison Passibe, 2013):

- Besoin net d'énergie de chauffage ≤ 15 kWh/m².an (entre K10 et K12)
- Étanchéité à l'air très performante: Taux de renouvellement d'air $\leq 0,6$ vol/h sous 50 Pa (test Blower Door)
- Pourcentage de surchauffe dans le bâtiment (plus de 25°C) inférieur ou égal à 5%
- Consommation en énergie primaire (chauffage, ECS et auxiliaires) ≤ 45 kWh/m².an (critère uniquement pour la Région de Bruxelles-Capitale)

En plus de ces standards, il y a les bâtiments zéro-énergie ou à énergie positive, qui utilisent les énergies renouvelables pour réduire le bilan de consommation d'énergie primaire du bâtiment.

Plus les objectifs de la rénovation sont ambitieux, plus les embûches à la réalisation, les limitations et les coûts sont évidemment importants.

La faisabilité de l'atteinte d'un niveau de rénovation élevé est à étudier au cas par cas, pour chacune des habitations, ce qui sort du cadre de cette étude. Cependant, il suffit de parcourir les "bâtiments exemplaires" présentés par l'IBGE pour se rendre compte qu'il est possible d'atteindre le niveau très basse énergie en rénovation, même pour des maisons mitoyennes relativement anciennes. Des exemples de rénovation passive existent également, mais sont moins nombreux, vu l'augmentation du coût et des difficultés engendrées. Une des conclusions d'une étude des interventions structurelles nécessaires à l'atteinte du standard passif relevait la question de la pertinence de ce type de rénovation, comparé aux difficultés des interventions structurelles à réaliser sur le bâtiment (notamment la suppression de tous les ponts thermiques), à partir d'une analyse de cas. A cette question, les avis divergent, à cause du temps de retour de l'investissement et de l'importance des difficultés rencontrées (Detroz, 2012). L'intérêt du travail ici sera d'apporter un élément supplémentaire à la discussion, en comparant le gain sur la consommation globale en énergie primaire de ce type de rénovation très poussé, par rapport aux gains apportés par d'autres méthodes.

Pour la suite de cette étude, nous ferons l'hypothèse de 4 stades de rénovation des bâtiments de l'îlot, dans le but de mesurer l'impact de différents scénarios de réduction de la demande en énergie pour le chauffage. Les besoins nets en énergie pour le chauffage sont équivalents, soit :

- Aux besoins d'un bâtiment neuf respectant les critères de la PEB
- Aux besoins déterminés par le standard basse énergie
- Aux besoins déterminés par le standard très basse énergie
- Aux besoins déterminés par le standard passif

La demande actuelle en énergie pour le chauffage est en moyenne de 235 kWh/m².an pour l'îlot de Rotheux, et de 184 kWh/m².an pour Vivegnis (valeurs calculées dans le cadre du projet SOLEN, Marique et al., 2013).

3.3 Résultats

3.3.1 Consommation d'énergie pour le chauffage

La consommation d'énergie finale pour le chauffage doit être déterminée selon le schéma ci-dessous. Nous devons donc commencer par déterminer les besoins nets.



fig. 16: Passage des besoins nets à la consommation en énergie primaire pour le chauffage (source: Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments)

Selon nos hypothèses sur la rénovation atteinte, nous avons les données suivantes, relatives à la consommation d'énergie pour le chauffage:

Rénovation	Données
Passive (P)	Besoin net en énergie de chauffage = 15 kWh/m ² .an
Très basse énergie (TBE)	Besoin net en énergie de chauffage = 30 kWh/m ² .an
Basse énergie (BE)	Besoin net en énergie de chauffage = 60 kWh/m ² .an
PEB (bâtiment neuf)	U_{max} et/ou R_{min} ; Max K45 ; $E_W \leq 80$; $E_{SPEC} < 130$ kWh/m ² .an

tab. 27 : Résumé des critères relatifs aux standards énergétiques et à la PEB

Dans les 3 premiers cas de rénovation, le besoin net en énergie de chauffage est fixé indifféremment pour tout type de bâtiment. On peut donc obtenir le besoins net en énergie pour le chauffage pour l'ensemble de l'îlot en multipliant la valeur déterminée par le standard (15, 30 ou 60 kWh/m².an) par le nombre total de mètres carrés chauffés pour l'ensemble de l'îlot.

Dans le cas d'une rénovation atteignant les objectifs fixés par la PEB pour les nouvelles habitations depuis 2012, le besoin net en énergie variera en fonction de plusieurs paramètres. En particulier, celui-ci variera en fonction du nombre de façades exposées à l'air extérieur, puisqu'à même niveau de performance thermique, une maison mitoyenne consommera moins qu'une maison 4 façades. D'autres paramètres influenceront la consommation, à savoir le type de ventilation utilisé et les apports internes et externes. Afin d'évaluer la demande de chauffage sur base de ces paramètres, nous faisons appel ici à l'outil SAFE¹⁷, développé, depuis 2009, conjointement par le LEMA (ULg) et Architecture et Climat (UCL) (Marique et al., 2012b).

Safe est un outil d'évaluation des consommations énergétiques pour le secteur résidentiel. Il permet notamment, sur base d'hypothèses et de simulations thermiques dynamiques avec le logiciel TAS d'un ensemble de bâtiments respectant une typologie donnée, d'évaluer la demande en énergie relative au chauffage de logements.

En particulier, pour le cas qui nous intéresse, Safe permet d'évaluer la demande de chauffage pour un bâtiment construit suivant la norme PEB actuel, selon les hypothèses suivantes:

- L'ensemble des parois répond au critère des U_{max}/R_{min}
- La ventilation est de type A (la ventilation mécanique n'est pas nécessaire à ce niveau d'isolation), et les débits sont déterminés sur base de la taille du logement
- Les gains internes sont définis selon la taille du logement (surface chauffée) et la fonction des pièces (puisque le nombre d'occupants varie). Ils prennent en compte tout ce qui est susceptible de fournir de la chaleur à l'intérieur (éclairage, TV, cuisson, etc.) et sont définis sur une journée, et constants le long de la semaine et de l'année. La modélisation des gains internes a été effectuée dans le logiciel TAS de façon la plus fidèle à la réalité, afin que l'on puisse se fier réellement à la demande de chauffage qui en découle en partie.
- Les gains externes sont définis selon la typologie du bâtiment (4, 3 ou 2 façades), en considérant un pourcentage de fenêtres établi d'après les différentes simulations.

Sur base de ces hypothèses, l'atteinte du niveau de performance $E_W \leq 80$ et $E_{SPEC} < 130$ kWh/m².an n'est pas garanti. Cependant, nous pourrions en tenir compte plus tard dans le volet consacré aux calculs des apports en énergie renouvelable.

La typologie établie précédemment permet donc la détermination de la demande en énergie de chauffage relative à chacun des types, pour la rénovation PEB. Les tableaux ci-dessous présentent les résultats obtenus pour chacune des sous-typologies, ainsi que la demande en énergie pour le chauffage global pour tout l'îlot, dans le cas de Vivegnis et de Rotheux.

¹⁷ SAFE : Suburban Areas Favoring Energy efficiency

VIVEGNIS					
RENOVATION PEB					
TYPLOGIE	S chauffée Moyenne	Nombre dans l'îlot	Besoins kWh/m ² .an	Besoins kWh/an	Besoins * % nbre dans l'îlot
<i>4 façades</i>					
60-80	70	4	86	6020	24080
<i>3 façades</i>					
81-100	88,3	3	63,2	5580,6	16741,7
121-140	128,5	2	57,1	7337,4	14674,7
161-180	174	2	51,0	8874,0	17748,0
221-240	222	2	48,7	10811,4	21622,8
281-300	296	1	48,7	14415,2	14415,2
<i>2 façades</i>					
60-80	71,2	6	48,4	3446,1	20676,5
81-100	95	6	46,3	4398,5	26391,0
101-120	115,5	6	44,4	5128,2	30769,2
121-140	134,8	5	42,4	5715,5	28577,6
141-160	146,6	8	41,5	6083,9	48671,2
161-180	173,3	9	39,0	6758,7	60828,3
201-220	206	2	37,0	7622,0	15244,0
>300	328	1	37,0	12136,0	12136,0
	135,56 m ²	57	48,01 kWh/m ² .an		352576 kWh/an

tab. 28 : Besoins nets pour le chauffage des bâtiments de Vivegnis suite à la rénovation PEB

ROTHEUX					
RENOVATION PEB					
TYPLOGIE	S chauffée Moyenne	Nombre dans l'îlot	Besoins kWh/m ² .an	Besoins kWh/an	Besoins * % nbre dans l'îlot
<i>4 façades</i>					
60-80	77,5	2	84,8	6572,0	13144,0
101-120	116,2	5	75,6	8784,7	43923,6
141-160	153,4	3	68,4	10492,6	31477,7
180-200	192	4	63,1	12115,2	48460,8
201-220	215,5	4	62,5	13468,8	53875,0
221-240	237,5	4	62,5	14843,8	59375,0
261-280	271	11	62,5	16937,5	186312,5
281-300	294,6	6	62,5	18412,5	110475,0
>300	329,3	3	62,5	20581,3	61743,8
<i>3 façades</i>					
101-120	111,5	4	58,5	6522,8	26091,0
141-160	153,3	3	53,3	8170,9	24512,7
180-200	186	2	50,1	9318,6	18637,2
260-280	260	2	48,7	12662,0	25324,0
<i>2 façades</i>					
141-160	150	1	41	6150,0	6150,0
260-280	260	1	37	9620,0	9620,0
	213,13 m ²	55	62,2 kWh/m ² .an		719122 kWh/an

tab. 29 : Besoins nets pour le chauffage des bâtiments de Rotheux suite à la rénovation PEB

On remarque plusieurs choses.

Pour une superficie chauffée donnée, par exemple entre 141 et 160 m², on constate que la demande en énergie de chauffage lorsqu'il s'agit d'une maison mitoyenne équivaut à 60 % de la demande de la même surface pour une maison 4 façades (respectivement 41 kWh/m².an et 68,4 kWh/m².an).

On observe également que pour un type de bâti donné, la demande en énergie de chauffage par m² diminue lorsque la superficie de la surface chauffée augmente. Cela est à mettre en relation avec la compacité du bâtiment et le rapport entre ses surfaces déperditives et son volume chauffé. Plus celui-ci est faible, plus les déperditions thermiques le sont également, ce qui tend à diminuer les besoins en énergie de chauffage.

Ces deux observations expliquent le fait que pour certaines typologies, le standard basse énergie peut être atteint par ce type de rénovation. À Rotheux, l'ensemble des maisons 3 façades et mitoyennes répond au critère de rénovation basse énergie avec une demande inférieure à 60 kWh/m².an, tandis que les maisons 4 façades ont des besoins compris entre 62,5 et 84,8 kWh/m².an. À Vivegnis, presque l'entièreté de l'îlot, composé majoritairement de maisons mitoyennes, répond au critère basse énergie, et va même plus loin puisque les besoins nets en énergie de chauffage avoisinent 45 kWh/m².an, soit une valeur intermédiaire entre le standard basse énergie et le standard très basse énergie. Seules les maisons 4 façades et les maisons 3 façades de plus petite superficie ont des besoins nets supérieurs à l'exigence du standard basse énergie.

Finalement, si on fait la moyenne, pondérée selon la typologie, des besoins nets en énergie de chauffage suite à la rénovation « PEB » des habitations des deux îlots, on obtient une valeur de 48 kWh/m².an pour Vivegnis, et 62,2 kWh/m².an pour Rotheux.

Sur base de ces résultats, on peut déterminer, pour chacun des deux îlots, et pour chaque type de rénovation, la demande nette annuelle en énergie de chauffage de l'ensemble des habitations :

Besoins nets	ROTHEUX	VIVEGNIS
PEB	719.122 kWh/an = 62,2 kWh/m ² .an	352.576 kWh/an = 48 kWh/m ² .an
BE	703.236 kWh/an = 60 kWh/m ² .an	463.596 kWh/an = 60 kWh/m ² .an
TBE	351.618 kWh/an = 30 kWh/m ² .an	231.798 kWh/an = 30 kWh/m ² .an
P	175.809 kWh/an = 15 kWh/m ² .an	115.899 kWh/an = 15 kWh/m ² .an

tab. 30 : Besoins nets en énergie de chauffage selon le type de rénovation pour les deux îlots

On peut également déterminer la demande en énergie de chauffage mensuelle, puisque celle-ci est répartie tout au long de l'année en fonction de la différence entre la température moyenne extérieure et la température moyenne intérieure. On fait appel à la notion de degré-jours (DJ) d'une période de chauffage, c'est-à-dire la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur multipliée par le nombre de jours de chauffe, afin de déterminer la courbe de la demande annuelle de chauffage.

La température moyenne extérieure est la moyenne arithmétique de la température de la nuit et de celle de la journée, pour tenir compte ainsi de l'inertie fournie par le bâtiment lui-même. La température moyenne intérieure est la température de confort de 18°C, dont on déduit généralement 3°C qui représentent le bénéfice des apports internes et externes. De plus, on considère que s'il fait 15°C dehors, nous sommes en dehors de la période de chauffe et le chauffage peut être interrompu. On parle dès lors de "degrés-jours en base 15/15" (Architecture et Climat, 2013).

Le tableau ci-dessous reprend les valeurs des DJ 15/15 normaux pour plusieurs villes de la Belgique (dont Liège), pour les différents mois de la période de chauffe. Ils ont été définis en 1998 sur base de 30 années d'études statistiques réalisées par l'IRM. Sur base de ce tableau, on peut dire que la période de chauffe "normale" à Liège est de 247 jours sur l'année. Notons que les demandes mensuelles sont basées sur une température de confort intérieure de 18°C avec une réduction par les apports internes de 3°C, peu importe que l'on soit en passif ou non. On ne tient pas compte ici du fait que la sensation de confort et la température

de confort intérieure dépendent de facteurs qui sont différents d'un cas à l'autre. Cette hypothèse pourrait être affinée.

Villes et Communes	DJ 15/15											Période de chauffe correspondante aux DJ 15/15		
	pour chaque mois											pour la période de chauffe	durée en jours	temp. ext. moyenne
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6			
Arlon		52	198	328	441	467	383	346	207	113	38	2573	278	5,7
Bruxelles (Uccle)		21	132	264	368	392	330	291	177	84	25	2084	250	6,7
Butgenbach	41	88	233	357	467	497	421	381	258	155	72	2970	263	3,7
Charleroi		37	158	284	391	410	347	308	204	109	45	2293	303	7,4
Chièvres		29	144	272	368	388	329	299	189	95	29	2142	297	7,8
Dinant		39	158	283	392	416	349	322	207	107	31	2304	263	6,2
Florennes		52	174	306	404	429	362	330	219	121	50	2447	314	7,2
Liège		16	130	256	364	388	325	288	168	72	12	2019	247	6,8
Middelkerke		38	138	261	360	391	339	319	222	136	61	2265	301	7,5
Namur		36	155	277	387	407	343	307	195	101	35	2243	263	6,5
Saint-Hubert	36	71	206	340	448	477	402	370	240	147	67	2804	281	5,0
Spa	59	110	254	390	499	533	454	434	303	192	94	3322	312	4,3

tab. 31: DJ normaux et période de chauffe normale pour la Belgique (Architecture et Climat, 2013).

Grâce au rapport entre les DJ de chaque mois à Liège et le nombre de DJ global sur l'année, nous avons déterminé les besoins nets mensuels en énergie pour le chauffage, pour chacun des stades de rénovation étudiés, et pour chacun des deux îlots. La figure ci-dessous présente l'allure de la courbe de chauffe dans le cas de Rotheux, pour la rénovation PEB. Nous reprenons en-dessous de celle-ci les valeurs chiffrées qui y correspondent. Ensuite, pour tous les autres cas, nous ne présentons ici que les valeurs chiffrées.

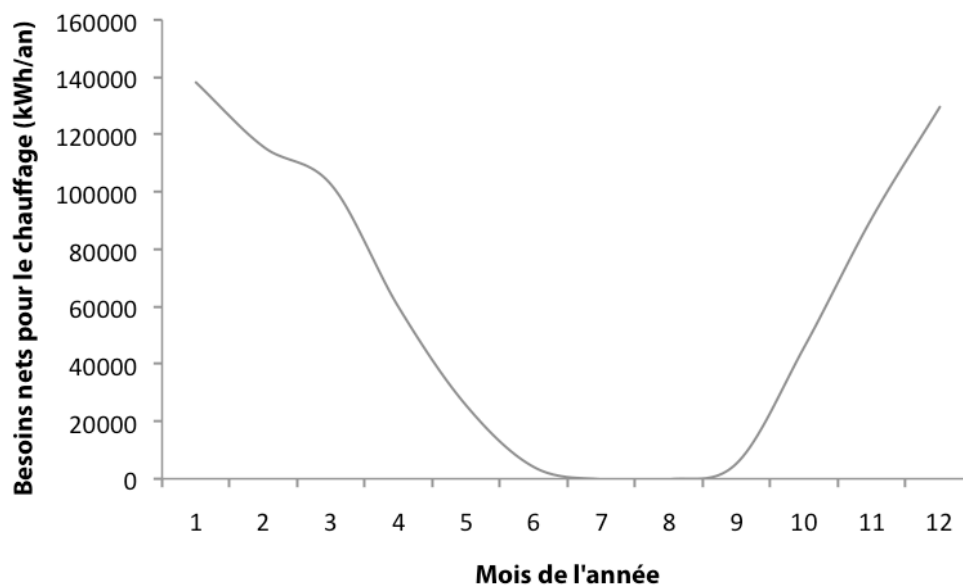


fig. 17: Besoins nets mensuels pour l'énergie de chauffage à Rotheux, rénovation PEB

	VIVEGNIS				
	PEB (kWh)	BE (kWh)	TBE (kWh)	P (kWh)	% des besoins annuels
Janvier	67.756	89.091	44.546	22.273	19,22
Février	56.754	74.625	37.313	18.656	16,10
Mars	50.293	66.130	33.065	16.532	14,26
Avril	29.338	38.576	19.288	9.644	8,32
Mai	12.573	16.532	8.266	4.133	3,57
Juin	2.096	2.755	1.378	689	0,59
Juillet	0	0	0	0	0
Août	0	0	0	0	0
Septembre	2.794	3.674	1.837	918	0,79
Octobre	22.702	29.850	14.925	7.463	6,44
Novembre	44.705	58.782	29.391	14.695	12,68
Décembre	63.565	83.580	41.790	20.895	18,03
Total	352.576 kWh/an	463.596 kWh/an	231.798 kWh/an	115.899 kWh/an	100

tab. 32: Besoins nets mensuels en énergie de chauffage pour l'îlot de Vivegnis

	ROTHEUX				
	PEB (kWh)	BE (kWh)	TBE (kWh)	P (kWh)	% des besoins annuels
Janvier	138.197	135.144	67.572	33.786	19,22
Février	115.758	113.200	56.600	28.300	16,10
Mars	102.579	100.313	50.157	25.078	14,26
Avril	59.838	58.516	29.258	14.629	8,32
Mai	25.645	25.078	12.539	6.270	3,57
Juin	4.274	4.180	2.090	1.045	0,59
Juillet	0	0	0	0	0
Août	0	0	0	0	0
Septembre	5.699	5.573	2.786	1.393	0,79
Octobre	46.303	45.280	22.640	11.320	6,44
Novembre	91.181	89.167	44.584	22.292	12,68
Décembre	129.649	126.784	63.392	31.696	18,03
Total	719.122 kWh/an	703.236 kWh/an	351.618 kWh/an	175.809 kWh/an	100

tab. 33: Besoins nets mensuels en énergie de chauffage pour l'îlot de Rotheux

A partir de ces besoins nets, on peut déduire les besoins bruts, sur base des rendements d'émission, de stockage et de distribution, donnés dans l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments¹⁸.

¹⁸ Les hypothèses sont un rendement d'émission de 0,89, et des rendements de stockage et de distribution de 1.

Besoins bruts	ROTHEUX	VIVEGNIS
PEB	808.002 kWh/an = 69,9 kWh/an.m ²	396.153 kWh/an = 53,9 kWh/an.m ²
BE	790.153 kWh/an = 67,4 kWh/an.m ²	520.894 kWh/an = 67,4 kWh/an.m ²
TBE	395.076 kWh/an = 33,7 kWh/an.m ²	260.447 kWh/an = 33,7 kWh/an.m ²
P	197.538 kWh/an = 16,9 kWh/an.m ²	130.223 kWh/an = 16,9 kWh/an.m ²

tab. 34: Besoins bruts en énergie de chauffage selon le type de rénovation pour les deux îlots

Le passage des besoins bruts à la consommation en énergie finale du chauffage nécessite de connaître le rendement de production.

Dans le cas où la production serait centralisée à l'échelle de l'îlot, nous ne sommes pas encore en mesure de la déterminer maintenant. Par contre, dans le cas d'une production décentralisée dans chaque bâtiment, on peut déterminer la consommation finale, sur base des rendements de production donnés dans l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments¹⁹.

Les systèmes de production exploitant les énergies renouvelables étudiés sont issus de la conclusion tirée du chapitre 2. Il sera intéressant cependant de les comparer à d'autres systèmes énergétiques qui n'exploitent pas les énergies renouvelables. On effectuera la comparaison ici avec une production au mazout pour l'îlot de Rotheux, et une production au gaz naturel pour l'îlot de Vivegnis. Le système de production étudié est une chaudière à condensation²⁰.

Consommations finales – Cas d'une production décentralisée

	ROTHEUX			VIVEGNIS	
	Chaudières Mazout	Chaudières Bois	PAC eau	Chaudières gaz	PAC eau
PEB	891.836 kWh/an = 76,1kWh/an.m ²	901.556 kWh/an = 76,9kWh/an.m ²	/ ²¹	473.486 kWh/an = 61,3kWh/an.m ²	208.927 kWh/an = 27kWh/an.m ²
BE	860.292 kWh/an = 73,4kWh/an.m ²	869.669 kWh/an = 74,2kWh/an.m ²	394.984 kWh/an = 33,7kWh/an.m ²	591.858 kWh/an = 76,6kWh/an.m ²	260.386 kWh/an = 33,7kWh/an.m ²
TBE	430.146 kWh/an = 36,7kWh/an.m ²	434.834 kWh/an = 37,1kWh/an.m ²	197.492 kWh/an = 16,9kWh/an.m ²	295.929 kWh/an = 38,3kWh/an.m ²	130.580 kWh/an = 16,9kWh/an.m ²
P	215.073 kWh/an = 18,4kWh/an.m ²	217.417 kWh/an = 18,6kWh/an.m ²	98.748 kWh/an = 8,4kWh/an.m ²	148.351 kWh/an = 19,2kWh/an.m ²	64.903 kWh/an = 8,4kWh/an.m ²

tab. 35: Consommations finales en énergie de chauffage selon le type de rénovation pour les deux îlots

¹⁹ Nous calculons ici les consommations finales par l'intermédiaire de l'Outil Safe, lui-même basé sur l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments.

²⁰ Pour la rénovation passive, les chaudières libèrent une puissance supérieure aux besoins de l'habitation, et on a généralement recouru à des systèmes de production locale pour chauffer le bâtiment. Cependant, du point de vue de la consommation en énergie primaire, la différence entre les deux n'est pas très importante, et ce qui nous intéresse c'est la diminution des besoins en énergie pour le chauffage par rapport aux autres standards, qui sera visualisée, peu importe le système de production mis en place.

²¹ La PAC ne peut être envisagée que pour un niveau basse énergie au minimum. Rappelons que la rénovation PEB à Vivegnis se situe entre la rénovation très basse énergie et basse énergie, donc la PAC peut être envisagée.

Pour la rénovation passive, la production par résistance électrique peut également être envisagée, car elle est intéressante d'un point de vue économique. On l'étudiera ici par comparaison aux autres systèmes de production, pour évaluer son impact sur la consommation en énergie primaire. La consommation finale est alors de **202.063 kWh/an** à Rotheux, et de **113.207 kWh/an** à Vivegnis (17,24 kWh/m².an).

La consommation en énergie primaire s'obtient en multipliant la consommation finale par le facteur de conversion, à savoir 1 pour le mazout, le gaz naturel et le bois, et 2,5 pour l'électricité.

3.3.2 Consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire

La consommation d'énergie finale pour l'eau chaude sanitaire doit être déterminée selon le schéma ci-dessous. Nous devons donc commencer par déterminer les besoins nets.



fig. 18: Passage des besoins nets à la consommation en énergie primaire pour l'ECS (source: Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments)

La demande en eau chaude sanitaire par habitation est relative au nombre de personnes constituant le ménage. Afin de connaître le besoin global pour les îlots étudiés, il nous faut comptabiliser le nombre de ménages par îlot, et le nombre de personnes les constituant.

En Région wallonne, la densité de population est de 205 habitants/km² et la taille moyenne des ménages de 2,32 personnes/ménage (Kints, 2008).

Dans le cadre de ce travail de comparaison entre un îlot urbain et un îlot périurbain, il ne serait cependant pas correct d'utiliser cette moyenne. Alors que la densité des bâtiments est beaucoup plus importante en centre-ville qu'en périphérie, le nombre de personnes vivant dans un logement est, lui, plus faible lorsque l'on se trouve en centre-ville. La taille moyenne des ménages doit être adaptée dans les deux cas. Les données de l'INS de 2001 nous donnent les valeurs de 1,86 personne/ménage pour l'îlot rue Vivegnis, contre 2,74 personnes/ménage à Rotheux.

Un autre élément qui diffère d'un îlot urbain à un îlot périurbain est le nombre de ménages dans chaque bâtiment d'habitation. En effet, les maisons mitoyennes de l'îlot rue Vivegnis, de principalement 2 ou 3 étages, sont parfois occupées aujourd'hui par plusieurs ménages. Cela n'est pas le cas à Rotheux où chaque maison est destinée à une unique famille. Le nombre de ménages par habitation en centre-ville est déterminé sur base de l'observation du nombre de sonnettes sur les portes des habitations. Cependant, on est face à un phénomène qu'il est difficile de maîtriser puisque la tendance à la suroccupation des habitations du quartier Saint-Léonard ne peut être évaluée précisément ici.

L'îlot de Rotheux compte 55 habitations, et donc 55 ménages. L'îlot de Vivegnis compte 57 habitations, pour, cette fois-ci, 97 ménages. Rappelons que la taille moyenne des habitations (surface chauffée) est d'environ 135 m² à Vivegnis (210 m² à Rotheux), et on observe que ce ne sont pas nécessairement les logements les plus grands qui accueillent le plus de ménages. Cela permet de mettre en évidence l'influence du comportement d'occupation de l'habitation sur les consommations, en comparant le cas où les habitations de Vivegnis sont occupées comme c'était le cas à l'origine et comme à Rotheux, c'est-à-dire un ménage par

habitation, et le cas relatif à la tendance actuelle où les maisons ont tendance à être divisées en plusieurs petits logements.

Compte tenu des tailles moyennes des ménages calculées ci-dessus, du nombre de ménages, et qu'en moyenne 1 personne a besoin de 35 litres/jour d'eau chaude à 60°C (Architecture et Climat, 2013) on obtient les besoins en énergie pour l'eau chaude sanitaire pour les deux îlots. Dans le cas de Vivegnis, nous étudierons la situation d'occupation actuelle des habitations, c'est-à-dire compte tenu du fait que plusieurs d'entre elles sont divisées en plus petites habitations (Vivegnis (1)); ainsi que la situation, fictive, où les habitations seraient occupées de la même manière qu'à Rotheux, c'est-à-dire qu'un seul ménage occupe l'ensemble de l'habitation (Vivegnis (2)).

Besoins nets	ROTUEUX	VIVEGNIS (1)	VIVEGNIS (2)
Nombre de ménages	55	97	97
Taille moyenne des ménages	2,74	1,86	2,74
Litres/personne par jour	35	35	35
m ³ /personne par jour	0,035	0,035	0,035
kWh/personne par jour (=m ³ * ΔT (= 50) * 1,163 ²²)	2,035	2,035	2,035
kWh/personne par an	742,87	742,87	742,87
kWh/ménage par an	2035,45	1381,73	2035,45
kWh/îlot par an	111.950	134.028	116.021

tab. 36 : Besoins nets en énergie pour l'eau chaude sanitaire pour les deux îlots

On constate donc que dans le cas de la situation actuelle à Vivegnis, les besoins relatifs à l'ECS sont plus élevés qu'à Rotheux, pour un nombre similaire d'habitations. Dans le cas d'un mode d'occupation de l'îlot de Vivegnis similaire à celui de Rotheux, les besoins sont logiquement équivalents.

L'évaluation des besoins mensuels se calcule en divisant la valeur annuelle par 12, puisque la demande reste constante toute l'année.

L'évaluation précise des besoins bruts d'ECS demanderait de connaître les longueurs de chaque conduite reliant la production au point de puisage, afin de connaître les pertes exactes de distribution. Cela n'est cependant pas réalisable pour l'ensemble des bâtiments qui composent les deux îlots. Nous nous baserons donc sur les valeurs par défaut données dans l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments, qui majorent les besoins nets d'environ 60 %.

Besoins bruts	ROTUEUX	VIVEGNIS
PEB, BE, TBE, P	179 120 kWh/an = 15,3 kWh/an.m ²	214.445 kWh/an = 27,75 kWh/an.m ²

tab. 37 : Besoins bruts en énergie pour l'eau chaude sanitaire pour les deux îlots

Comme dans le cas du chauffage, nous ne sommes pas en mesure ici de déterminer la consommation finale d'énergie dans le cas où la production serait centralisée. On peut la déterminer par contre pour le cas de la production décentralisée dans chaque bâtiment, pour les mêmes systèmes de production envisagés pour le chauffage (hypothèse d'une production de chauffage et d'ECS combinée), grâce aux rendements de production fournis par l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments.²³

²² facteur de conversion des calories en watts =1,163 (Architecture et Climat, 2013).

²³ Rendement de 0,45 pour un appareil à combustion, rendement de 0,7 pour un système électrique, rendement de 1,4 pour la pompe à chaleur.

Consommations finales – Cas d'une production décentralisée

	ROTHEUX			VIVEGNIS	
	Chaudières Mazout	Chaudières Bois	PAC eau	Chaudières gaz	PAC eau
PEB, BE, TBE, P	398.044 kWh/an = 33,9 kWh/an.m ²	398.044 kWh/an = 33,9 kWh/an.m ²	127.943 kWh/an = 10,9kWh/an.m ²	476.544 kWh/an = 61,7 kWh/an.m ²	153.175 kWh/an = 19,8 kWh/an.m ²

tab. 38 : Consommations finales en énergie pour l'eau chaude sanitaire pour les deux îlots

De nouveau, dans le cas d'une production électrique, la consommation finale serait de 255.886 kWh.an à Rotheux, et de **306.350 kWh/an** à Vivegnis.

Ce tableau met en évidence la différence entre Rotheux et Vivegnis, du point de vue de l'occupation des habitations. A Vivegnis, La consommation finale relative à l'eau chaude sanitaire prend de très grandes proportions par rapport à la consommation finale pour le chauffage. Cela conduit à penser que la tendance à la suroccupation des maisons de l'îlot de Vivegnis aura un impact sur la consommation globale en énergie primaire.

Pour rappel, la consommation en énergie primaire s'obtient en multipliant la consommation finale par le facteur de conversion, à savoir 1 pour le mazout, le gaz naturel et le bois, et 2,5 pour l'électricité.

3.3.3 Consommations électriques

La consommation électrique dans le secteur résidentiel (hors chauffage d'appoint, ECS et cuisson) provient des auxiliaires, de l'éclairage et des appareils électroménagers, suivant la répartition ci-dessous :

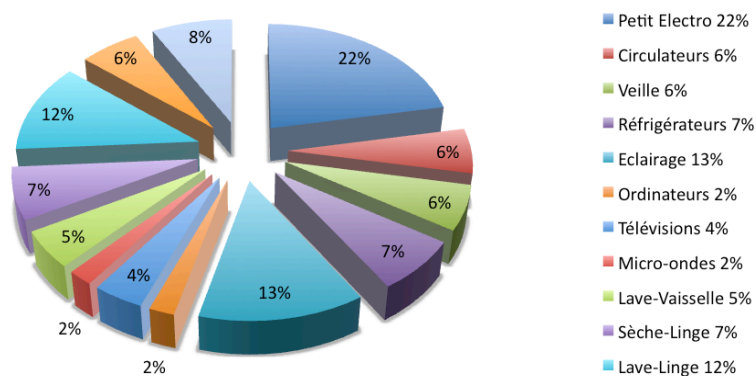


fig. 19: Consommations électriques (hors chauffage, ECS et cuisson) des ménages wallons (source: ICEDD, 2010b)

Selon le bilan énergétique du secteur résidentiel de 2008 de l'ICEDD, la consommation électrique moyenne (hors chauffage d'appoint, ECS, et cuisson) est de 2827 kWh/an par ménage (ICEDD, 2010b). Pour la part de la consommation relative à l'ensemble des appareils électroménagers, hors circulateurs, on obtient donc la valeur moyenne de 2657 kWh/an par ménage. Concernant la cuisson, on se base sur la répartition de la figure suivante, publiée par l'ICEDD pour le bilan de la même année, qui montre que la cuisson équivaut à 10% de la consommation globale. Cette dernière est de 4609 kWh/an par ménage. La consommation électrique relative à la cuisson est donc en moyenne de 461 kWh/an par ménage.

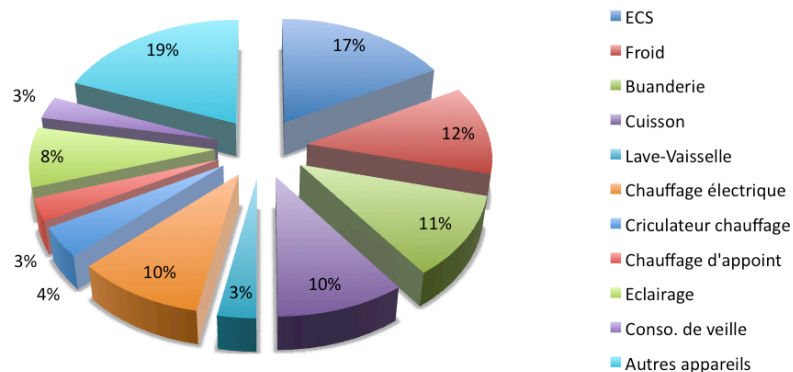


fig. 20: Répartition de la consommation électrique au sein des appareils électroménagers (source: ICEDD, 2010b)

On obtient donc une consommation électrique de 3118 kWh/an par ménage, pour l'ensemble des appareils électriques et la cuisson. Ces valeurs ne peuvent être déterminées ici plus précisément, car cela demanderait des informations supplémentaires sur le mode de vie des occupants.

La part de la consommation liée aux auxiliaires, c'est-à-dire l'ensemble des appareils électriques et ventilateurs qui assurent le fonctionnement des installations énergétiques, peut être évaluée de façon plus précise compte tenu du volume protégé des habitations, et de leurs besoins mensuels bruts en énergie de chauffage. Le calcul se base sur la formule donnée dans l'Annexe 1 du Décret Wallon de la performance énergétique des bâtiments. La consommation électrique d'un auxiliaire est donnée par:

$$Conso_{aux,mensuel}(kWh) = \frac{Besoins\ bruts\ du\ mois}{Besoins\ bruts\ annuels}(MJ) \cdot Conso_{elec,installation}(kWh)$$

Où "Conso_{électrique,auxiliaire} (kWh)" est déterminé en multipliant une valeur par défaut (relative à l'auxiliaire) par le volume protégé de l'habitation. L'ensemble des valeurs par défaut correspondant aux différents auxiliaires est fourni par l'Annexe 1, et nous les avons repris en annexe de ce travail. La consommation électrique mensuelle relative à l'ensemble des auxiliaires est obtenue en sommant les consommations calculées pour chaque auxiliaire.

Le volume protégé des habitations des deux îlots est déterminé sur base de la typologie réalisée au sein des deux îlots. Les besoins mensuels et annuels permettant le calcul ont été déterminés précédemment. Le détail des calculs est repris en annexe de ce travail, et nous reprenons ci-après les résultats finaux obtenus, pour chacun des deux îlots. Ils sont équivalents pour chacun des 4 scénarios de rénovation étudiés, puisque le rapport des besoins bruts mensuels sur les besoins bruts annuels ne varient pas (le rapport est fonction des degrés-jours). Les résultats seront différents dans le cas d'une production de chaleur située dans chaque bâtiment, et dans le cas d'une production centralisée à l'échelle de l'îlot, puisqu'il faut tenir compte alors des circulateurs supplémentaires.

	ROTHEUX	VIVEGNIS
Conso électrique auxiliaires ²⁴ si production de chaleur dans chaque bâtiment	36.905 kWh/an (671 kWh/an.habitation) = 3,15 kWh/m ² .an	28.272 kWh/an (496 kWh/an.habitation) = 3,66 kWh/m ² .an
Conso électrique auxiliaires si production de chaleur centralisée (circulateurs supp.)	43.945 kWh/an (799 kWh/an.habitation) = 3,75 kWh/m ² .an	33.630 kWh/an (590 kWh/an.habitation) = 4,35 kWh/m ² .an

tab. 39 : Consommation électrique annuelle des auxiliaires de l'îlot de Rotheux et de Vivegnis

Puisque le rapport entre les besoins bruts et les besoins annuels pour le chauffage varie tout au long de l'année, la consommation relative aux auxiliaires varient également. Les consommations électriques mensuelles relatives aux auxiliaires sont présentées ci-dessous, pour l'îlot de Rotheux puis pour l'îlot de Vivegnis.

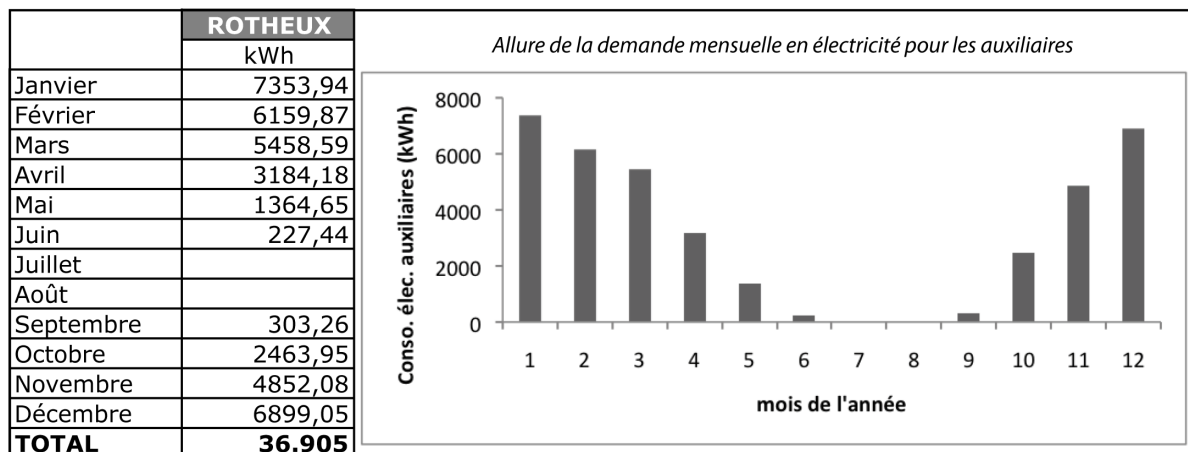


fig. 21 : Consommation électrique mensuelle des auxiliaires de l'îlot de Rotheux

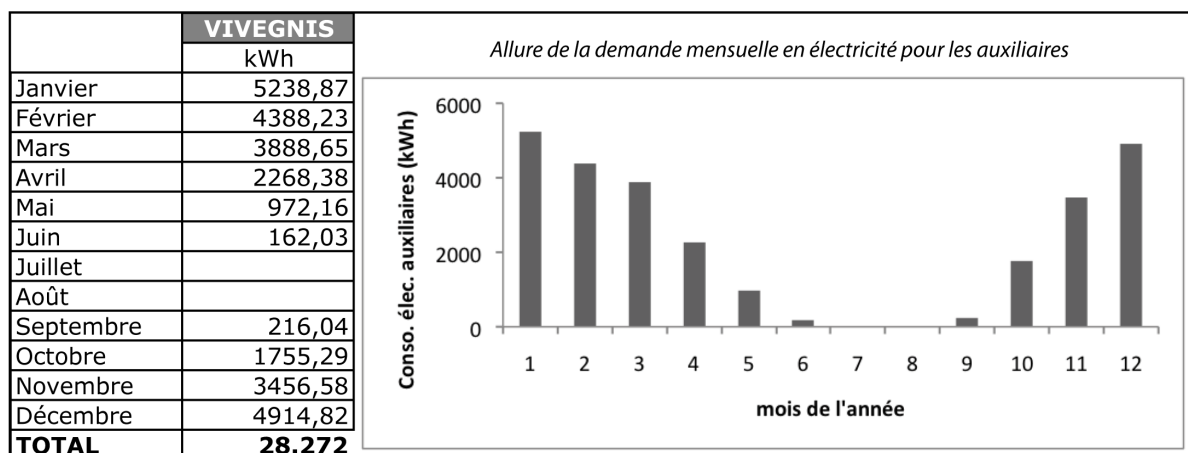


fig. 22 : Consommation électrique mensuelle des auxiliaires de l'îlot de Vivegnis

²⁴ Ne tient pas compte ici de la consommation d'électricité d'une éventuelle PAC.

Notons que dans le cas d'une rénovation passive ou très basse énergie, le chauffage par la ventilation est envisageable. Dans les autres cas, cela nécessiterait des débits trop importants. Il est décidé cependant dans le cadre de ce travail de ne pas tenir compte de ce type de chauffage.

La consommation électrique peut également provenir de la ventilation hygiénique. C'est un élément essentiel au confort et à la santé des occupants. Les systèmes sont la ventilation naturelle, la ventilation simple flux par pulsion mécanique, la ventilation simple flux par extraction mécanique et la ventilation mécanique double flux (système D) (Architecture et Climat, 2013).

La ventilation naturelle reste envisageable jusqu'à un niveau d'isolation +/- K30 (Marique et al., 2012b). Lorsque le niveau d'isolation augmente, l'hypothèse d'une ventilation naturelle ne peut convenir dans tous les cas. En effet, l'atteinte des standards énergétiques les plus ambitieux nécessite la constitution d'une enveloppe du bâtiment la plus étanche à l'air possible, dont la performance pourrait être ruinée par une ventilation non contrôlée. De plus, lorsque l'on cherche à atteindre un standard des plus performants, un système comme la ventilation mécanique double flux avec récupérateur de chaleur s'impose de façon à limiter les pertes par la ventilation, et ainsi participer à la réduction de la demande de chauffage.

Cependant, la ventilation mécanique double flux n'est pas toujours envisageable en rénovation. Elle nécessite une entrée et sortie d'air bien placées et l'intégration des conduites à travers l'ensemble du bâtiment. Nous avons imposé dans ce travail un niveau de rénovation à atteindre, et ce, à priori, peu importe la ventilation mise en place. L'électricité consommée par la ventilation mécanique double flux sera tout de même comptée ici comme si chaque habitation de niveau TBE et P en avait placé une pour aider à atteindre ses objectifs, de façon à se placer dans la situation où les consommations électriques sont maximales.

Notons que lorsque la ventilation est combinée à un puits canadien²⁵, la consommation liée au chauffage peut être réduite, et une ventilation naturelle en été peut être assurée. Cependant, il a été décidé de ne pas en tenir compte ici, car nous manquons d'informations neutres sur leur performance et leur mise en oeuvre (Architecture et Climat, 2013).

Le calcul de la consommation électrique des ventilateurs se base sur l'Annexe 1 du Décret wallon de la performance énergétique des bâtiments. La consommation mensuelle d'électricité (kWh) est calculée comme suit:

$$Conso_{elec.mensuelle} = (Longueur\ du\ mois.Puissance_{elec}) / 3,6\ Conso$$

La longueur du mois (en Ms) est donnée également dans l'Annexe. La puissance électrique moyenne du ventilateur est une valeur par défaut, fonction du type de ventilation et du type de ventilateur, qui se calcule sur base du volume protégé, lui-même déterminé à partir de la typologie mise en place. Les valeurs par défaut utilisées sont reprises en annexe, et nous ne présenterons ici que les résultats finaux. La consommation électrique annuelle pour la ventilation pour chacun des deux îlots est donnée ci-dessous, en fonction du type de ventilateur (moteur à courant continu, ou moteur à courant alternatif).

²⁵ Le puits canadien est un dispositif qui amène l'air extrait dans une conduite souterraine, profitant de la chaleur naturelle du sol pour préchauffer l'air par échange de chaleur en été, avant d'entrer dans la maison, ou pour le refroidir en hiver, permettant ainsi un chauffage ou un refroidissement passif (Architecture et Climat, 2013).

<i>Système D</i>	ROTUEUX	VIVEGNIS
Courant alternatif	72.393 kWh/an = 6,2 kWh/m ² .an	40.985 kWh/an = 5,3 kWh/m ² .an
Courant continu	46.208 kWh/an = 4 kWh/m ² .an	26.160 kWh/an = 3,4 kWh/m ² .an

tab. 40: Consommation électrique annuelle de la ventilation D de l'îlot de Rotheux et de Vivegnis

Les moteurs à courant continu sont équipés d'un dispositif de conversion. Ils existent depuis peu sur le marché, mais possèdent plusieurs avantages tels qu'un rendement supérieur à celui des moteurs à courant alternatif, moins d'entretien et moins d'usure mécanique (Architecture et Climat, 2013). Nous utiliserons donc cette valeur. Elle sera ajoutée aux consommations globales des deux îlots dans les cas de rénovation passive et très basse énergie. Les consommations mensuelles peuvent être obtenues en divisant la consommation annuelle par 12.

Notons que la consommation annuelle calculée de cette façon fait l'hypothèse que la ventilation est en marche en continu, en considérant une puissance moyenne. Encore une fois, le comportement et le mode de vie des occupants influenceraient ces consommations si on considérait que la ventilation est régulée en fonction de l'occupation, ce qui permettrait de diminuer fortement la consommation électrique liée au ventilateur.

La consommation en énergie primaire s'obtient en multipliant les consommations électriques par le facteur de conversion 2,5.

3.4 Conclusions

Le tableau suivant reprend les résultats obtenus pour les deux îlot

	Ilot périurbain: ROTHEUX	Ilot urbain: VIVEGNIS
DONNÉES		
Nombre d'habitations	55	57
Nombre de ménages	55	97
Taille moyenne du ménage	2,74 personnes	1,86 personnes
Nombre d'habitants	151	180
Superficie de l'îlot	120.236 m ² (12,02 ha)	9.692 m ² (0,97 ha)
Densité bâtie de l'îlot (toute surface bâtie comprise, sauf annexes)	6390 m ² bâti au sol/ha (5%)	3619 m ² bâti au sol/ha (37%)
Densité d'habitations	4,57 habitations/ha	58,8 habitations/ha
Densité de ménages		
Superficie chauffée moyenne par habitation	213 m ²	136 m ²
Superficie chauffée totale	11.721 m ²	7.727 m ²
Type d'habitations		
4 façades	76,4 %	7 %
3 façades	20 %	17,5 %
2 façades	3,6 %	75,5 %
CONSOMMATIONS EP POUR LE TRANSPORT		
Initialement	320.833 kWh/an	170.409 kWh/an
Scénario de réduction choisi	297.772 kWh/an	130.572 kWh/an
Intégration des VE ²⁶	21.499 kWh/an	27.444 kWh/an
BESOINS BRUTS DE CHALEUR		
Chauffage: Initialement	2.754.341 kWh/an	1.421.694 kWh/an
Chauffage: rénovation PEB	808.002 kWh/an	396.153 kWh/an
Chauffage: rénovation BE	790.153 kWh/an	520.894 kWh/an
Chauffage: rénovation TBE	395.076 kWh/an	260.447 kWh/an
Chauffage: rénovation P	197.538 kWh/an	130.223 kWh/an
ECS	179.120 kWh/an	214.445 kWh/an
CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES		
Appareils + Cuisson	171.490 kWh/an	302.446 kWh/an
Auxiliaires	36.905 kWh/an (43.945 si production de chaleur centralisée sur l'îlot)	28.272 kWh/an (33.630 si production de chaleur centralisée sur l'îlot)
Ventilation (P et TBE)	46.208 kWh/an	26.120 kWh/an
Voitures électriques	90.899 kWh/an	44.642 kWh/an

tab. 41 : Résumé des caractéristiques et des consommations énergétiques des deux îlots

²⁶ VE = Voitures électriques

La performance énergétique du bâtiment atteinte par la rénovation (et donc les besoins nets en énergie de chauffage) conditionne directement le choix des installations de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire, à plusieurs niveaux:

- *La question de la rentabilité financière*

Certaines installations exploitant les énergies renouvelables demandent un surinvestissement qui ne pourra être amorti sur la durée de vie de l'installation, lorsque les besoins atteints deviennent très faibles. Il importe donc de choisir l'installation énergétique qui répondra le mieux aux besoins, mais qui sera également économe financièrement, tout en favorisant la diminution de consommation d'énergie primaire et des émissions de gaz à effet de serre. Les conclusions décrites dans les deux prochains paragraphes sont tirées d'une analyse écologico-économique, réalisée pour différents systèmes énergétiques en considérant le cas d'une maison avec des besoins équivalents à 15, 30, 45, 60 et 120 kWh/m².an, d'un point de vue économique, de consommation en énergie primaire (EP) et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) (Massart & De Herde, 2010).

Dans le cas du standard passif, on peut imaginer le "tout électrique", du point de vue économique, est l'optimum. Par contre, du point de vue de la consommation d'énergie primaire, ce type d'installation devient dénué de sens, sauf si l'électricité provient d'une énergie renouvelable. Avec les pompes à chaleur, on se trouve dans le cas où l'investissement de départ n'est pas économiquement intéressant. Une solution intéressante d'un point de vue financier et consommation d'EP est la chaudière au gaz, mais le taux d'émission de GES est défavorable. Les systèmes au bois sont intéressants, du point de vue économique et environnemental, que ce soit une chaudière au bois ou des poêles permettant la production d'ECS, combinés à un boiler gaz pour l'été (moins intéressant si boiler électrique).

Pour les rénovations basse énergie, le "tout électrique" n'est plus une solution intéressante économiquement, mais peut l'être éventuellement dans le cas des rénovations très basse énergie. Les pompes à chaleur deviennent envisageables, mais leur performance par rapport à la consommation d'énergie primaire dépend fortement de leur COP annuel. Pour les COP les plus faibles, la chaudière à gaz est une meilleure solution de ce point de vue, mais les émissions de GES augmentent fortement avec la consommation. De nouveau, la chaudière au bois se positionne assez bien du point de vue de ces trois facteurs (mais pas les poêles dont le rendement est plus faible).

Notons que la possibilité de centraliser la production de chaleur à l'échelle urbaine est un moyen de diminuer l'investissement global par habitation de l'installation, à condition toutefois que cette centralisation soit envisageable.

- *La question de la globalisation de la production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire*

Alors que la diminution des besoins pour le chauffage permet aux émetteurs de fonctionner à des températures réduites, le régime de température de l'ECS, lui, ne diminue pas. Il faut garder cette constatation à l'esprit, notamment avec la centralisation de la production de chaleur à l'échelle de l'îlot, qui sous-entend que celle-ci doit couvrir le maximum des besoins en chaleur pour être rentable, donc de combiner les besoins en ECS et pour le chauffage (MATRIciel, 2010).

- *La question de la centralisation de la production de chaleur à l'échelle de l'îlot*

Comme nous l'avons déjà dit au chapitre 2, la rentabilité d'un réseau de chaleur, engendré par la centralisation de la production de chaleur, possède un seuil de densité énergétique, en dessous duquel il n'a plus d'intérêt. Maintenant que nous connaissons les besoins bruts en chaleur de chacun des deux îlots, pour chaque scénario de rénovation, nous sommes en mesure de vérifier le critère de rentabilité. C'est ce que nous allons voir au pôle "énergies renouvelables".

3 Pôle énergies renouvelables

Sur base des besoins bruts en énergie de chauffage et d'ECS évalués au point précédent, nous sommes maintenant capables d'estimer la pertinence de la centralisation de la production de chaleur, et de l'installation d'une unité de cogénération. Que ce soit dans le cas de l'un ou de l'autre îlot, l'étude de faisabilité doit être effectuée au cas par cas, et dépend de nombreux facteurs que nous ne sommes pas en mesure de connaître ici. Nous allons tout de même, de manière plus simplifiée qu'une étude de faisabilité, estimer la pertinence de leur installation dans les deux cas qui nous occupent.

Ensuite, on évaluera le potentiel photovoltaïque, le potentiel solaire et le potentiel éolien. Les deux premiers seront étudiés pour chacun des deux îlots, alors que le potentiel éolien ne sera évalué qu'à Rotheux, comme il en a été conclu à l'issue du chapitre 2.

3.1 Pertinence du réseau de chaleur

On a vu que la littérature définissait un seuil de densité énergétique, en dessous duquel l'installation du réseau n'est plus intéressante. Ce critère permet d'approcher la notion de viabilité du réseau, en fonction de la demande de chaleur propre à l'îlot considéré. Ce critère de rentabilité varie d'une source à l'autre. Il est fixé, par exemple, à 2000 kWh/m linéique de réseau, par année, sur base d'une étude de réseaux de chaleur existants en France et du prix moyen, par mètre courant, de l'installation (Pacot & Reiter, 2012). L'IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement) a publié un critère de rentabilité, moins contraignant, de 1500 kWh/m linéique (MATRIciel, 2010). Quant aux nouveaux réseaux de chaleur mis en place ces dernières années, on observe que l'on peut atteindre jusqu'à 1000 kWh/m linéique (Le Dû, 2012). Pour la suite du travail, on se basera sur le critère d'une densité énergétique ≥ 2000 kWh/m linéique de réseau, par année.

Le réseau de chaleur se situe en voirie, et dessert les maisons de part et d'autre de celle-ci. Dans le cas contraire, la rentabilité du système le rendrait très vite inintéressant. Ce travail ne s'intéresse qu'à l'îlot, mais de façon à tenir compte de ce fait, on estime que la moitié des charges du réseau seront reprises par les maisons situées aux frontières. Par une vision de l'esprit, on divise donc le réseau en deux parties : une moitié des pertes du réseau doit être reprise au minimum par l'îlot, et on fait l'hypothèse que l'autre moitié est reprise par les maisons voisines. Cette hypothèse simplificatrice nous permet de nous affranchir des questions concernant la consommation des maisons voisines, en considérant dès lors un critère de rentabilité de 1000 kWh/m linéique de réseau, par année, pour l'îlot considéré.

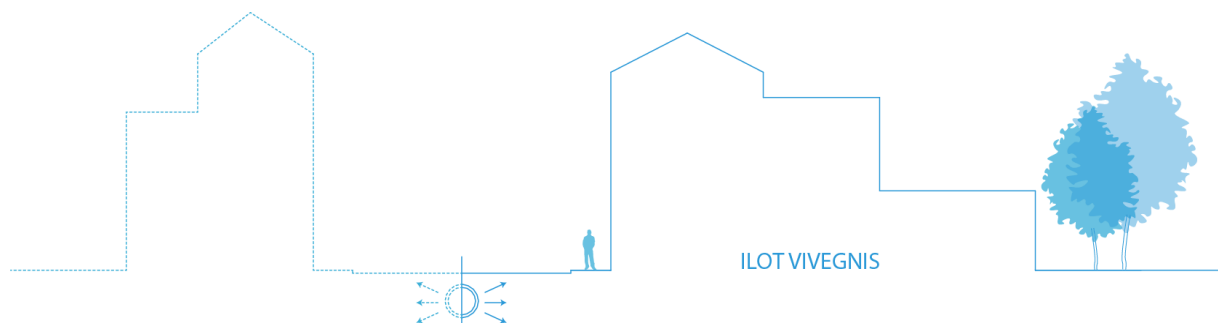


fig. 23: Hypothèse de la division des charges pour évaluer le critère de rentabilité du réseau

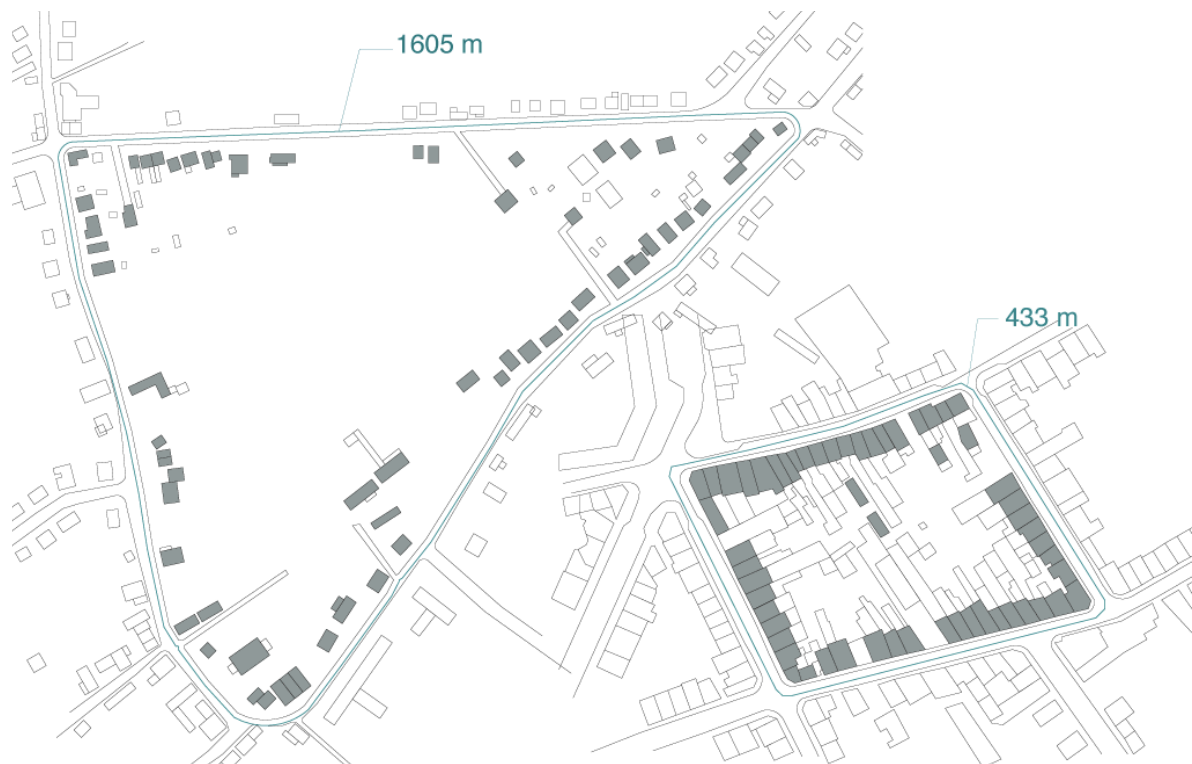


fig. 24: Longueur du réseau autour de l'îlot de Rotheux (gauche) et autour de l'îlot de Vivegnis (droite)

Le critère de rentabilité est comparé aux besoins bruts en énergie de chauffage et d'eau chaude sanitaire globaux au sein des deux îlots, pour déterminer la pertinence du réseau. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus.

	Besoins chauffage+ECS (kWh/an)	Densité énergétique (kWh/m ^{ct} par an)	Pertinence du réseau
VIVEGNIS : Longueur du réseau = 433 m			
PEB	396 153 + 214 445 = 610 598	1410	Oui
BE	520 894 + 214 445 = 735 339	1698	Oui
TBE	260 447 + 214 445 = 474 892	1097	Oui
P	130 223 + 214 445 = 344 669	796	Non
ROTHEUX : Longueur du réseau = 1605 m			
PEB	808 002 + 179 120 = 987 122	615	Non
BE	790 153 + 179 120 = 969 273	604	Non
TBE	395 076 + 179 120 = 574 196	358	Non
P	197 538 + 179 120 = 376 658	234	Non

tab. 42 : Estimation de la pertinence d'un réseau de chaleur Vivegnis et à Rotheux

On constate qu'il n'y a que pour l'îlot de Vivegnis, et pour des rénovations PEB, BE et TBE uniquement, que la rentabilité financière du réseau est assurée. Dans les autres cas, les besoins en énergie de chauffage et eau chaude sanitaire par mètre courant de réseau sont inférieurs à la valeur de 1000 kWh/m^{ct} par an, seuil de rentabilité.

Dans le cas où on considère que les maisons à Vivegnis sont occupées de la même façon qu'à Rotheux, c'est-à-dire un ménage par habitation, on a vu que les besoins en ECS globaux de l'îlot étaient alors inférieurs à ceux évalués en situation actuelle. Dès lors, en recalculant la densité énergétique de l'îlot sur base des besoins en ECS diminués, on constate que le réseau reste pertinent. Cela signifie qu'il ne faut pas nécessairement avoir une division des habitations en plus petits logements pour pouvoir installer un réseau de chaleur. Le réseau pourrait donc être installé dans d'autres quartiers urbains avec la même densité urbaine, mais dont les habitations sont occupées par un seul ménage.

Dans le cas de Rotheux, on peut se demander à partir de quel moment le réseau deviendrait intéressant. Certes, on peut augmenter les besoins jusqu'à atteindre le seuil de rentabilité, mais cela n'a pas de sens, puisque l'intérêt est de favoriser la diminution de la demande énergétique des bâtiments. On regardera plutôt du côté de la densification de l'îlot qu'il faudrait réaliser pour que le critère soit atteint. L'idée a du sens puisque la densification des îlots périurbains est un phénomène réel et actuel qui pourrait toucher l'îlot de Rotheux. Si on divise les besoins globaux au sein de l'îlot par le nombre d'habitations, on trouve, pour la rénovation PEB, une demande moyenne de 17 948 kWh/an. Pour que le critère de 1000 kWh/m^{ct} par an soit atteint, il faut que la distance entre deux habitations soit donc égale à 18 mètres maximum. Cette distance correspond en moyenne à la distance entre les maisons des zones les plus denses de l'îlot, ce qui laisse penser qu'une densification de l'entièreté de l'îlot (et des maisons aux frontières) sur base de ces zones permettrait une production de chaleur à l'aide d'un réseau de chaleur.

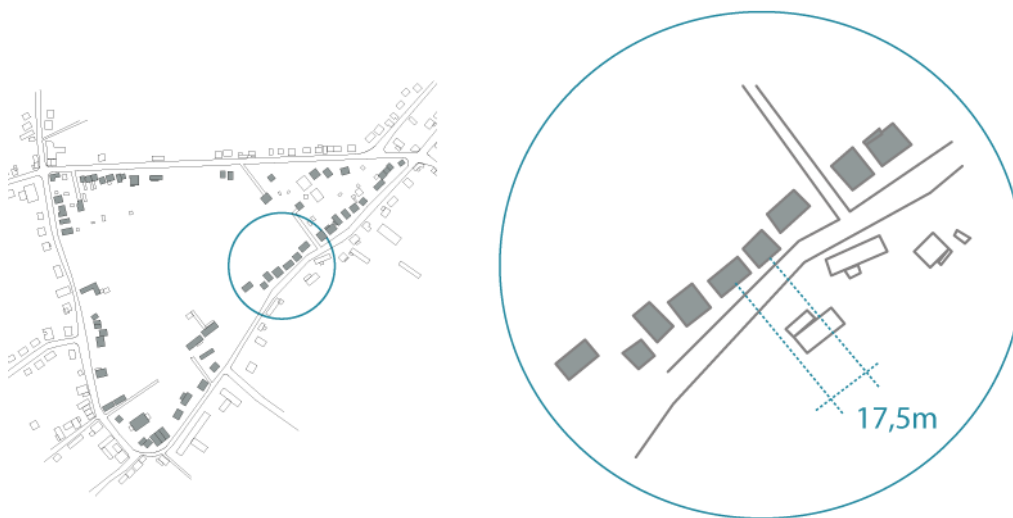


fig. 25: Critère de densification pour assurer la rentabilité d'un réseau à Rotheux

Rappelons que les calculs sont évalués sur base du fait que le réseau alimente également les maisons aux frontières, puisque le réseau de chaleur est situé en voirie. Bien qu'il n'existe pas encore en pratique, on pourrait également étudier le cas théorique d'un réseau de chaleur intérieur à l'îlot. L'avantage est une réduction de la longueur du réseau, mais par conséquent, le taux de raccordement est divisé par deux. La longueur de celui-ci, dans le cas de Vivegnis, est de 353 m. Comme le montre les résultats du tableau ci-après, le réseau de chaleur pourrait toujours être pertinent dans le cas où les besoins énergétiques correspondent à une rénovation basse énergie. Lorsque les besoins deviennent inférieurs, le réseau de chaleur devra être partagé avec les maisons aux alentours pour en assurer la rentabilité.

	Besoins chauffage+ECS (kWh/an)	Densité énergétique (kWh/m ² par an)	Pertinence du réseau
VIVEGNIS : Longueur du réseau = 353 m			
PEB	396 153 + 214 445 = 610 598	1730	Non
BE	520 894 + 214 445 = 735 339	2083	Oui
TBE	260 447 + 214 445 = 474 892	1345	Non

tab. 43: Estimation de la pertinence d'un réseau de chaleur intérieure à l'îlot de Vivegnis

Lorsqu'un réseau de chaleur peut être installé, on peut étudier la possibilité de placer une unité de cogénération pour répondre aux besoins mutualisés. C'est ce qui est développé au point suivant.

3.2 Pertinence de la cogénération

L'étude de la pertinence de l'installation d'une unité de cogénération pour les petits réseaux est une opération à réaliser au cas par cas, et on ne peut faire de généralités à propos de celle-ci (Lempereur, 2013). Elle dépend des pertes thermiques au niveau du réseau de chaleur et de la rentabilité de l'installation elle-même. C'est ce dernier élément que nous traitons ici, uniquement dans les cas où l'installation du réseau de chaleur respectait le critère de rentabilité. Elle devra être évaluée sur base des besoins des habitations de l'îlot, et des besoins des habitations frontalières qui sont desservies également par le réseau, si celui-ci ne peut être rentable sans elles. Nous ferons l'hypothèse dès lors que ces habitations aux frontières ont atteint un stade de rénovation identique, et que leurs besoins seront équivalents à ceux de l'îlot. Si ce n'était pas le cas, les besoins en chaleur beaucoup plus importants de ces dernières fausseraient l'évaluation de la rentabilité de l'unité.

La pertinence de l'unité de cogénération est évaluée grâce au logiciel COGENcalc, mis à disposition par la Région wallonne. Il s'agit d'un outil simplifié, dont les limitations sont connues, qui permet d'avoir un ordre de grandeur des puissances nécessaires et d'évaluer la rentabilité du projet, avant de commencer les procédures d'une étude de faisabilité. Le logiciel calcule la rentabilité financière sur base de l'investissement de départ, et des différents gains de la cogénération par rapport à la même situation, sans cogénération. La cogénération sera comparée ici à une production de chaleur centralisée avec une chaudière à condensation au gaz. L'ensemble des étapes à suivre est repris dans le guide de pré-faisabilité mis à disposition par la Région wallonne (Daoud, 2007). La première étape consiste à dimensionner, une première fois, l'unité de cogénération, et la seconde à en évaluer la rentabilité.

Étape 1: Dimensionnement de l'unité de cogénération

Le logiciel est conçu à la base pour étudier l'installation sur un établissement unique, et non sur un ensemble. Cependant, il est possible de l'adapter de façon à l'utiliser correctement dans notre cas.

Le dimensionnement repose sur les besoins nets en chaleur que l'unité de cogénération devra fournir. À ceux calculés précédemment, nous devons ajouter les pertes liées au réseau, puisque l'unité devra également les couvrir. La littérature donne des ordres de grandeur de pertes équivalentes à 15-20 % de la production, ce qui est confirmé par la valeur des pertes du réseau de chaleur installé à Visé ("les Pléiades"), qui est de 20% de la consommation globale (Intradel, 2011). La valeur fournie au logiciel est la demande annuelle, et nous ne pouvons nous-mêmes encoder la demande mensuelle. Cependant, nous pouvons choisir le profil de consommation correspondant à notre cas, et il en déduira lui-même les allures théoriques.

À cette étape, nous devons également décider de l'opportunité d'installer un ballon de stockage. Nous avons déjà parlé au chapitre précédent des avantages du stockage. Il permet non seulement de produire de l'électricité sans perdre la chaleur produite, et également d'augmenter le temps de fonctionnement de la cogénération ainsi que sa durée de vie. Le volume de stockage peut être centralisé avec la cogénération, ou

bien décentralisé dans chaque maison. Au niveau de la cogénération, cela change peu de chose, mis à part qu'il faut tenir compte du volume de stockage important. Par contre, cela a beaucoup d'importance au niveau du réseau de chaleur. En effet, pour subvenir à des besoins concentrés sur une courte durée, même si la chaleur provient du volume de stockage, la vitesse du fluide dans le réseau devra être importante. Or, plus celle-ci augmente, plus les pertes de chaleur dans les conduites augmentent également. Et plus les pertes augmentent, plus la rentabilité du réseau est compromise. Si, au contraire, on considère que chaque bâtiment possède sa propre réserve de chaleur, il pourra puiser dans celle-ci, et éviter que la boucle de chaleur ne soit saturée et que le débit augmente. Cependant, COGENcalc ne permet pas de faire cette différenciation, et dimensionne le volume de stockage par défaut, sur base des données rentrées. L'hypothèse est un stockage équivalent de 1h.

Voici les données fournies par le logiciel, dans le cas de la rénovation BE, où l'unité ne serait installée que pour subvenir aux besoins de l'îlot. Les besoins à couvrir par l'unité sont les besoins bruts calculés ci-dessous, augmenté de 20 %, soit 882 407 kWh/an.

VIVEGNIS – rénovation BE – Réseau de chaleur qui n'alimente que l'îlot	
Puissance thermique	96,8 kW _q
Quantité de chaleur fournie	501 140 kWh _q /an
Nombre d'heures de fonctionnement à régime nominal	5 179 h/an
Part de la puissance thermique maximale assurée par la cogénération	31,4 %

tab. 44 : Vivegnis – rénovation BE – Puissance thermique de la cogénération

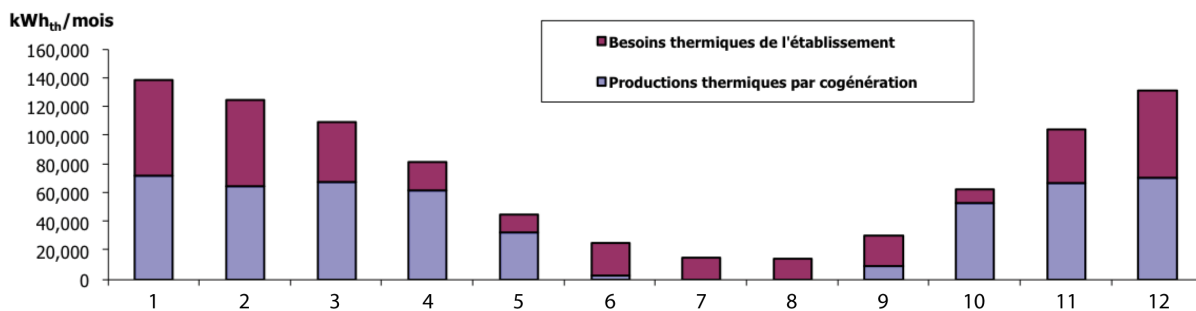


fig. 26: Vivegnis – rénovation BE – Production mensuelle de la cogénération

Rappelons que cette courbe ne peut donner qu'une idée de la répartition réelle de la courbe de demande, puisqu'elle a été établie de manière théorique. Elle illustre par contre relativement bien le fait que la cogénération ne peut pas fonctionner lorsque les besoins en ECS sont l'unique demande en chaleur de l'îlot. Le logiciel ne fournit pas les données mensuelles chiffrées.

On se situe dans la gamme des plus petites puissances thermiques, couvertes par le moteur à combustion interne. Celui-ci peut être alimenté soit par du diesel, par du gaz naturel, ou encore par de l'huile végétale. Se pose ici la question de la pertinence d'utiliser la biomasse ou non, étant donné le coût lié à l'huile végétale, et l'accessibilité directe au gaz naturel en centre ville. On rejette directement le choix du diesel, et l'étude est poursuivie en considérant l'huile végétale, soit l'huile de colza pour nos régions, et le gaz naturel en parallèle.

En fonction du choix du combustible, le rendement électrique diffère, et par conséquent, la quantité d'électricité produite (plus importante si moteur à l'huile végétale).

	Moteur au gaz naturel	Moteur à l'huile végétale
Puissance électrique	56,2 kW _e	64,3 kW _e
Rendement électrique	32,4 %	34,1 %
Rendement thermique	55,8 %	51,4 %
Quantité d'électricité produite	290 839 kWh _e /an	333 103 kWh _e /an

tab. 45 : Vivegnis – rénovation BE – Puissance électrique de la cogénération

À Vivegnis, la consommation annuelle en électricité de l'îlot (scénario sans ventilation mécanique et sans voitures électriques) est de 330 718 kWh/an, ce qui montre que l'entièreté de l'électricité produite pourra être consommée sur place. Actuellement, l'autoconsommation pose cependant un problème légal. En redistribuant l'électricité vers les logements, on se place en tant que fournisseur, ce qui signifie que cela nécessite une licence, des paiements de charges et des frais supplémentaires. Non seulement ces frais diminuent sérieusement la rentabilité de la cogénération, mais cela revient aussi à imposer un fournisseur spécifique d'électricité aux habitants, ce qui n'est pas légal (Lempereur, 2013). Des chemins détournés existent, comme n'utiliser qu'un seul code EAN pour l'îlot et des décompteurs pour chaque habitation, mais les deux solutions légales qui restent sont soit revendre l'électricité produite, soit faire les démarches pour devenir fournisseur. Dans le cadre de ce travail, on considéra l'autoconsommation, en faisant l'hypothèse d'une évolution de la législation afin de permettre de mieux utiliser les bénéfices de la cogénération.

Étape 2: Rentabilité du projet

L'évaluation des gains de la cogénération porte sur trois points:

- Le gain sur l'électricité produite
- Le gain sur la chaleur produite
- Le gain par les certificats verts

Ils sont évalués sur base de la comparaison avec une chaudière à condensation alimentée en gaz naturel, centralisée sur l'îlot.

Gain sur l'électricité produite

En se basant sur le fait que l'électricité produite par la cogénération ne devra plus être achetée sur le réseau, et que le prix d'achat moyen de l'électricité par les ménages wallons est de 24cEUR/kWh (PCI) en décembre 2012, pour un tarif bi-horaire (APERe, 2012b), le gain sur la facture est de 69.801 €/an.

Gain sur la chaleur

De même, en considérant que la part des besoins couverts par la cogénération ne devra plus être produite par la chaudière au gaz à condensation (rendement PCI considéré de 100 %), et que le prix d'achat moyen du gaz par les ménages wallons était de 8,4cEUR/kWh (PCI) en décembre 2012 (APERe, 2012b), le gain sur la facture est de 49.524 €/an.

Gain sur les CV

Bien que l'avenir des CV soit un sujet d'actualité, on ne saurait prédire la venue de changements en ce qui concerne la cogénération. Comme le prix du certificat vert est soumis au marché, on considère ici son prix minimum de 65 € pour se placer du côté sécuritaire (Daoud, 2007). La quantité de CO₂ émise par l'unité de cogénération (kg CO₂/MWh_e), dépend du combustible économisé. Elle est égale au coefficient d'émission de CO₂ du combustible utilisé par la cogénération, divisé par le rendement électrique de l'unité. Ce coefficient d'émission est de 251 kg CO₂/MWh_e pour le gaz naturel, et de seulement 65 pour l'huile végétale. Cette quantité est alors comparée à la quantité de CO₂ émise par un système de production séparé (chaleur et électricité) au gaz naturel (centrale TGV + chaudière haut rendement). Le taux d'économie de CO₂ permis par la cogénération est de 35 % pour le gaz naturel, et 153 % pour l'huile végétale, ce qui signifie que la première obtiendra 0,35 CV par MWh_e, et la seconde 1,53. Le gain financier grâce aux CV représente donc le gros avantage de l'huile végétale par rapport au gaz naturel.

	Moteur au gaz naturel	Moteur à l'huile végétale
Coefficient d'émission en CO ₂ de l'unité	251 kg CO ₂ /MWh _e	65 kg CO ₂ /MWh _e
Taux d'économie en CO ₂ de l'unité	35 %	153 %
Nombre de CV attribués	103	501
Gain sur la facture	6.677 €/an	32 541 €/an

tab. 46 : Vivegnis – rénovation BE – Gain sur les CV

À l'ensemble des gains doivent être ajoutés le montant des dépenses pour l'achat du combustible et pour l'entretien de l'unité, ainsi que l'investissement de départ (primes déduites).

Le prix d'achat de l'huile de colza considéré est de 985 €/T, en septembre 2012 (COGENGreen, 2013). Compte tenu du pouvoir calorifique de l'huile de 35 000 kJ/kg, on obtient le prix de 0,10€/kWh. Le prix du gaz naturel est moindre, mais l'écart qui était très important il y a quelques années diminue avec la hausse du prix du gaz de ces derniers mois (0,084€/kWh fin 2012). Le montant des dépenses pour l'achat du combustible sera donc plus important dans le second cas, mais cela peut être compensé, ou non, par le gain sur les CV.

En ce qui concerne l'investissement de départ et les dépenses pour l'entretien, COGENcalc les calcule directement sur base de la puissance installée et d'abaques de dimensionnement (Daoud, 2007). L'avantage avec le gaz naturel est que l'entretien de l'unité est moindre ce qui permet de diviser les dépenses quasiment par deux, et l'investissement de départ est également plus faible.

Les primes accordées par la Région wallonne sont de 20 % de la facture (TVAC), et sont plafonnées à 15.000 € (SPW – DG04, 2013). Le plafond est atteint dans notre cas.

	Moteur au gaz naturel	Moteur à l'huile végétale
Gain sur l'électricité	69 801 €/an	69 801 €/an
Gain sur la chaleur	49 524 €/an	49 524 €/an
Gain sur les CV	6 677 €/an	32 541 €/an
Dépenses entretien	- 6 161 €/an	- 14 189 €/an
Achat combustible	- 75 498 €/an	- 97 575 €/an
Investissement de départ (primes déduites)	-126 664 €	-138 423 €
Gain annuel net	44 344 €/an	40 102 €/an
Temps de retour de l'investissement	2,9 années (3,5 tenant compte de l'augmentation actuelle du prix du gaz)	3,5 années

tab. 47 : Vivegnis – rénovation BE – Rentabilité de l'unité de cogénération

Dans les deux cas, COGENcalc nous informe que la cogénération semble une solution intéressante. La rentabilité financière est assurée dans les deux cas, et c'est en principe la solution au gaz naturel qui serait retenue pour son accessibilité directe en centre-ville et pour le plus faible coût d'investissement et d'entretien.

Notons que le temps de retour sur l'investissement doit être comparé à la durée de vie de l'installation. La durée de vie technique d'une unité de cogénération (durée de vie avant de devoir remplacer le moteur) est d'environ 100 000 heures. Pour un fonctionnement de 5000 heures par an (comme c'est plus ou moins le cas ici), la durée de vie est de 20 ans. En pratique, on tient plutôt compte de la durée de vie économique de l'unité (durée de vie avant le gros entretien du moteur) qui est d'environ 50 000 heures, soit 10 ans dans ce cas-ci (ICEDD, 2010a).

La rentabilité est ensuite évaluée pour les deux autres scénarios où le réseau de chaleur était pertinent, en considérant cette fois les maisons aux frontières puisque le réseau doit les alimenter également. On obtient les résultats suivants, en considérant un moteur au gaz naturel:

Vivegnis – rénovation PBE et TBE – Réseau de chaleur qui alimente l’îlot ET les maisons aux frontières		
	PEB	TBE
Énergie à couvrir (besoins bruts de l’îlot + alentours + 20 % de pertes)	1 465 435 kWh/an	1 139 741 kWh/an
Puissance thermique installée	160,7 kW _q	125 kW _q
Nombre d’heures de fct	5 179 h	5 179 h
Rendement thermique	54 %	54,9 %
Rendement électrique	33,5 %	32,9 %
Quantité de chaleur fournie	832 255 kWh _q /an	647 286 kWh _q /an
Quantité d’électricité fournie	516 247 kWh _e /an	388 484 kWh _e /an
Gain annuel net	78 806 €/an	59 260 €/an
Rentabilité	2,5 années	2,7 années

tab. 48 : Vivegnis – rénovation PBE et TBE – Rentabilité de l’unité de cogénération

On constate que plus la puissance installée est importante, plus la rentabilité est intéressante. Rappelons que dans ce deuxième cas, on fait l’hypothèse d’un réseau qui passe autour de l’îlot, sans être consacré uniquement à celui-ci. Il est donc logique que la part de la production électrique intéressante de la cogénération dédiée à l’îlot soit proportionnelle à la part de la consommation énergétique de celui-ci. Soit dans ce cas-ci, la moitié de la production. Enfin, notons que l’hypothèse de l’autoconsommation totale de l’électricité, ce qui est en théorie le cas puisque l’entièreté de l’électricité produite est utile pour les logements ou le transport, est le facteur qui permet la rentabilité de la cogénération. Si on considère que l’entièreté de l’électricité autoproduite est revendue sur le réseau, COGENcalc informe qu’il ne s’agit pas d’une solution intéressante (retour de l’investissement sur 9 ans!). Or, l’autoconsommation présente beaucoup d’avantages. Cela illustre donc le fait que la cogénération, en ce qui concerne sa législation, n’est pas encore adaptée à des îlots d’habitations.

La considération de l’échelle urbaine du secteur résidentiel permet donc d’exploiter la cogénération qui, jusqu’à aujourd’hui, était presque exclusivement réservée au secteur tertiaire. Le point faible reste le réseau de distribution, dont la rentabilité nécessite un taux de raccordement généralement supérieur à l’échelle d’un unique îlot d’habitation dont les consommations énergétiques ont été réduites par la rénovation.

3.3 Potentiel photovoltaïque

3.3.1 Méthodologie

L’évaluation du potentiel photovoltaïque d’une surface se détermine de la manière suivante, sur base de l’ensoleillement reçu de celle-ci et des différents rendements de l’installation (Pétel, 2011):

$$E_{pv} = E_{sol} * S * C * \eta_{pv} * \eta_{ond} * (1-\lambda)$$

E_{pv} : Potentiel photovoltaïque de la surface considérée (kWh/an)

E_{sol} : Énergie solaire reçue de la surface considérée (kWh/m².an)

S : Surface du toit considérée (m²)

C : Pourcentage de couverture de la surface étudiée en panneaux photovoltaïques.

Pour les toitures, il est conseillé de ne pas aller au-delà de 80% de la surface totale

η_{pv} : Rendement du panneau photovoltaïque

η_{ond} : Rendement de l’onduleur

λ : Coefficient de pertes électriques

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, l'énergie solaire reçue par une surface donnée dépend de plusieurs facteurs à savoir l'orientation de celle-ci, son inclinaison, les éventuels obstacles aux alentours, les conditions climatiques, etc. En Belgique, une surface inclinée à 35°, orientée sud et sans impact solaire reçoit en moyenne, sur l'année, 1000 kWh/m².an. Cette valeur est affectée de deux facteurs réducteurs, que nous appelons facteur **F** et facteur **M**. On a alors :

$$Esol = 1000 * F * M$$

- Le facteur **F** tient compte de l'inclinaison et de l'orientation de la surface considérée, en comparaison à la situation optimale d'une orientation sud et d'une inclinaison de 35°.

Ce facteur se déduit du tableau ci-dessous, valable pour la Belgique :

		Inclinaison par rapport à l'horizontale (°)						
		0	15	25	35	50	70	90
Orientation	est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	Sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Sud	88%	96%	99%	100%	98%	87%	68%
	Sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

tab. 49: Facteur de réduction F de l'ensoleillement reçu par une surface (source: EF4, 2013)

Pour une orientation nord et une inclinaison de 35°, F = 62%. Pour une orientation nord-est ou nord-ouest et une inclinaison de 35°, le facteur de correction vaut 68%.

- Le facteur **M** tient compte des masques solaires engendrés par le milieu bâti environnant.

Afin de le déterminer, nous utilisons le logiciel Townscope, développé par Teller & Azar en 2001. Cet outil, conçu dans la thématique du développement durable, permet d'évaluer le rayonnement solaire direct et diffus d'espaces ouverts d'un milieu urbain construit.

Les calculs effectués dans Townscope se basent sur un modèle tridimensionnel de la configuration étudiée. Pour chacun des deux îlots, une modélisation 3D est réalisée dans le logiciel Sketchup avant d'être importée dans Townscope. Pour un point défini, l'outil détermine, sur base d'un calcul de projections stéréographiques, la durée d'ensoleillement et la quantité de rayonnement direct et diffus reçue pour le 15e jour de chaque mois. On obtient les valeurs mensuelles en multipliant ce résultat par le nombre de jours dans le mois, et les valeurs annuelles en sommant le tout. Pour évaluer la quantité de rayonnement reçue par une surface (comme ici les toitures), nous devons diviser celle-ci selon une trame (pas de 1 mètre utilisé ici), comme illustré à la figure ci-dessous. Le logiciel nous fournit la quantité de rayonnement reçue pour chaque point de la trame, et il suffit d'effectuer la moyenne sur la surface pour connaître l'ensoleillement reçu en moyenne par celle-ci.

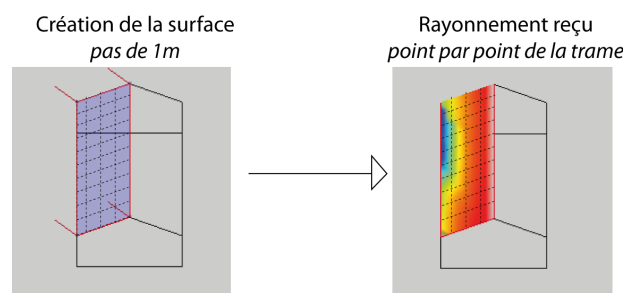


fig. 27: Définition d'une surface dans le logiciel Townscope

Néanmoins, les valeurs fournies de cette manière par le logiciel ne peuvent être utilisées directement pour calculer le potentiel photovoltaïque. Townscope évalue l'ensoleillement à partir d'un ciel serein, ce qui n'est pas tout à fait représentatif de notre climat belge, puisque nous avons de nombreux jours de ciel couvert. Dès lors, les valeurs calculées de cette façon sont surestimées par rapport aux valeurs réelles. C'est pour cette raison que nous n'utilisons pas les valeurs fournies directement par l'outil, mais que nous nous en servons pour déterminer le facteur M. On évalue l'impact de la configuration urbaine en calculant le rapport entre les valeurs obtenues dans la situation réelle (dans son contexte bâti) et celles obtenues dans un site dégagé. Ce rapport, exprimé en pourcentage, est le facteur M. Il s'agit donc d'un facteur réducteur du rayonnement incident, qui tient compte des masques solaires engendrés par le milieu bâti environnant. Si il est de 90%, cela signifie que la surface reçoit 90 % de l'énergie solaire qu'elle recevrait en site dégagé. La démarche réalisée à l'aide du logiciel Townscope est résumée par le schéma ci-dessous.

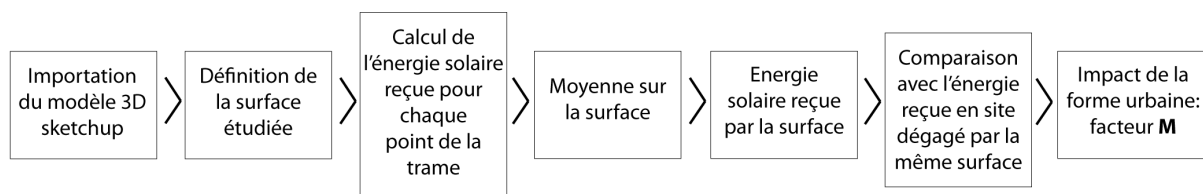


fig. 28: Démarche de l'utilisation du logiciel Townscope pour déterminer le facteur de réduction M

La démarche est ensuite répétée pour toutes les toitures de l'îlot. Ainsi, nous pouvons aisément comparer l'impact de l'environnement bâti en situation urbaine et en situation périurbaine sur l'énergie solaire reçue. Notons cependant que le logiciel ne tient pas compte de la végétation dans ses calculs.

Si l'on s'intéresse à l'apport photovoltaïque mensuel, on peut l'évaluer sur base de la répartition mensuelle des 1000 kWh/m² reçus en moyenne annuellement par une surface en Belgique:

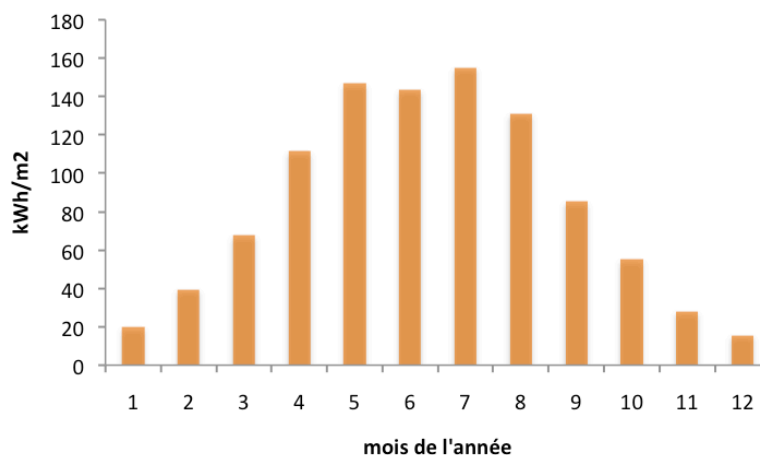


fig. 29: Énergie solaire mensuelle reçue par une surface en Belgique (Architecture et Climat, 2013)

3.3.2 Hypothèses

Surface considérée

On évalue ici uniquement le potentiel photovoltaïque en toiture, et non sur les façades, bien que certains types de panneaux le permettent. Le tableau des facteurs F montre que le rendement de ces installations est très faible, et il est préférable d'exploiter d'abord le potentiel en toiture, le plus important.

Rendements

La méthode utilisée (Pétel, 2011) recommande d'utiliser pour le calcul une installation avec des rendements "classiques", c'est-à-dire, par exemple, le panneau monocristallin BlueSolar de type SPM280-24 (rendement de 14,43 %), et l'onduleur Sunny Boy 3000TL de la marque SMA, présentant un rendement de 96%. Quant aux pertes électriques, elles peuvent varier entre 10 et 35 % et il est conseillé d'utiliser la valeur moyenne de 20 %.

3.3.3 Résultats

Avant d'évaluer le potentiel photovoltaïque de chacun des deux îlots, il est intéressant de les comparer un instant par rapport à l'énergie solaire reçue par l'ensemble des toitures (**Esol**), toutes orientations confondues, compte tenu des deux facteurs réducteurs **F** et **M**.

Facteur **M**: facteur réducteur tenant compte de l'impact de la forme urbaine sur l'ensoleillement de la toiture, en moyenne sur l'année

Facteur M (%)	VIVEGNIS % de toitures	ROTHEUX % de toitures
≥ 95	31	85
90 - 95	25	10
80 - 90	15	4
70 - 80	13	1
60 - 70	12	0
< 60	4	0
	En moyenne sur l'îlot, M = 84,9 %	En moyenne sur l'îlot, M = 96,7 %

tab. 50 : Comparaison des facteurs de réduction M relatifs aux toitures des deux îlots

Plus le facteur **M** est proche de 100%, moins les bâtiments environnants ont un impact sur l'énergie solaire reçue par la surface considérée. Ces résultats illustrent donc la diminution de l'accessibilité à l'ensoleillement des toitures dans un milieu dense. Les deux figures ci-dessous comparent, en coupe, deux rues types de chacun des deux îlots, pour donner une idée de la configuration correspondant à une certaine valeur du facteur **M**. Alors qu'à Vivegnis, l'ombre portée par les habitations situées de l'autre côté de la rue peut être aussi importante que celle des maisons voisines, à Rotheux, les maisons de l'autre côté de la rue, s'il y en a, sont suffisamment éloignées pour ne pas avoir d'impact. Par contre, les maisons voisines peuvent toujours être responsables d'un masque solaire, comme le montre la figure.

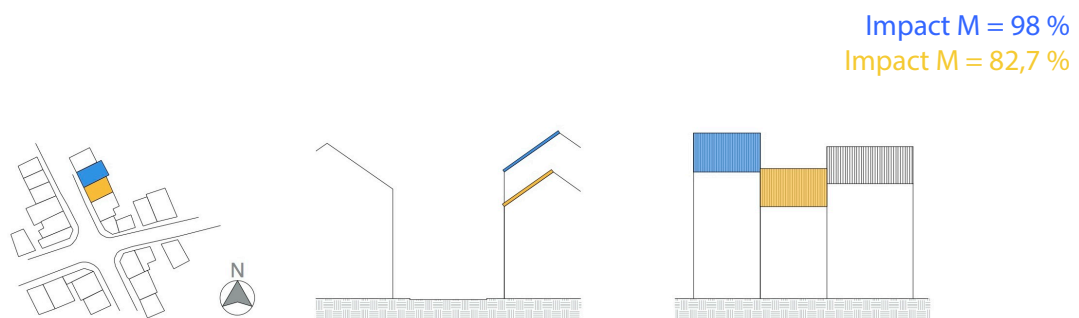


fig. 30: Coupes et façades types à Vivegnis

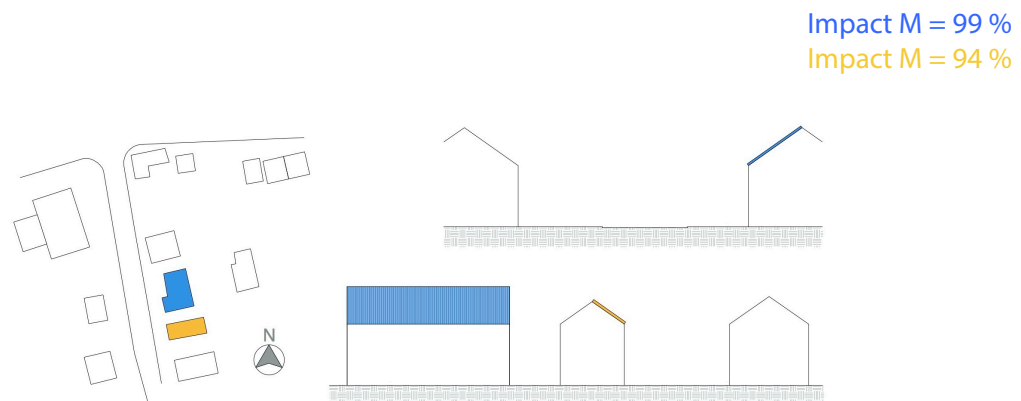


fig. 31 : Coupes et façades types à Rotheux

Facteur **F**: Coefficient réducteur tenant compte de l'orientation et de l'inclinaison de la toiture sur l'ensoleillement reçu par celle-ci.

Contrairement au facteur **M**, **F** n'est pas influencé par le fait que l'on soit en situation urbaine ou périurbaine. Le tableau ci-dessous reprend le pourcentage des habitations orientées dans chacune des directions, et le facteur **F** associé à chaque direction, en considérant que c'est le pent de toiture le mieux exposé qui reçoit les panneaux photovoltaïques.

Orientation	VIVEGNIS % d'habitations	ROTHEUX % d'habitations
sud / nord : F = 100 %	5	10
ouest / est : F = 83 %	0	24
sud-ouest / nord-est : F = 95 %	50	30
sud-est / nord-ouest : F = 95 %	32	36
Toit plat : F = 88%	13	0

tab. 51 : Comparaison des facteurs de réduction F relatifs aux toitures des deux îlots

A Rotheux, pratiquement ¼ des habitations sont orientées dans la direction ouest-est, pour laquelle le facteur **F** est le plus réducteur. A Vivegnis, aucune habitation n'a cette orientation. Globalement, on constate que les habitations sont mieux orientées à Vivegnis qu'à Rotheux.

Pour la suite du travail, seul le pent de toiture le mieux exposé de chaque habitation sera étudié pour la pose de panneaux photovoltaïques. Le potentiel photovoltaïque du site est calculé une première fois selon les hypothèses citées plus haut, en considérant un taux de couverture de toiture de 80 % de toutes les toitures, soit le maximum conseillé, de façon à connaître le potentiel le plus élevé.

Production individuelle

	VIVEGNIS	ROTHEUX
Production totale	139.945 kWh/an	314.669 kWh/an
Surface de PV placés	1.505 m ²	3.171 m ²
Production/m ² de PV	93 kWh/an par m² de PV	99 kWh/an par m² de PV
Consommation électrique annuelle d'un ménage (sans ventilation mécanique et sans voitures électriques)	3.614 kWh/an	3.889 kWh/an
Nombre de ménages équivalent à la production	38,7 ménages Soit environ 40 % de l'îlot	81 ménages Soit environ 147 % de l'îlot

tab. 52 : Potentiel photovoltaïque dans le cas de la production individuelle

La faible production photovoltaïque de l'îlot de Vivegnis découle non seulement de la faible superficie des toitures des habitations (en couvrant 80 % du pent le mieux exposé de chaque habitation, on ne peut installer que 1505 m² de PV, soit environ 50 % de la surface de PV à Rotheux), mais également de la réduction de l'apport solaire due au milieu urbain. En effet, la production annuelle d'un mètre carré de panneau est de **93 kWh/an** à Vivegnis, alors qu'elle est de **99 kWh/an** à Rotheux. Puisque la production électrique dépend directement de l'ensoleillement reçu par la toiture, on peut se demander si il n'y aurait pas un avantage à centraliser la production électrique des panneaux photovoltaïques uniquement sur les toitures les mieux exposées, puis de distribuer celle-ci dans l'îlot. Le tableau ci-dessous reprend la répartition des pentes de toiture étudiés, selon le pourcentage des 1000 kWh/m².an (énergie solaire qui serait reçue par la surface dans des conditions optimales) reçu, soit **F*M**. Plus **F*M** est proche de 100 %, plus l'énergie solaire reçue par la surface est importante.

F*M	VIVEGNIS		ROTUEUX	
	Nbre (toitures)	Surface (m ²)	Nbre (toitures)	Surface (m ²)
Plus de 90 %	23	722,6	35	2681,1
Entre 80 et 90 %	19	604,9	10	743
Entre 70 et 80 %	8	355,2	10	534
Moins de 70 %	7	198,4	0	0

tab. 53 : Pourcentage du rayonnement solaire reçu par les toitures

Le potentiel photovoltaïque est calculé une seconde fois, en considérant cette fois-ci uniquement le recouvrement de 80 % des toitures recevant plus de 90 % du rayonnement incident.

Production centralisée

	VIVEGNIS	ROTUEUX
Production totale	59.508 kWh/an	223.141 kWh/an
Surface de PV placés	578 m ²	2.148 m ²
Production/m ² de PV	103 kWh/an par m² de PV	104 kWh/an par m² de PV
Consommation électrique annuelle d'un ménage (sans ventilation mécanique et sans voitures électriques)	3.614 kWh/an	3.889 kWh/an
Nombre de ménages équivalent à la production	16,5 ménages Soit environ 17 % de l'îlot	57 ménages Soit environ 103 % de l'îlot

tab. 54 : Potentiel photovoltaïque dans le cas de la production centralisée

On voit donc que dans les deux cas, centraliser les panneaux sur les toitures les mieux exposées permet d'augmenter la production d'électricité d'un mètre carré de panneau, et donc d'optimiser l'installation.

3.3.4 Conclusions

À Rotheux, la centralisation serait donc la meilleure solution puisqu'elle permettrait de subvenir aux besoins électriques de l'ensemble des ménages (en ne tient pas pour le moment d'éventuelles voitures électriques), en utilisant la surface des panneaux d'une façon plus optimale. La centralisation induit une diminution du coût global, mais il faudrait, pour en être certain, vérifier que les pertes électriques, plus importantes avec la présence du réseau, ne détruisent pas le bénéfice. Nous n'irons pas jusque-là, puisqu'on s'intéresse plutôt au gain énergétique qu'au gain financier. Les panneaux centralisés sur les toitures les mieux exposées sont utilisés de façon plus efficiente, mais ils produiront au final moins d'électricité que le potentiel maximum,

correspondant à la production de manière décentralisée. Le choix entre les deux dépendra des besoins en électricité de l'îlot.

À Vivegnis, la centralisation ne serait certainement pas la solution retenue. En effet, celle-ci ne permet de couvrir les consommations que de 17% de l'îlot, contre 40 % lorsque la production est individuelle. Dès lors, il est difficile d'imaginer que des ménages arrivant à couvrir jusqu'à 50 % de leurs besoins annuels, et même 100 % pour quelques cas particuliers, participent à la centralisation, qui ne leur permettrait plus de couvrir un aussi haut pourcentage de leurs besoins individuels. Comme il n'y a pas d'intérêt individuel pour tous à la centralisation, elle ne peut être envisagée.

La production mensuelle est illustrée ci-dessous :

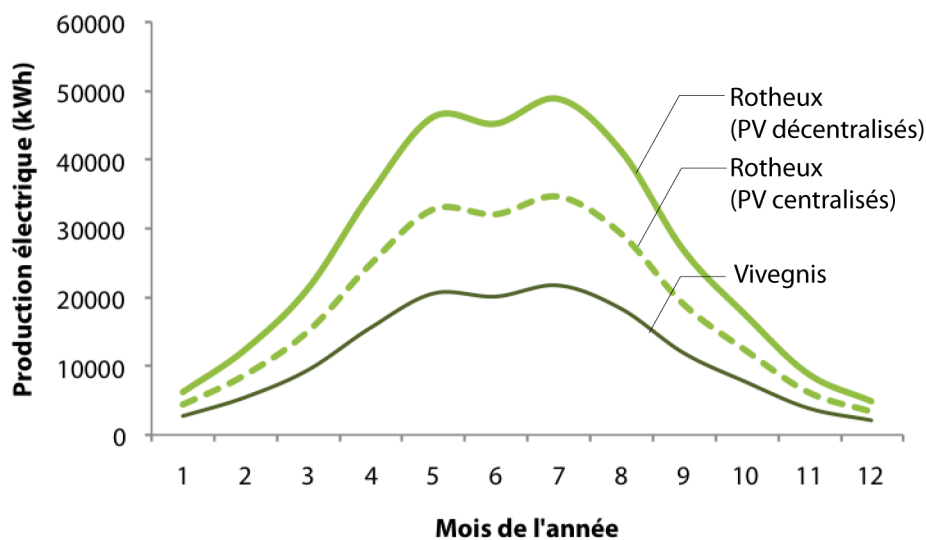


fig. 32: Production mensuelle relative au potentiel photovoltaïque

	Rotheux (kWh) (PV décentralisés)	Rotheux (kWh) (PV centralisés)	Vivegnis (kWh)
Janvier	6.228	4.416	2.770
Février	12.456	8.833	5.539
Mars	21.306	15.109	9.475
Avril	35.072	24.871	15.598
Mai	46.217	32.774	20.544
Juin	45.234	32.077	20.117
Juillet	48.839	34.633	21.721
Août	41.300	29.287	18.368
Septembre	26.878	19.060	11.954
Octobre	17.372	12.319	7.726
Novembre	8.850	6.276	3.936
Décembre	4.917	3.487	2.187
Total	314.669 kWh/an	223.141 kWh/an	139.945 kWh/an

tab. 55: Production mensuelle relative au potentiel photovoltaïque

3.4 Potentiel capteurs solaires

3.4.1 Méthodologie

L'évaluation du potentiel solaire thermique ne peut se faire dans la même logique, car les deux systèmes ne sont pas comparables au niveau de l'optimisation et l'efficacité, comme nous l'avons vu au chapitre 2. Pour les capteurs solaires thermiques, on ne recherche pas le potentiel maximum, puisque leur couverture sera réduite à une certaine valeur, de façon à garantir le bon rendement de l'installation. Cette idée est définie par la *fraction solaire* (ou *taux de couverture*), qui correspond au pourcentage des besoins annuels qui seront couverts par les capteurs solaires. D'un point de vue technico-économique, on estime que la fraction solaire utile optimale se situe entre 50 et 60 % (nous renvoyons à la description des capteurs solaires thermiques réalisée au chapitre 2 pour toutes informations supplémentaires).

L'énergie solaire incidente sur les toitures, elle, sera calculée de la même façon que pour l'évaluation du potentiel photovoltaïque:

$$E_{sol} = 1000 * F * M \text{ (kWh/m}^2\text{.an)}$$

Où **F** est déduit du tableau 49 et **M** est déterminé à l'aide du logiciel Townscope. Connaissant cette valeur, nous pouvons si, oui ou non, les toitures permettent, individuellement, une production d'eau chaude suffisante pour subvenir aux besoins du (des) ménage(s) qu'elles abritent. On pourra donc en déduire directement la surface de capteurs **S** à placer, puisqu'il s'agit de la seule inconnue de l'équation suivante:

$$\text{Besoins couverts par les capteurs (kWh/an)} = E_{sol} * S * \eta_{\text{global de l'installation}}$$

Comme dans le cas des panneaux photovoltaïques, il sera intéressant, dans un second temps, d'évaluer le gain potentiel de la centralisation. Notons que dans un premier temps, nous faisons l'hypothèse que les toitures sont vierges de tout panneau photovoltaïque. Il faudra ultérieurement vérifier si il y a une compatibilité possible entre les deux installations.

3.4.2 Hypothèses

La fraction solaire utilisée est de 60%. Cela signifie que 60% des besoins annuels des ménages sont couverts par les capteurs. Dans ces conditions, le rendement d'une installation individuelle de qualité est de 30 à 40 % (Architecture et Climat, 2013). La qualité de l'installation vient principalement d'une bonne conception du volume de stockage, de transferts de chaleur efficaces, de pertes thermiques évitées, etc.

3.4.3 Résultats

Production individuelle

	VIVEGNIS	ROTHEUX
Besoins bruts annuels en ECS	214.445 kWh/an pour l'îlot 2.211 kWh/an par ménage (1,86 personne/ménage)	179.120 kWh/an pour l'îlot 3.258 kWh/an par ménage (2,74 personnes/ménage)
Objectif: Fraction solaire de 60 %	128.667 kWh/an pour l'îlot 1.327 kWh/an par ménage	107.472 kWh/an pour l'îlot 1.955 kWh/an par ménage
Surface de capteurs nécessaire	432 m ²	352 m ²
Production/m ² de capteur	297 kWh/an par m²	305 kWh/an par m²

tab. 56: Potentiel solaire thermique dans le cas de la production individuelle

On remarque que pour subvenir aux besoins en ECS, chacune des toitures possède une surface de capteurs différente, en fonction de son exposition au rayonnement. Il peut être intéressant de comparer cette situation à la situation idéale, et voir si on ne pourrait pas essayer de l'approcher d'une autre manière. Dans la situation idéale, l'énergie reçue par la surface serait de 1000 kWh/m².an. En comptant un rendement moyen

de 35 % de l'installation, on obtient 350 kWh/m².an. Pour couvrir 60% de la demande globale de l'îlot, par exemple celle de l'îlot de Vivegnis, l'ensemble des capteurs doit produire 128 667 kWh/an, soit, avoir une superficie de 368 m² (dans la situation idéale). Le même raisonnement pour l'îlot de Rotheux donne la valeur de 307 m² de capteurs pour la situation idéale. On peut donc essayer de voir si, en ne couvrant que les toitures les mieux exposées, comme dans le cas des panneaux photovoltaïques, on arrive à réduire le nombre de capteurs nécessaires à l'objectif posé.

Cela est en effet possible, de nouveau, en ne considérant que les pentes de toiture qui reçoivent plus de 90 % de 1000 kWh/m².an.

Production centralisée

	VIVEGNIS	ROTHEUX
Besoins bruts annuels en ECS	214.445 kWh/an pour l'îlot 2.211 kWh/an par ménage (1,86 personne/ménage)	179.120 kWh/an pour l'îlot 3.258 kWh/an par ménage (2,74 personnes/ménage)
Objectif: Fraction solaire de 60 %	128.667 kWh/an pour l'îlot 1.327 kWh/an par ménage	107.472 kWh/an pour l'îlot 1.955 kWh/an par ménage
Surface de capteurs nécessaire	395 m ² (au lieu de 432)	329 m ² (au lieu de 352)
Production/m ² de capteur	326 kWh/an par m² (au lieu de 297)	327 kWh/an par m² (au lieu de 305)

tab. 57 : Potentiel solaire thermique dans le cas de la production centralisée

Les capteurs seront donc mieux utilisés avec la centralisation, mais le gain est moins important à Rotheux, étant donné le meilleur ensoleillement global de l'ensemble de l'îlot initialement. À Vivegnis, 37 m² de capteurs sont économisés, avec un gain de 29 kWh produit annuellement par mètre carré de capteur installé, soit 7163 kWh/an pour la surface installée. Les toitures concernées possèdent dans ce cas des capteurs sur un peu plus de 50 % de leur superficie à Vivegnis, et 12% à Rotheux.

3.4.4 Conclusions

Dans le cas de capteurs solaires, plus ceux-ci sont proches du stockage et du puisage, plus les pertes sont évitées et le système est optimisé. L'inconvénient de la centralisation est donc la création d'une source de pertes supplémentaires, en augmentant la longueur des conduites de distribution. Avec l'augmentation des pertes, le rendement global de l'installation sera réduit, et une étude approfondie de faisabilité devra être réalisée afin de quantifier la rentabilité d'un système centralisé par rapport à un système individualisé.

Vu la discussion précédente sur la pertinence de l'installation d'un réseau de chaleur, on peut directement supposer que la centralisation des capteurs à Rotheux ne sera pas rentable. À Vivegnis par contre, la centralisation prend son sens, vu la proximité des habitations. On peut cependant effectuer un rapide calcul pour estimer si le bénéfice de la centralisation ne sera pas anéanti par les pertes du réseau. En considérant un ordre de grandeur de 20 % de pertes dues au réseau, les capteurs solaires devront produire 25 734 kWh/an de plus. En considérant une production de 326 kWh/an par m² de capteurs, cela revient à installer 80 m² de capteurs supplémentaires ! Autrement dit, l'avantage de la centralisation est anéanti. Mais, lorsque l'on regarde à la figure suivante, on constate que les toitures les mieux exposées sur lesquelles sont posés les capteurs dans la situation de production centralisée sont réparties de façon relativement homogène (en bleu sur le dessin), ce qui permettrait de réaliser plusieurs petites centralisations et ainsi diminuer, au maximum les longueurs de distribution.

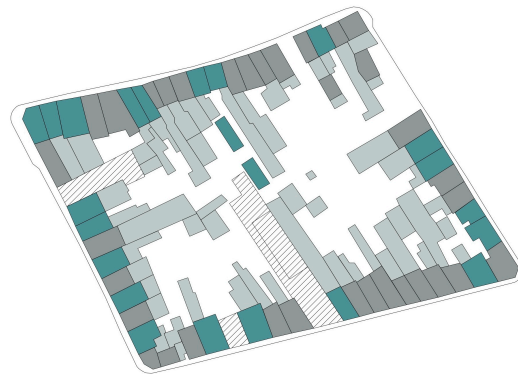


fig. 33: Localisation des toitures les mieux exposées sur l'îlot de Vivegnis (représentées en bleu)

La production mensuelle est illustrée ci-dessous.

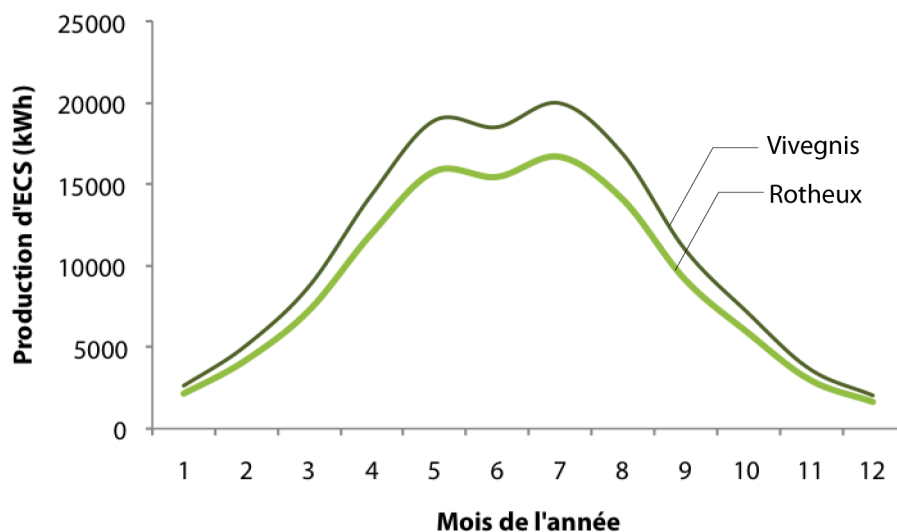


fig. 34: Production mensuelle relative au potentiel solaire thermique

	Rotheux (kWh)	Vivegnis (kWh)
Janvier	2.127	2.547
Février	4.254	5.093
Mars	7.277	8.712
Avril	11.979	14.341
Mai	15.785	18.898
Juin	15.449	18.496
Juillet	16.681	19.970
Août	14.106	16.888
Septembre	9.180	10.990
Octobre	5.933	7.103
Novembre	3.023	3.619
Décembre	41.679	2.010
Total	314.669 kWh/an	128.667 kWh/an

tab. 58: Production mensuelle relative au potentiel solaire thermique

On constate donc les apports énergétiques varieront très fort tout au long de l'année, avec le maximum de la production en été.

Notons que la centralisation possède un autre avantage : la possibilité d'augmenter le taux de couverture sans diminuer le rendement global, en stockant, dans le sol, le surplus produit en été. Ces systèmes de stockage intersaisonnier, appelés accumulateurs de longue durée, sont encore au stade de la recherche, mais ils ne sont envisageables que pour une centaine de logements (soit plus ou moins l'équivalent de la rue Vivegnis) (Hegger et al., 2011). Dès lors, la couverture de capteurs peut-être augmentée de façon à répondre de manière plus importante aux besoins en hiver, et le surplus produit en été ne sera plus inutile (ce qui faisait chuter le rendement), mais stocké pour être utilisé la saison suivante. Cela n'est bien sûr pas aussi simple et certainement difficilement envisageable aujourd'hui (coût, technique), mais il est important de pointer que cet avenir, extrêmement intéressant, qui permettrait à la courbe de production de se rapprocher de la courbe de consommation, ne sera possible pour les îlots résidentiels à la condition que l'on ait la mutualisation des besoins.

3.5 Potentiel éolien (périurbain)

3.5.1 Méthodologie

On a expliqué précédemment les difficultés qui résident dans l'évaluation du potentiel éolien réel d'un site, du fait de l'impossibilité bien souvent de réaliser les mesures précises nécessaires sur le site, et de l'incertitude des modèles mathématiques du comportement du vent dans le temps et dans l'espace. L'approximation généralement utilisée pour estimer l'énergie électrique fournie par une éolienne est de multiplier sa puissance nominale, donnée par le fabricant, par un équivalent d'heures de fonctionnement à puissance nominale, généralement de l'ordre de 1000h sur l'année pour une petite éolienne (1800h à 2200h pour une grande éolienne onshore) (Les Compagnons d'Eole et al., 2012). Il y a cependant une manière plus précise d'évaluer la production d'une éolienne sur un site donné, en utilisant l'équation de la puissance cinétique du vent passant au travers d'une surface (Lilien, 2009):

$$P(\text{Watts}) = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3$$

Où ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^3), S est la surface perpendiculaire à la direction du vent (m^2), et V est la vitesse de l'air (m^2/s).

On a vu au chapitre 2 que la puissance électrique finale délivrée par l'éolienne dépendait du rendement aérodynamique du rotor (conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique), du rendement de la transmission mécanique, et enfin de celui du générateur électrique. Le premier est majoré par la limite de Betz, à environ 60 % de la puissance du vent disponible. Quant au rendement électromécanique, il est estimé que la plupart des petites éoliennes parviennent à récupérer 50 % de cette valeur limite (Les Compagnons d'Eole et al., 2012). Finalement, compte tenu des rendements, et en considérant la masse volumique de l'air égale à $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$ (15°C et pression atmosphérique de $101,3 \text{ Pa}$), la production électrique de l'éolienne est donnée par l'équation suivante :

$$P(\text{Watts}) = 0,5 * 0,5926 * \frac{1}{2} * \rho * S * V^3$$

$$P(\text{Watts}) = 0,5 * 0,2851 * D^2 * V^3$$

Où D est le diamètre du rotor de l'aérogénérateur. La puissance électrique fournie par cette équation correspond à une vitesse du vent précise et instantanée, donnée très difficile à obtenir.

Le tableau suivant reprend les valeurs sur lesquelles nous nous baserons ici pour effectuer le calcul. Il s'agit des fréquences moyennes horaires du vent, mois par mois, de six catégories de vitesse et toutes directions confondues, à Uccle.

V (m/s)	Fréquence du vent (%)											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0 à 2.5	27.7	30.7	30.5	31.3	40.8	45.0	49.9	46.4	50.3	43.8	36.8	29.7
2.51 à 5.5	33.3	34.1	36	38.1	41.1	41	37.9	38.4	37.6	35.2	34.7	32.5
5.51 à 8	24	20.9	20.1	21.8	14.9	11.5	10.2	12.2	10.2	11.5	18.6	22.8
8.01 à 11	10	9.5	0.9	6.7	2.8	2.1	1.7	2.5	1.4	4.1	6.7	10.2
11.01 à 14	3.6	3.4	3.3	1.8	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3	1.2	2.6	3.6
>14	1.3	1.3	1.1	0.2	0	0	0	0	0	0	0.4	1.2

tab. 59: Fréquences des vitesses à Uccle, mois par mois (source: Bodeux, 1977)

L'utilisation de ces données permettra de connaître la production d'électricité mensuelle. Cependant, les valeurs des vitesses du vent ci-dessus sont calculées à une hauteur de 10m. Or, celles-ci augmentent avec la hauteur, c'est pour cela que l'on cherche à installer les mâts à le plus haut possible. Pour les petites éoliennes domestiques, cette augmentation n'est généralement pas prise en compte puisque celle-ci n'est pas très importante vu les faibles hauteurs du mât. Dans le cas étudié ici, il s'agit de puissances supérieures puisque l'on se trouve à une échelle plus importante, donc il importe d'en tenir compte. Le profil logarithmique du vent est donné par la relation suivante (Suisse Eole, 2013):

$$V(h) = V(h_0) * (\ln(h/z_0) / \ln(h_0/z_0))$$

Où $V(h_0)$ est la vitesse mesurée à la hauteur h_0 , soit dans ce cas-ci la vitesse à une hauteur de 10m, et z_0 est la longueur de rugosité, pour tenir compte de l'influence du terrain. Celui-ci est donné suivant les classes de rugosité, reprises au tableau ci-dessous.

Classe de rugosité	Type de paysage
0	Surface d'eau
0,5	Terrain complètement dégagé avec une surface lisse
1	Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines doucement arrondies
1,5	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1.250 m les unes des autres
2	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres
2,5	Terrain agricole avec beaucoup de constructions, arbrisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres
3	Villages, petites villes, terrains agricoles avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté
3,5	Grandes villes avec de hauts immeubles
4	Très grandes villes avec de hauts immeubles et des gratte-ciel.

tab. 60: Classe de rugosité des sols (source: Suisse Eole, 2013)

L'îlot de Rotheux se situe a priori dans la classe 2,5, correspondant à un $z_0 = 0,2$ (Suisse Eole, 2013). Avant d'utiliser les vitesses du vent issue du tableau 59, elles seront donc majorées en fonction de la hauteur de mât considérée.

Le potentiel éolien sera évalué pour plusieurs aérogénérateurs trouvés sur le marché, dont les caractéristiques nécessaires au calcul sont fournies par le fabricant, à savoir:

- Diamètre des pales
- Hauteur du mât
- Vitesse de mise en rotation des pales (vitesse minimum)
- Vitesse de puissance nominale au-delà de laquelle la puissance n'augmente plus (vitesse nominale)
- Vitesse au-delà de laquelle l'aérogénérateur doit être arrêté (vitesse maximum)

En fonction de la puissance fournie par l'éolienne, se pose la question du nombre d'éoliennes à installer. À l'échelle domestique, seule suffit généralement, et l'espace est restreint. À l'échelle des grandes éoliennes, on cherche plutôt à regrouper les éoliennes en parc, à l'endroit le plus favorable et le moins contraignant pour l'environnement. Mais à l'échelle intermédiaire, peu de projets et peu d'informations existent à ce jour. Il est certain qu'une grande éolienne permettrait de subvenir aux besoins de l'îlot, mais elle ne serait pas intégrable au paysage périurbain étant donné l'ensemble des contraintes environnementales, urbanistiques et techniques auxquelles elles sont sujettes. Dans le cadre de ce travail, on ne s'est donc intéressé qu'à la catégorie des petites éoliennes (puissance < 100 kW), qui peuvent être intégrées beaucoup plus aisément. Dès lors, le nombre de petites éoliennes à installer repose sur l'aspect financier, et sur la distance minimale à respecter entre chacune d'elles, pour assurer leur bon fonctionnement. Elle est de sept fois le diamètre du rotor dans l'axe des vents dominants, et quatre fois celui-ci dans l'axe perpendiculaire.

3.5.2 Hypothèses

Données

Les données relatives au vent sont des mesures effectuées à Uccle. Cependant en Belgique, on peut considérer qu'il n'y a pas de grande variation entre les régions, pour autant que l'on ne se situe pas à la côte. Il faut noter également que les données utilisées correspondent à toutes les directions du vent confondues, alors que l'éolienne sera orientée dans la direction des vents dominants, c'est-à-dire suivant une orientation sud-ouest. L'hypothèse posée ici est que la répartition mensuelle des vitesses de vent atteintes dans la direction sud-ouest est équivalente à la répartition moyenne de l'ensemble des orientations.

Rendements

On s'est placé ici au maximum de la limite de Betz et du rendement électromécanique estimé des petites éoliennes. Mais cela n'entraîne pas de surestimation, car on constatera que ces valeurs fournissent une production électrique toujours légèrement inférieure à celle donnée par les fabricants.

3.5.3 Résultats

Après un parcours des différents fabricants et importateurs de petites éoliennes de Belgique et alentours, on constate, encore une fois, que l'échelle intermédiaire dans laquelle on se situe est peu développée. La majorité des aérogénérateurs proposés ont des puissances qui tournent autour de quelques kW pour les plus petits destinés à l'usage domestique, à 25 kW ou 50 kW pour les plus importants. Pour des puissances supérieures, on passe directement aux grandes éoliennes dont la puissance sera beaucoup trop importante pour le cas étudié ici. Certains importateurs affirment la venue prochaine d'éoliennes de puissance de 75 ou 100 kW, mais rien n'est encore disponible.

Le choix s'est finalement arrêté sur l'aérogénérateur "C&F green energy CF50", de l'importateur, distributeur, et installateur Ecolia (France), dont plusieurs de leurs produits sont installés en Belgique. Voici les données relatives au produit, fournies par le distributeur (voir fiche technique en annexe):

Eolienne C&F green energy CF50

Puissance nominale	50 kW
Diamètre des pales	20 m
Hauteur du mât	29 m
Vitesse minimale	2,2 m/s
Vitesse nominale	9 m/s
Vitesse maximale	30 m/s
Bruit	Non donné

tab. 61: Données techniques de l'éolienne C&F green energy CF 50

Mois par mois, la production électrique a été calculée pour les 6 catégories de vitesses données, tenant compte des vitesses minimales et nominales. On obtient la production mensuelle sur base des fréquences de chacune des catégories. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous, avec pour chaque mois, la production finale, et la vitesse moyenne du vent durant ce mois.

Mois	Puissance électrique (kWh)	Vitesse moyenne à 10m (m/s)	Vitesse moyenne à 29m (m/s)
Janvier	12 953	4,88	6,21
Février	10 789	4,67	5,94
Mars	9076	3,83	4,87
Avril	10 361	4,27	5,44
Mai	7310	3,47	4,42
Juin	5972	3,23	4,11
Juillet	5461	3,01	3,84
Août	6338	3,23	4,11
Septembre	5209	3	3,81
Octobre	6715	3,27	4,16
Novembre	9642	4,12	5,24
Décembre	12 616	4,79	6,10
TOTAL	102 443 kWh/an	3,81	4,85

tab. 62: Production mensuelle de l'éolienne C&F green energy CF50

Il est intéressant de comparer cet apport annuel avec l'énergie électrique fournie par les panneaux photovoltaïques à Rotheux, dans la situation optimisée où les besoins sont centralisés. Le potentiel éolien est donc équivalent à 50% du potentiel photovoltaïque.

Apport annuel PV centralisés	223 141 kWh/an
Apport annuel Eolien	102 443 kWh/an

Notons que la majoration de la vitesse du vent en fonction de la hauteur de l'éolienne, même si elle n'est que de 127 %, a beaucoup d'importance, étant donné que la vitesse est au cube dans la formule de la production électrique. Sans celle-ci, la production annuelle ne serait que de 63 026 kWh/an, soit environ 50 % de la production calculée si on tient compte de la vitesse réelle à la hauteur du mât de l'éolienne.

La répartition mensuelle de la production électrique, comme illustrée sur la figure suivante, montre que la production de l'éolienne est plus importante en hiver qu'en été, à l'inverse de la production photovoltaïque.

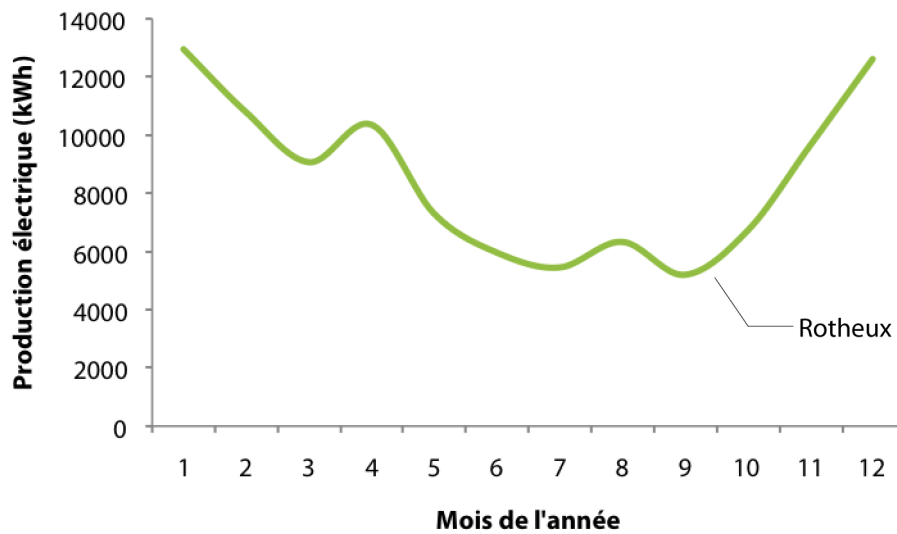


fig. 35: Production mensuelle de l'éolienne C&F green energy CF50

Du point de vue environnemental, il est plus que préférable que toutes les installations soient issues de fabricants très proches. Mais dans le cadre de l'évaluation du potentiel éolien du site, il est intéressant de regarder les apports en électricité que l'on pourrait avoir avec un autre type d'éolienne présente sur le marché américain. Le "Northerpower 100-24" est une éolienne de puissance de 100 kW, destinée précisément à l'échelle des agglomérations, dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous (voir annexe pour la fiche technique).

Northerpower 100-24

Puissance nominale	100 kW
Diamètre des pales	24 m
Hauteur du mât	37 m
Vitesse minimale	3 m/s
Vitesse nominale	14 m/s
Vitesse maximale	25 m/s
Bruit	55 dBA à 30 mètres

tab. 63: Données techniques de l'éolienne Northerpower 100-24

La méthode est appliquée une seconde fois et on obtient les résultats suivants.

Mois	Puissance électrique (kWh)	Vitesse moyenne à 10m (m/s)	Vitesse moyenne à 29m (m/s)
Janvier	24261	4,88	6,51
Février	20285	4,67	6,23
Mars	16057	3,83	5,11
Avril	18765	4,27	5,71
Mai	12736	3,47	4,64
Juin	10370	3,23	4,31
Juillet	9425	3,01	4,02
Août	11066	3,23	4,31
Septembre	8959	3	3,99
Octobre	12132	3,27	4,37
Novembre	17070	4,12	5,45
Décembre	23719	4,79	6,40
TOTAL	184 847 kWh/an	3,81	5,08

tab. 64: Production mensuelle de l'éolienne Northerpower 100-24

L'augmentation de la production annuelle provient de l'augmentation du diamètre des pales rotatives (en passant de 20 à 24 mètres), et de la hauteur du mât (de 29 à 37 mètres). On constate que dans ce cas, le potentiel se rapproche du potentiel photovoltaïque.

Apport annuel PV centralisés	223 141 kWh/an
Apport annuel Eolien 50 kW	102 443 kWh/an
Apport annuel Eolien 100 kW	184 847 kWh/an

3.5.4 Conclusions

Nous avons calculé le potentiel éolien du site. Mais il faut maintenant tenir compte de son implantation sur le site.

Le bruit provoqué par l'aérogénérateur de 100 kW (Northerpower 100-24) donné par le fabricant est de 55 dBA à 30 mètres. L'arrêté du GW du 4 juillet 2002 associe des niveaux de bruit maximums à respecter en zone d'habitat et en zone d'habitat à caractère rural, pour les éoliennes d'une puissance au-delà de 99,9 kW. Ceux-ci sont de 50 dBA en journée, et 40 dBA pendant la nuit. On peut donc en déduire si l'éolienne peut se situer sur la surface de l'îlot ou non, et à quelle distance des maisons, compte tenu du fait que le doublement de la distance à la source de l'émission entraîne une diminution de 6 dB.

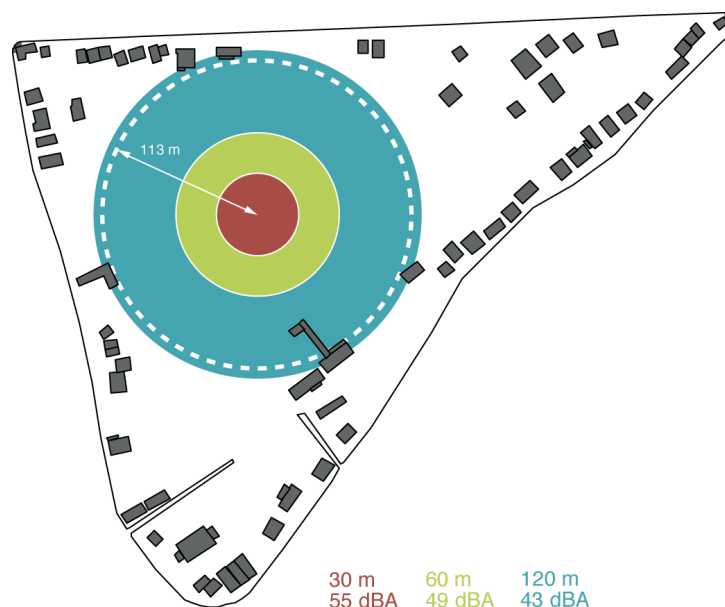


fig. 36: Niveau de bruit engendré par l'éolienne Northerpower 100-24

L'éolienne ne peut être placée sur l'îlot, puisque le bruit serait de 43 dBA au niveau des habitations les plus proches. Afin de garantir le niveau de 40 dBA, l'éolienne devra être placée à 180 m de toute habitation.

Quant à l'éolienne C&F green energy CF50 (puissance 50 kW), aucune information n'est disponible à propos du bruit émis, bien que de toute manière la législation n'a pas prévu de règlement pour les puissances inférieures à 99,9 kW. Cependant, on observe sur le catalogue de ce même produit un niveau de bruit de 35 dBA à 60 m pour une éolienne de puissance de 20 kW. On peut donc déduire que le niveau émis par le CF50 sera un niveau intermédiaire entre celui de 20 kW et celui de 100 kW, et qu'il n'y aura pas de problème à l'intégrer sur le site même de l'îlot. C'est un avantage non négligeable en terme d'occupation de l'espace et de coût, mais l'installation d'une éolienne en plein centre de l'îlot anéantit toute possibilité de densification ultérieure.

Il est évident qu'avec des aérogénérateurs similaires à ceux étudiés ci-dessus, il serait impossible d'en installer plus d'un, vu le diamètre du rotor et les distances minimales à respecter. En effet, au-delà de 20 m de diamètre, ces distances sont de plus de 140 m dans la direction du vent dominant, et 80 m dans la direction perpendiculaire, comme l'illustre le dessin ci-dessous représentant l'îlot de Rotheux.

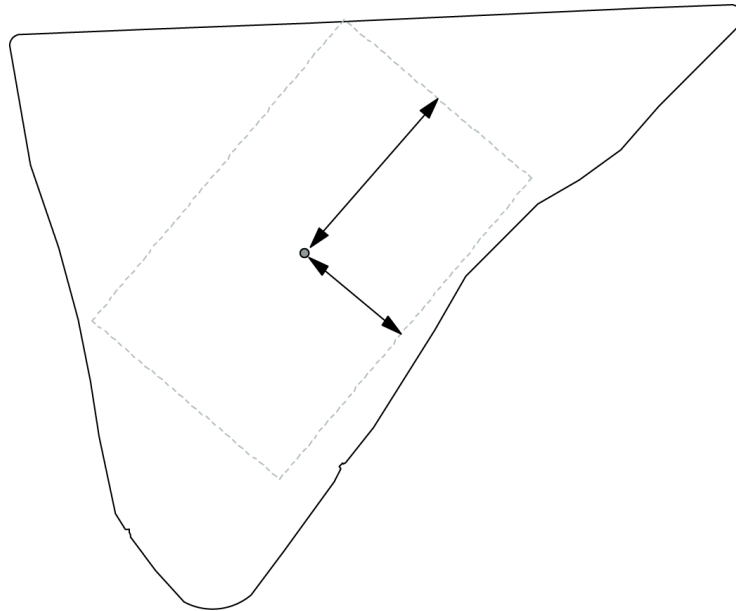


fig. 37: Distance à respecter entre plusieurs éoliennes Northerpower 100-24

On peut donc se demander s'il ne serait pas plus avantageux d'installer plusieurs éoliennes de plus petite taille. Cependant, multiplier les éoliennes risque d'être une solution peu avantageuse financièrement. De plus, l'impact réel de la proximité de plusieurs éoliennes n'est pas connu précisément et soulève encore les débats aujourd'hui, si bien que nous ne pouvons pas être certains du bénéfice de la production de plusieurs éoliennes, comparée à celle d'une unique éolienne de taille plus importante.

Dans notre cas, nous n'irons pas plus loin en considérant le potentiel éolien apporté par l'éolienne C&F green energy CF50 (puissance 50 kW), qui peut être intégrée à l'îlot.

3.6 Conclusions

À Rotheux, on a conclu précédemment que la centralisation des panneaux photovoltaïques était la solution la plus intéressante puisqu'elle permettait d'utiliser au mieux les PV. Le potentiel se situe donc entre 223.141 kWh/an (2.148 m² de PV – situation centralisée) et 314.669 kWh/an (3.171 m² – situation décentralisée). À Vivegnis, on a vu que la centralisation n'était pas une solution puisque chacun ne pouvait y trouver un intérêt individuel. Le potentiel sera donc de 139.945 kWh/an (1.505 m² de PV), sans possibilité d'utiliser d'une meilleure manière les panneaux.

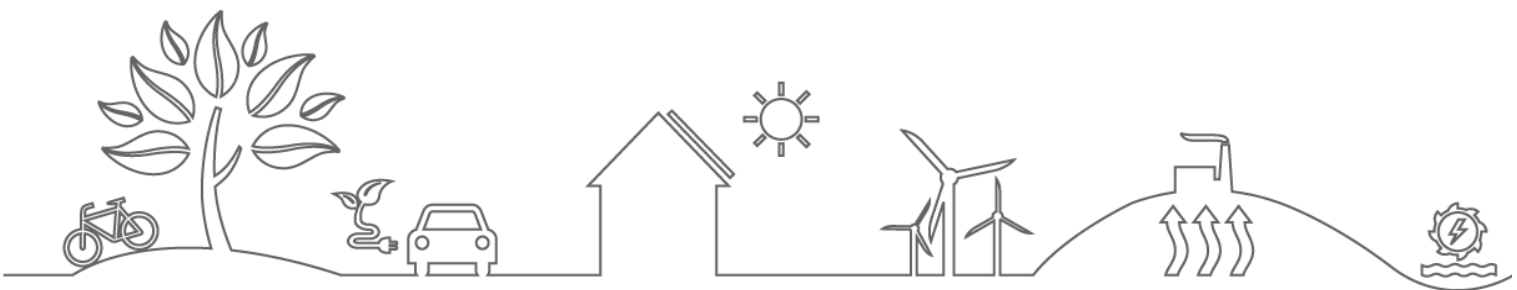
En ce qui concerne les capteurs solaires thermiques, on a calculé la surface de capteurs nécessaire pour couvrir 60% des besoins annuels des habitants. La question de la compatibilité avec les panneaux solaires est donc très importante, et cela doit être vérifié pour chaque toiture. À Rotheux, que les PV soient centralisés ou non, il reste toujours une surface libre accessible pour des capteurs en toiture. Cela est dû à la surface importante des toitures, et à l'ensoleillement de celles-ci qui permettent d'éviter d'atteindre des surfaces très importantes de capteurs pour apporter suffisamment d'eau chaude. Pour information, la surface totale des toitures (1 pent par habitation, le mieux exposé) est de 3963 m², et les PV, en situation décentralisée, couvrent 80 % de ceux-ci (soit 3171 m²). La surface de capteurs nécessaire pour l'ensemble de l'îlot est de 352 m², et chaque toiture individuelle possède la surface nécessaire à sa production. C'est le cas aussi lorsque les PV sont centralisés, puisqu'ils ne couvrent de cette façon pas plus de 80 % des toitures concernées.

Notons que nous ne tenons pas compte ici de l'impact paysager que représente d'aussi grandes surfaces de panneaux et de capteurs en toiture.

À Vivegnis, les PV, décentralisés au niveau de chaque habitation couvrent une surface de 1.505 m². La surface totale est de 1.881 m² (1 pent de toiture par habitation, celui le mieux exposé), et il reste donc 376 m² de libre. Avec des capteurs décentralisés, la surface nécessaire de capteurs est de 432 m². Lorsqu'on regarde chaque habitation au cas par cas, on voit que 31 habitations sur les 57 ne possèdent pas la surface nécessaire en toiture, bien que les autres la possèdent. Cela est dû d'une part au plus faible ensoleillement des toitures qu'à Rotheux, ce qui oblige donc à poser une plus grande surface de capteurs par ménage. D'autre part, cela est dû au fait que plusieurs ménages vivent sous le même toit, ce qui augmente considérablement la surface à installer. Si on faisait le choix de poser les capteurs solaires de manière centralisée sur les toitures les plus ensoleillées, la surface de capteurs nécessaires tomberait à 395 m². Cela dit, si ces toitures sont déjà couvertes à 80 % par des PV, il ne reste que 144 m² de toiture libre, insuffisants pour les capteurs solaires. On pourrait également diminuer la surface des PV, mais vu le potentiel déjà faible lorsque les toitures sont couvertes à 80%, l'intérêt est mitigé. On préférera dans le cadre de ce travail exploiter le potentiel maximum de chacun d'eux (capteurs et PV), mais de manière séparée en ce qui concerne l'îlot de Vivegnis.

La composition des différents scénarios du pôle énergie devra tenir compte d'un fait important concernant la cumulation de plusieurs systèmes énergétiques. Lorsque l'on combine plusieurs systèmes, il faut être très prudent quant au rendement global que cela va engendrer. En effet, la cumulation de plusieurs systèmes ne garantit pas la cumulation des rendements ! Au contraire, il se peut que le rendement d'un système soit considérablement réduit lorsqu'on lui en joint un autre. Il faut donc réfléchir non seulement en terme de rentabilité financière, de façon à ne pas multiplier les systèmes inutilement, mais également en terme de cumulation des rendements.

Chapitre 4 : Bilans & Conclusions



1. Bilans de consommation en énergie primaire et résultats

L'objectif ici va être de faire varier les différents paramètres relatifs aux consommations énergétiques, et voir dans quelle proportion les énergies renouvelables peuvent être intégrées, de façon à diminuer le plus possible la consommation en énergie primaire des îlots résidentiels.

Le but est de retenir les paramètres qui ont la plus grande influence sur la consommation d'énergie primaire, pour déterminer l'attitude à adopter dans le cas des deux îlots.

Bien entendu, il existe une très grande quantité de combinaisons possibles entre les différents paramètres relatifs aux 3 pôles étudiés (le transport – les bâtiments – les énergies renouvelables). Les scénarios étudiés ici ne forment donc pas une liste exhaustive. Ils sont le reflet de tout ce qui y a été découvert et discuté au cours de ce travail.

En particulier, nous avons vu que les différents systèmes énergétiques ne conviennent pas à tous les cas. C'est ce que reprend le tableau ci-dessous, à l'issue de ce qui a été vu aux chapitres 2 et 3.

Systèmes énergétiques	ROTHEUX				VIVEGNIS			
	PEB	BE	TBE	P	PEB	BE	TBE	P
Combustion bois	X	X	X	X				
Combustion gaz					X	X	X	X
Combustion mazout	X	X	X	X	X	X	X	X
« Tout électrique »				X				X
PAC (air, sol, eau)		X	X	X	(x) ²⁷	(x) ²⁷	(x) ²⁷	(x) ²⁷
Cogénération					X	X	X	
Capteurs solaires	X	X	X	X	X	X	X	X
Panneaux photovoltaïques	X	X	X	X	X	X	X	X
Eoliennes	X	X	X	X				

tab. 65: Résumé des systèmes énergétiques qui seront étudiés

La discussion se fera selon la méthode suivante :

Pour chaque cas de rénovation étudié (PBE, BE, TBE ou P), différents systèmes énergétiques seront envisagés de façon à répondre aux besoins. Ces systèmes seront choisis sur base de l'analyse réalisée au cours de ce travail. Pour chacun d'entre eux, nous regarderons dans quelle proportion les énergies renouvelables peuvent intervenir, selon les potentiels calculés au chapitre 3, et nous en déduirons quelle(s) solution(s) combinée(s) permet de réduire au mieux les consommations en énergie primaire.

En ce qui concerne le transport, la consommation énergétique de base utilisée est le scénario d'une réduction raisonnable et plausible de la consommation par un report modal de 20% sur les transports en commun pour l'îlot de Vivegnis, et la mise en place d'un covoiturage pour l'îlot de Rotheux pour les déplacements domicile-école. La voiture électrique sera intégrée dans un second temps, pour les deux îlots, en considérant que l'électricité nécessaire est produite sur place. Nous verrons alors son impact sur la consommation en énergie primaire globale. Une fois que tous ces scénarios auront été investigués, des conclusions pourront être tirées quant à la meilleure façon de réduire les consommations énergétiques pour chacun des deux îlots.

Les données qui ne varient pas d'un scénario à l'autre sont les potentiels en énergie solaire et éolienne calculés au chapitre 3.

Ces valeurs sont reprises sur le graphique ci-dessous, pour chacun des deux îlots. A Rotheux, le potentiel photovoltaïque maximum est de 314.669 kWh/an. Cependant, nous avons vu que la centralisation des panneaux était envisageable. Lorsque les panneaux sont placés sur les toitures qui reçoivent au minimum 90 % de l'ensoleillement, chaque mètre carré de PV produira 5% d'électricité en plus que dans le cas des PV

²⁷ A Vivegnis, nous avons exclu l'utilisation des PAC géothermiques, mais nous avons décidé d'envisager tout de même la pompe à chaleur grâce à l'aérothermie.

décentralisés. L'installation est ainsi optimisée, mais la production globale d'électricité sera inférieure puisque la surface des PV est nettement inférieure. Le potentiel solaire photovoltaïque sera dans ce cas de 223.141 kWh/an. Il représente la surface contenue en-dessous de la ligne blanche discontinue sur le graphique.

Rappelons qu'à Vivegnis, les potentiels ne peuvent être additionnés puisqu'il n'est pas possible d'utiliser conjointement des capteurs solaires thermiques et des panneaux photovoltaïques.

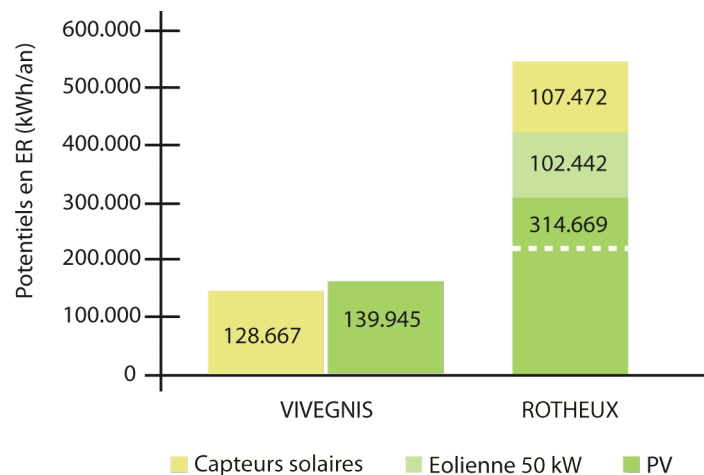


fig. 38 : Potentiels en énergies renouvelables sur le site de Vivegnis et de Rotheux

1.1 Ilot urbain: Vivegnis

Le premier scénario étudié est celui pour lequel les besoins nets en énergie pour le chauffage sont les moins diminués par la rénovation. Il s'agit de la rénovation basse énergie avec des besoins en énergie pour le chauffage limités à 60 kWh/m².an.

Dans un premier temps, nous envisageons le cas où la production de chaleur se fait individuellement dans chaque habitation. Nous comparons alors ici deux systèmes de production différents, que sont une chaudière à condensation au gaz naturel, et une pompe à chaleur. Nous avons conclu, cependant, au chapitre 2, que la PAC, géothermique ou aérothermique, était un système difficilement exploitable en milieu urbain construit et dense, de par le manque d'espace disponible. En effet, il est quasiment impensable de recourir à une PAC géothermique, dont l'espace requis pour les capteurs peut difficilement être rencontré sur l'îlot. Quant à la PAC aérothermique, il faut encore pouvoir s'assurer que les habitations possèdent un accès à un jardin ou une cour orientée vers le centre de l'îlot disponible pour l'installation. Ce système a cependant été évalué ici de façon à observer s'il pourrait néanmoins se justifier, par une diminution très intéressante et non négligeable de la consommation en énergie primaire, par rapport à la chaudière au gaz.

Nous avons déterminé, au chapitre 3, les consommations finales en énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, relatives aux différents systèmes de production envisagés, et les différentes consommations électriques. Les résultats de l'évaluation du bilan pour ce premier scénario sont repris dans le tableau suivant (sans potentiel solaire pour le moment).

VIVEGNIS – RENOVATION BE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE				
	Chaudières GAZ		PAC eau	
	CONSO FINALE	CONSO EP	CONSO FINALE	CONSO EP
Chauffage	591.858 kWh/an (76,6 kWh/m ² .an)	591.858 kWh/an (76,6 kWh/m ² .an)	260.386 kWh/an (33,7 kWh/m ² .an)	650.965 kWh/an (84,25 kWh/m ² .an)
ECS	476.544 kWh/an (61,7 kWh/m ² .an)	476.544 kWh/an (61,7 kWh/m ² .an)	153.175 kWh/an (19,8 kWh/m ² .an)	382.938 kWh/an (49,6 kWh/m ² .an)
Electricité (Aux+appareils)	330.718 kWh/an (42,8 kWh/m ² .an)	826.795 kWh/an (107 kWh/m ² .an)	330.718 kWh/an (42,8 kWh/m ² .an)	826.795 kWh/an (107 kWh/m ² .an)
Transport (Report modal de 20% considéré)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)
Total		2.025.770 kWh/an 262,2 kWh/m².an		1.991.270 kWh/an 257,7 kWh/m².an

tab. 66 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et production de chaleur individuelle

La première observation que l'on peut faire concerne la valeur finale de la consommation en énergie primaire (257,7 ou 262,2 kWh/m².an), qui semble à première vue très importante. Nous allons essayer de comprendre pourquoi, observant sur le graphe ci-dessous la part relative de chaque élément consommateur dans le bilan global en énergie primaire.

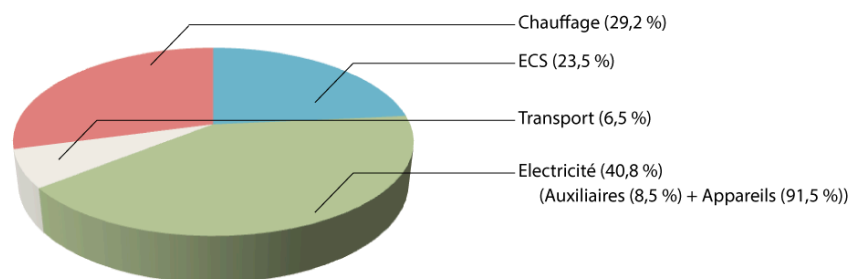


fig. 39: Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Répartition de la consommation en énergie primaire entre les différents postes

Les parts relatives du chauffage et de l'ECS sont dépassées par la consommation en électricité. La raison de ce phénomène est double. D'une part, nous avons considéré ici un niveau de rénovation élevé par rapport à la consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments avant rénovation, en accord avec notre hypothèse de départ de considérer la réduction des besoins énergétiques, avant la compensation par des énergies renouvelables. Dans la situation actuelle, avant toute rénovation, la demande annuelle pour le chauffage des bâtiments de l'îlot est en moyenne de 184 kWh/m².an, soit trois fois plus que la demande considérée dans ce scénario. D'autre part, la consommation électrique étudiée ici n'est pas seulement la consommation relative au bâtiment en lui-même, mais nous avons tenu compte également de la consommation relative à l'ensemble des appareils électroménagers, à l'éclairage, à la cuisson, etc. qui représente 90% de la consommation électrique totale (les 10% restant correspondent à l'électricité nécessaire pour les auxiliaires). Dès lors, le niveau de consommation en énergie primaire, si on ne regarde que le pôle bâtiment, ne peut être comparé au niveau E_{spec} d'un bâtiment calculé avec la PEB actuelle. Le facteur de conversion de l'électricité de 2,5 accentue encore la différence avec ce niveau E_{spec} . Ces consommations supplémentaires ont été prises en compte en raison de la volonté de départ de considérer

l'entièreté des consommations liées aux habitants d'un îlot résidentiel, et d'étudier l'intégration des énergies renouvelables dans le bilan global. En effet, il n'aurait pas été pertinent de considérer par exemple le maximum du potentiel photovoltaïque présent sur l'îlot, en considérant qu'il n'allait couvrir que la part des consommations relatives à la main mise de l'architecte. Au-delà de celles-ci se trouvent toutes les autres consommations énoncées ci-dessus, qui devront, elles aussi, être finalement couvertes par des énergies renouvelables.

La part importante de la consommation électrique dans notre bilan explique donc pourquoi la consommation en énergie primaire semble si élevée. Ce phénomène sera accentué au cours des scénarios qui suivront, pour lesquels les consommations relatives au chauffage diminueront, alors que la consommation électrique restera constante, ou sera augmentée par l'électricité nécessaire à la ventilation pour les rénovations TBE et P.

Il convient donc de préciser dans quelles conditions l'analyse des résultats sera effectuée. Par rapport à la demande actuelle des bâtiments de l'îlot, envisager l'hypothèse de la rénovation basse énergie (BE) entraîne une réduction de 38 % de la consommation globale en énergie primaire de l'îlot (bilan calculé de la même manière que ci-dessus). Ensuite, il s'agit d'introduire les énergies renouvelables dans le bilan, en mesurant simultanément l'impact d'un niveau d'isolation encore plus élevé sur celui-ci, afin de déceler la manière la plus intéressante de réduire la consommation globale en énergie primaire. Les conclusions tirées ici ne concernent donc que la situation où un niveau de rénovation relativement élevé est atteint dès le départ.

Nous allons à présent introduire les capteurs solaires et les PV dans le bilan, compte tenu du fait qu'ils ne peuvent être utilisés simultanément. L'avantage d'une éventuelle PAC se situe à 2 niveaux. Premièrement, comme le montre le tableau des résultats plus haut, la PAC permet un bénéfice au niveau de la consommation en énergie primaire uniquement au niveau de l'ECS, conséquence directe des différents rendements de production. Deuxièmement, la PAC offre un gain sur la consommation globale en énergie primaire lorsque l'électricité nécessaire à son utilisation peut être produite par les PV. Alors que le bénéfice apporté par la PAC était presque inexistant dans le premier scénario (juste dû au gain sur l'ECS), il sera intéressant de constater si, oui ou non, l'apport d'électricité produite par les panneaux solaires photovoltaïques permettra de changer ce résultat. C'est ce que nous pouvons observer dans le tableau ci-dessous, qui intègre le potentiel maximum en solaire photovoltaïque de l'îlot dans le bilan global.

VIVEGNIS – RENOVATION BE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE – AVEC PV				
	Chaudières GAZ		PAC eau	
	CONSO FINALE	CONSO EP	CONSO FINALE	CONSO EP
Chauffage	591.858 kWh/an (76,6 kWh/m ² .an)	591.858 kWh/an (76,6 kWh/m ² .an)	260.386 kWh/an (33,7 kWh/m ² .an)	650.965 kWh/an (84,25 kWh/m ² .an)
ECS	476.544 kWh/an (61,7 kWh/m ² .an)	476.544 kWh/an (61,7 kWh/m ² .an)	153.175 kWh/an (19,8 kWh/m ² .an)	382.938 kWh/an (49,6 kWh/m ² .an)
Electricité (Aux+appareils)	330.718 kWh/an (42,8 kWh/m ² .an)	826.795 kWh/an (107 kWh/m ² .an)	330.718 kWh/an (42,8 kWh/m ² .an)	826.795 kWh/an (107 kWh/m ² .an)
Transport (Report modal de 20% considéré)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)
Total		2.025.770 kWh/an - 139.945*2,5 = 1.675.907 kWh/an 216,9 kWh/m².an		1.991.270 kWh/an - 139.945*2,5 = 1.641.407 kWh/an 212,4 kWh/m².an

tab. 67: Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et production de chaleur individuelle – exploitation du potentiel photovoltaïque

La PAC ne permet pas une diminution significative de la consommation en énergie primaire par rapport à la chaudière au gaz, puisque la production électrique des PV est insuffisante pour couvrir la consommation électrique engendrée par l'utilisation de la PAC. On peut le voir sur le graphique ci-dessous, qui reprend la consommation électrique de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur. La PAC ne se justifie donc pas dans ce cas-ci.

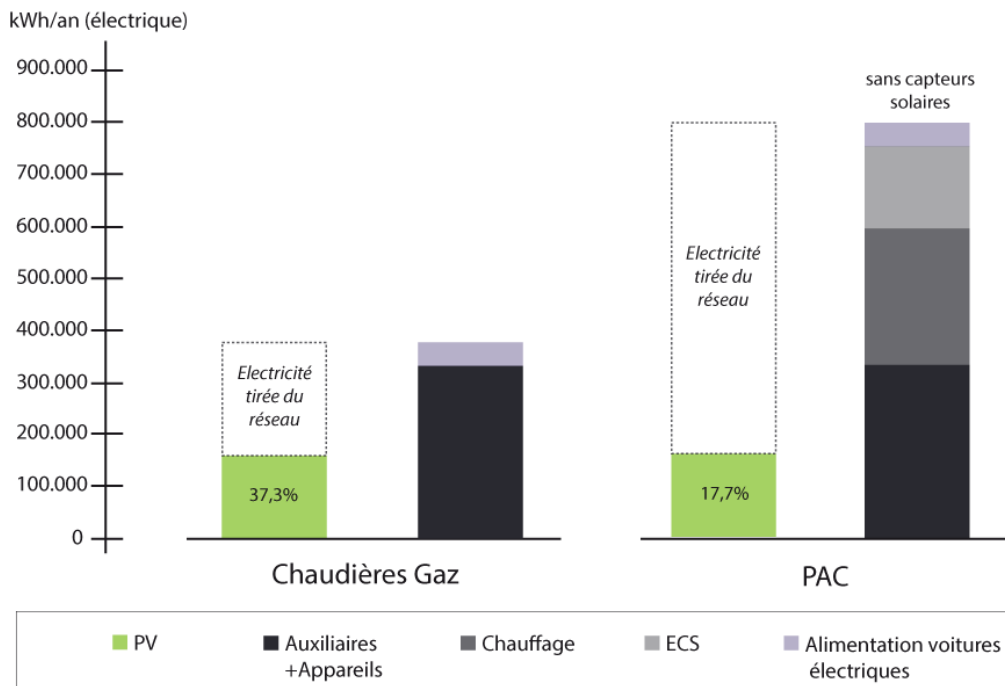


fig. 40 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Consommations électriques de l'îlot dans les deux cas de production de chaleur

Le gain sur l'énergie primaire, par rapport à la situation sans PV, est de 17,3 % (pour les chaudières au gaz décentralisées). Ce gain est apporté par les PV, qui permettent de couvrir 42,3 % de la consommation électrique relative aux auxiliaires et aux appareils (37,3 % si on compte également l'alimentation des véhicules électriques). Nous allons voir à présent si les capteurs solaires permettent un gain supérieur. Le tableau ci-dessous reprend les résultats du bilan calculé, à nouveau, en tenant compte cette fois-ci du potentiel des capteurs solaires à la place des PV.

VIVEGNIS – RENOVATION BE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE – Avec capteurs solaires				
	Chaudières GAZ		PAC eau	
	CONSO FINALE	CONSO EP	CONSO FINALE	CONSO EP
Chauffage	591.858 kWh/an (76,6 kWh/m ² .an)	591.858 kWh/an (76,6 kWh/m ² .an)	260.386 kWh/an (33,7 kWh/m ² .an)	650.965 kWh/an (84,25 kWh/m ² .an)
ECS	190.618 kWh/an (24,7 kWh/m ² .an)	190.618 kWh/an (24,7 kWh/m ² .an)	61.270 kWh/an (7,9 kWh/m ² .an)	153.175 kWh/an (19,8 kWh/m ² .an)
Electricité (Aux+appareils)	330.718 kWh/an (42,8 kWh/m ² .an)	826.795 kWh/an (107 kWh/m ² .an)	330.718 kWh/an (42,8 kWh/m ² .an)	826.795 kWh/an (107 kWh/m ² .an)
Transport (Report modal de 20% considéré)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)

Total		1.739.843 kWh/an 225,2 kWh/m².an		1.761.507 kWh/an 228 kWh/m².an
--------------	--	---	--	---

tab. 68 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et production de chaleur individuelle – exploitation du potentiel solaire thermique

On constate qu'il est plus intéressant de privilégier l'installation de panneaux photovoltaïques plutôt que de capteurs solaires thermiques, en ce qui concerne le gain en énergie primaire. En effet, le gain apporté par les capteurs solaires n'est que de 14,1 %, comparé au 17,3 % de gain apporté par les PV. Cependant, le potentiel des capteurs solaires ne nécessite que 432 m², alors que le potentiel PV exploité dans le calcul a une surface de 1505 m² de PV. Avec une surface de 432 m², les PV seraient centralisés sur les toitures les mieux exposées, mais le potentiel photovoltaïque ne serait plus que de 44.496 kWh/an. Ce dernier ne permet plus qu'une réduction de 5,5% de la consommation globale en EP. À surface égale, on privilégiera donc les capteurs solaires.

Nous allons maintenant intégrer la voiture électrique au bilan. On a calculé précédemment l'impact de la voiture électrique sur le bilan des consommations pour le transport. Si on imagine le scénario, certes extrême, où le parc automobile de l'îlot est remplacé par des voitures électriques (pas de report modal sur les TC dans ce cas), la consommation en énergie primaire tombe à 27.444 kWh/an (3,56 kWh/m².an), à condition que 44.642 kWh_{électrique}/an soient produits sur place pour leur alimentation. En intégrant ces données dans le bilan global, on observe que la voiture électrique ne permet pas de réduction de la consommation globale, et qu'elle tend même à l'augmenter très légèrement (**218 kWh/m².an** au lieu de **216,9 kWh/m².an**, pour le scénario chaudières gaz + PV). Ce résultat est la conséquence encore une fois de la trop faible production d'électricité par les PV, puisque l'électricité utilisée pour les voitures n'est plus disponible pour le bâtiment.

Toujours pour ce cas de rénovation BE, on investigate maintenant le cas d'une production de chaleur centralisée à l'échelle de l'îlot grâce à une unité de cogénération, dont la pertinence et les données nécessaires (rendement thermique, rendement électrique, production de chaleur, production d'électricité) ont été calculées au chapitre 3 grâce au logiciel COGENcalc. L'unité de cogénération est alimentée au gaz naturel, et la chaudière combinée qui permet de produire la part des besoins non couverte par l'unité également. Le critère de rentabilité du réseau de chaleur induit deux choses : la chaudière d'appoint doit également être centralisée à l'échelle de l'îlot ; et les capteurs solaires sont à proscrire. En effet, dans chacun de ces deux cas, le contraire induirait une réduction de la chaleur envoyée dans le réseau, ce qui empêcherait celui-ci d'être rentable.

VIVEGNIS – RENOVATION BE – PRODUCTION DE CHALEUR CENTRALISEE AVEC UNE UNITE DE COGENERATION ALIMENTEE AU GAZ NATUREL		
DONNEES		
Chaleur à fournir (Besoins bruts pour le chauffage + Besoins bruts pour l'ECS + 20 % de pertes dans le réseau)	882.407 kWh/an	
Chaleur fournie par l'unité de cogénération	501.140 kWh/an	
Chaleur fournie par la chaudière	381.267 kWh/an	
Rendement thermique de l'unité de cogénération	55,8 %	
Electricité fournie par l'unité de cogénération	290 839 kWh/an	
BILAN		
	CONSO FINALE	CONSO EP
Chauffage + ECS	1.283.783 kWh/an (166,2 kWh/m ² .an)	1.283.783 kWh/an (166,2 kWh/m ² .an)
Electricité (Aux en situation centralisée + appareils)	336.076 kWh/an (43,5 kWh/m ² .an)	840.190 kWh/an (108,7 kWh/m ² .an)
Transport (Report modal de 20% considéré)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)

Total		2.254.545 kWh/an - 290.839*1,8 = 1.731.035 kWh/an 224 kWh/m².an
--------------	--	---

tab. 69: Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et cogénération centralisée

Le potentiel en énergie renouvelable n'a pas été encore inclus dans le bilan, mais on voit qu'avec la cogénération, même si la consommation électrique globale est plus importante (à cause de la consommation des circulateurs), et que les besoins bruts ont été majorés de 20 % pour tenir compte des pertes dans le réseau, on observe une diminution de 14,5 % de la consommation en énergie primaire par rapport à la situation où la production de chaleur était décentralisée dans chaque bâtiment, grâce à l'autoproduction d'électricité. Les 290.839 kWh/an produit par l'unité de cogénération représente une part de 86,5 % de l'électricité nécessaire aux bâtiments, et une part de 76,4 % si on joint à la consommation électrique l'alimentation des voitures électriques.

En intégrant par la suite les panneaux photovoltaïques dans le bilan, le gain peut encore augmenter. Comme une partie de l'électricité nécessaire est déjà fournie par la cogénération, la part à couvrir par les PV est plus faible que lorsqu'il n'y avait pas de cogénération. Alors que dans le cas précédent, l'entièreté du potentiel PV, correspondant à 1505 m² de PV, était nécessaire, l'utilisation d'uniquement 486 m² de PV est suffisante ici pour combler l'apport de l'électricité produite par l'unité de cogénération. Ainsi, en combinant PV et cogénération, l'entièreté de la consommation électrique annuelle peut-être produite sur le site de l'îlot, et on atteint une consommation de **209,4 kWh/m².an**.

On remarque deux autres avantages à la combinaison des PV et de la cogénération. Le premier est l'addition des deux courbes de production. Lorsque l'on s'attarde sur les productions mensuelles, on constate que la cogénération ne fournira pas d'électricité les mois d'été, puisqu'elle doit être arrêtée. Par contre, c'est pendant ces mois d'été que la production mensuelle des PV est maximale. À l'inverse, la cogénération fournira plus d'électricité en hiver, quand les besoins en chaleur sont plus élevés, alors que la production des PV sera plus faible. Leur combinaison est donc complémentaire.

Enfin, le second avantage est la possibilité, cette fois-ci, que l'électricité nécessaire à l'alimentation d'éventuelles voitures électriques soit produite grâce à l'énergie renouvelable des PV, qui n'est plus autant sollicitée par la consommation électrique des bâtiments. Cela nécessite d'installer dans ce cas 996 m² de PV. On observe alors une réduction de la consommation globale d'énergie primaire qui tombe à **196 kWh/m².an**.

La discussion qui vient d'être faite est résumée dans le tableau ci-dessous, où sont reprises les consommations en énergie primaire globale des différentes situations, avec ou sans l'utilisation des potentiels en énergie renouvelable.

VIVEGNIS – RENOVATION BE – RESUME			
	Production décentralisée (chaudières gaz) (kWh/m ² .an)	Production décentralisée (PAC) (kWh/m ² .an)	Production centralisée avec cogé (kWh/m ² .an)
Sans PV-Sans capt	262,2	257,7	224
Avec capteurs	225,2	228	/
Avec PV	216,9 (1505 m ² de PV)	212,4 (1505 m ² de PV)	209,4 (486 m ² de PV)
Avec PV + VE	218 (1505 m ² de PV)	213,5 (1505 m ² de PV)	196 (996 m ² de PV)

tab. 70 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Résumé

L'installation d'une unité de cogénération est donc une meilleure solution du point de vue de la réduction de la consommation en énergie primaire. Bien entendu, l'aspect financier, qui n'était pas l'objet de ce travail, doit également entrer dans la discussion. Nous noterons simplement que dans le cas présent, où l'atteinte de la rénovation basse énergie pour ces bâtiments possède déjà son propre coût, s'orienter vers une production centralisée peut s'avérer intéressante financièrement, plutôt que de remplacer (si nécessaire) chaque chaudière individuelle existante par une chaudière à condensation au gaz naturel, comme il est envisagé dans le calcul ici. Toujours d'un point de vue financier, on voit que la cogénération combinée aux PV permet d'atteindre des consommations plus faibles, avec 60 % de surface de PV en moins, que les chaudières individuelles combinées aux PV.

Pour la suite, le calcul du bilan a été répété pour les autres scénarios de rénovation étudiés dans ce travail. L'idée est de visualiser l'impact de ces diminutions de la demande en chauffage des bâtiments constituant l'îlot sur le bilan global, et de constater d'éventuelles différences par rapport aux observations faites de la première investigation.

Après la rénovation basse énergie, est étudiée la rénovation telle que les besoins en énergie de chauffage atteignent ceux d'un bâtiment neuf construit selon la PEB actuelle. Les bâtiments de l'îlot atteignent en moyenne une demande nette en énergie pour le chauffage de 48 kWh/m².an. Lorsque l'on considère une production de chaleur individuelle pour chaque bâtiment, il n'y a pas de différence, par rapport à la situation précédente, en ce qui concerne l'installation éventuelle d'une PAC. Encore une fois, le faible gain énergétique de l'utilisation de celle-ci, par rapport à une chaudière à condensation au gaz naturel, ne permettrait pas de justifier les difficultés de l'intégration de celle-ci dans le milieu urbain (les PV peuvent couvrir cette fois-ci 20,2 % de la consommation électrique globale avec les PAC, contre 18,8 % dans le cas de la rénovation BE).

Le tableau ci-dessous présente le résumé des consommations en énergie primaire obtenues, comme il a été fait pour le cas précédent. En ce qui concerne la production centralisée sur l'îlot, on constate cette fois-ci que la cogénération n'offre plus le gain intéressant sur la consommation en énergie primaire de la situation précédente. En effet, la demande en chaleur des bâtiments ayant diminué par la rénovation, l'électricité produite par la cogénération est réduite également, puisque l'unité est dimensionnée selon les besoins en chaleur. Or, la consommation électrique quant elle, n'a pas diminué. L'électricité produite par l'unité de cogénération représente cette fois-ci une part de 76,8 % de l'électricité nécessaire aux bâtiments, et une part de 67,8 % si on joint à la consommation électrique l'alimentation des voitures électriques. De plus, les 20 % de pertes additionnées aux besoins bruts de chaleur prennent ici plus d'importance dans le bilan, par rapport à la solution décentralisée. Il sera donc plus intéressant dans ce cas-ci, d'un point de vue de la consommation en énergie primaire, d'opter pour une production décentralisée avec l'installation de PV en toiture. Ceux-ci permettent une réduction de 18,3 % de la consommation en énergie primaire (avec chaudières décentralisées).

VIVEGNIS – RENOVATION PEB – RESUME			
	Production décentralisée (chaudières gaz) (kWh/m ² .an)	Production décentralisée (PAC) (kWh/m ² .an)	Production centralisée avec cogé (kWh/m ² .an)
Sans PV-Sans capt	246,9	241,1	243,7
Avec capteurs	209,9,2	211,3	/
Avec PV	201,6 (1505 m ² de PV)	195,8 (1505 m ² de PV)	218,5 (838 m ² de PV)
Avec PV + VE	202,7 (1505 m ² de PV)	196,9 (1505 m ² de PV)	205,1 (1319 m ² de PV)

tab. 71 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation PEB – Résumé

Le cas de la rénovation très basse énergie ne fait qu'accentuer les conclusions tirées du cas précédent. La cogénération n'est plus du tout intéressante, puisque cette fois-ci, non seulement l'autoproduction d'électricité est encore amoindrie par la diminution de la demande en chaleur, mais la demande en électricité du bâtiment a elle-même été augmentée par la prise en compte d'un système de ventilation mécanique. Le tableau ci-dessous reprend le résumé des consommations en énergie primaire calculées.

VIVEGNIS – RENOVATION TBE – RESUME			
	Production décentralisée (chaudières gaz) kWh/m ² .an	Production décentralisée (PAC) kWh/m ² .an	Production centralisée avec cogé kWh/m ² .an
Sans PV-Sans capt	232,3	224,2	264,8
Avec capteurs	195,3	194,4	/
Avec PV	187,1 (1505 m ² de PV)	178,9 (1505 m ² de PV)	219,6 (1505 m ² de PV)
Avec PV + VE	188,2 (1505 m ² de PV)	180 (1505 m ² de PV)	220,6 (1505 m ² de PV)

tab. 72 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation TBE – Résumé

Enfin, le cas de la rénovation passive a été étudié également, uniquement dans la situation d'une production de chaleur individuelle puisque le réseau de chaleur n'est pas rentable, comme il a été conclu au chapitre 3. Cette fois-ci, avec des besoins en énergie pour le chauffage atteignant la faible valeur de 15 kWh/m².an, la PAC se distingue de la chaudière à condensation au gaz en permettant une réduction de 12 % de la consommation en énergie primaire par rapport à celle-ci, en utilisant la même surface de panneaux photovoltaïques. La figure ci-dessus illustre la consommation électrique relative aux deux scénarios de systèmes énergétiques étudiés, dans le cas du passif.

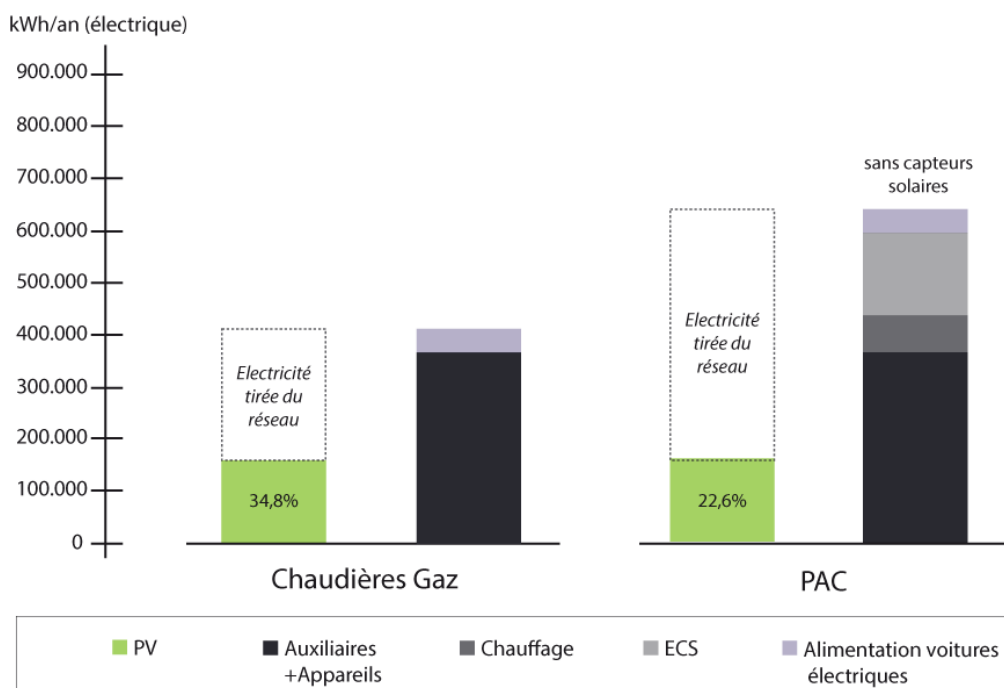


fig. 41 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur individuels

Cependant, il a été discuté brièvement de la rentabilité financière de la PAC au chapitre 3, et il en avait été conclu, d'après une étude existante, que la PAC n'est généralement pas rentable en passif, car les besoins sont considérablement réduits. La PAC ne semble donc pas une solution intéressante dans ce cas-ci non plus. L'utilisation des capteurs solaires pour l'eau chaude sanitaire dans le cas de passif est particulièrement intéressante, puisque ce sont les besoins en ECS qui sont prépondérants par rapport aux besoins pour le chauffage. Cependant, encore une fois, du point de vue de la consommation en énergie primaire globale, il sera plus intéressant d'exploiter l'entièreté du potentiel PV, plutôt que de placer les capteurs, comme le montre les résultats repris dans le tableau ci-dessous. Celui-ci présente l'ensemble des valeurs obtenues pour le bilan pour la rénovation passive.

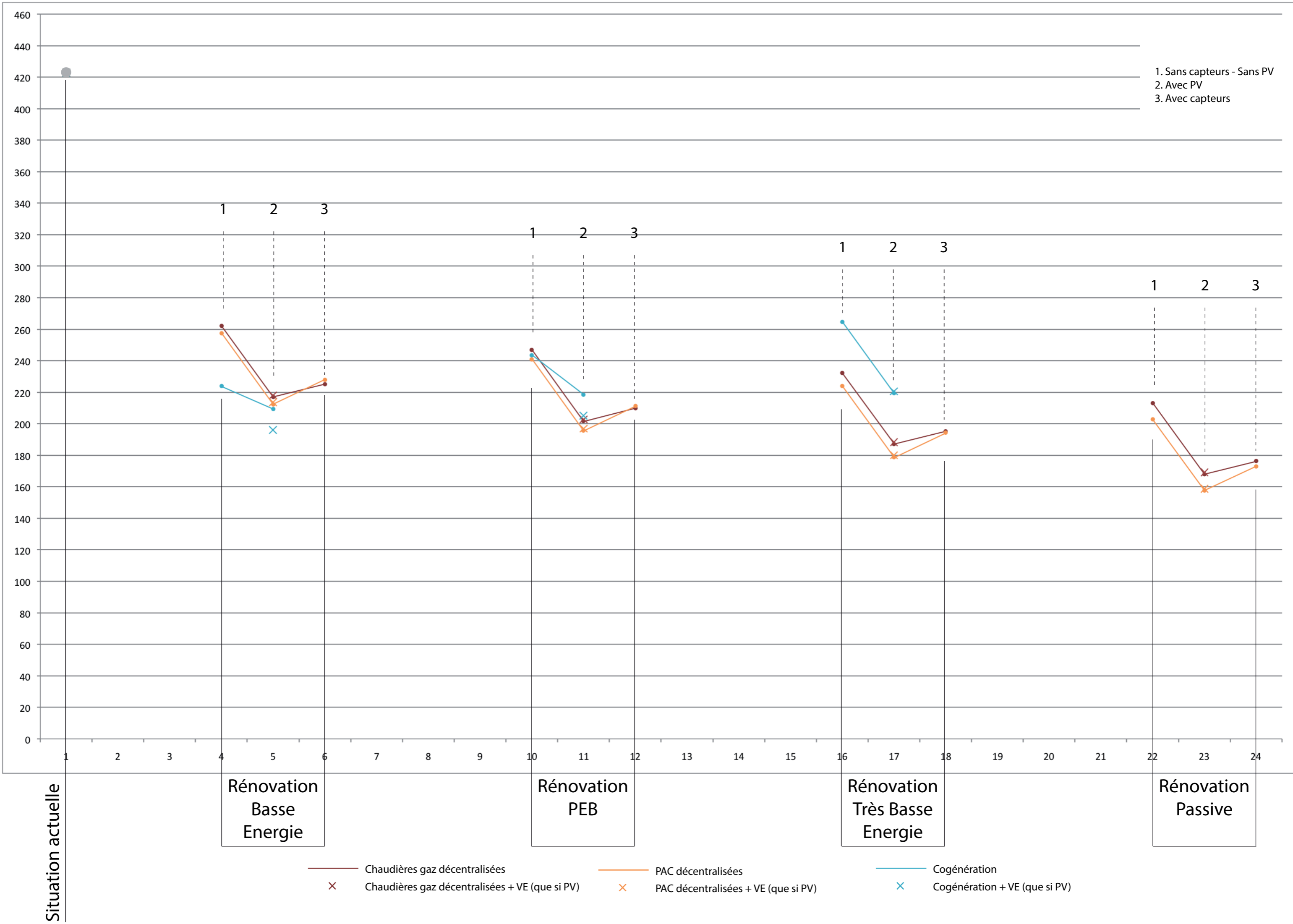
VIVEGNIS – RENOVATION PASSIVE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE				
	Chaudière GAZ		PAC eau	
	CONSO FINALE	CONSO EP	CONSO FINALE	CONSO EP
Chauffage	148.351 kWh/an (19,2 kWh/m ² .an)	148.351 kWh/an (19,2 kWh/m ² .an)	64.903 kWh/an (8,4 kWh/m ² .an)	162.258 kWh/an (21 kWh/m ² .an)
ECS	476.544 kWh/an (61,7 kWh/m ² .an)	476.544 kWh/an (61,7 kWh/m ² .an)	153.175 kWh/an (19,8 kWh/m ² .an)	382.938 kWh/an (49,6 kWh/m ² .an)
Electricité (Aux+appareils+ventilation)	356.878 kWh/an (46,2 kWh/m ² .an)	892.195 kWh/an (115,5 kWh/m ² .an)	356.878 kWh/an (46,2 kWh/m ² .an)	892.195 kWh/an (115,5 kWh/m ² .an)
Transport (Report modal de 20% considéré)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)		130.572 kWh/an (16,9 kWh/m ² .an)
Total		1.647.663 kWh/an 213,2 kWh/m².an		1.567.962 kWh/an 202,9 kWh/m².an
Si capteurs		1.361.736 kWh/an 276,2 kWh/m².an		1.338.200 kWh/an 173,2 kWh/m².an
Si PV		1.297.800 kWh/an 168 kWh/m².an		1.218.100 kWh/an 157,7 kWh/m².an
Si PV + VE		1.306.277 kWh/an 169,1 kWh/m².an		1.226.577 kWh/an 158,7 kWh/m².an

tab. 73 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation P – Résumé

En ce qui concerne les voitures électriques, alors que la cogénération permettrait pour la rénovation basse énergie de les prendre en compte dans le bilan de façon à diminuer la consommation globale, leur utilisation ici aura le même effet qu'en rénovation basse énergie sans cogénération, c'est-à-dire une augmentation (très faible) de la consommation globale.

Dans le cas de la rénovation passive, nous avons également calculé la consommation globale du scénario « tout électrique », qui représente une solution intéressante d'un point de vue économique pour le passif. Cependant, le faible potentiel de PV de cet îlot, encore une fois, ne peut couvrir la consommation électrique de l'installation, qui est alors la solution la moins intéressante d'un point de vue de la consommation en énergie primaire des 3 systèmes étudiés, avec une consommation de **215,1 kWh/m².an**, en utilisant le potentiel photovoltaïque.

Pour conclure l'analyse relative à l'îlot de Vivegnis, le graphique de la page suivante reprend chaque scénario investigué et la consommation en énergie primaire qui lui correspond.



Il est plus intéressant d'un point de vue énergétique de s'arrêter à une rénovation basse énergie (BE) et d'utiliser le potentiel PV existant, plutôt que de rénover jusqu'au stade passif sans exploiter le potentiel solaire photovoltaïque. En effet, les résultats précédents montrent que le gain sur la consommation d'énergie primaire, par rapport à la rénovation BE (production individuelle) est de 5,8 % en passant au stade PEB, 11,4 % en passant au stade TBE, et de 18,7 % en passant au stade passif. Or, pour cette rénovation BE, l'installation de PV afin d'exploiter l'entièreté du potentiel photovoltaïque du site permet de diminuer la consommation de 17,2 % ! Puisqu'elle ne permet qu'un gain de 1,5% supplémentaire, on peut en conclure qu'atteindre la rénovation passive pour cet îlot urbain, avec les difficultés et les surcoûts que cela engendrent, n'est pas nécessairement la bonne attitude, comparé à l'apport du potentiel photovoltaïque.

Maintenant, il est certain que combiner les PV au niveau de rénovation le plus élevé permet le gain le plus grand. Ce gain maximum se situe lors de l'atteinte du stade passif, avec 1505 m² de PV, où la consommation atteint 168 kWh/m².an (cas des chaudières décentralisées), soit un gain de 23% par rapport à la rénovation BE avec 1505 m² de PV (cas des chaudières décentralisées). Cependant, la faisabilité de cette solution, aussi bien techniquement que financièrement, rend son intérêt mitigé.

Il ne faut pas oublier la cogénération. Comme l'illustre très bien le graphique, l'intérêt de la cogénération diminue avec l'augmentation du niveau de rénovation. Elle n'est donc intéressante que pour la rénovation BE, pour laquelle le graphique illustre bien le fait que la droite relative à la cogénération est en-dessous de celle relative aux chaudières décentralisées, le bénéfice étant plus grand si on ne considère pas le potentiel photovoltaïque. De plus, on observe que c'est uniquement avec la cogénération, en rénovation BE, que les voitures électriques permettent de réaliser une diminution de la consommation en énergie primaire, alors que l'intégration de celles-ci, pour n'importe quel autre scénario, entraîne une légère augmentation de la consommation en énergie primaire.

Rénovation BE, avec cogénération, voitures électriques et 996 m² de PV permet un gain de **10 %** par rapport à la rénovation BE + 1505 m² de PV, alors que la rénovation passive, avec 1505 m² de PV, qui est le scénario permettant le gain le plus important, permet un gain de **23 %**. Toujours en comparaison avec la rénovation BE + 1505 m² de PV, la rénovation PEB + 1505 m² de PV entraîne une réduction de **6,6 %**, et la rénovation TBE + 1505 m² de PV entraîne une réduction de **13,7 %**. Au-delà de la rénovation passive qui comporte de nombreux obstacles, on peut se poser la question de l'utilité de rénover jusqu'au stade très basse énergie, vu le gain permis par la cogénération pour la rénovation basse énergie, et les avantages de la centralisation de la production d'énergie qu'elle engendre. De plus, dans le cadre d'une projection future de forte pénétration de voitures électriques, ce scénario est le seul qui permet d'en tirer bénéfice d'une réduction de la consommation en énergie primaire.

1.2 Ilot périurbain: Rotheux

Nous allons procéder de la même manière pour l'îlot périurbain de Rotheux.

Cette fois-ci, uniquement des scénarios de production de chaleur décentralisée dans chaque habitation sont étudiés, puisque le réseau de chaleur n'est pas pertinent, comme cela a été conclu au chapitre 3. Les systèmes de production considérés dans le calcul sont la chaudière à condensation au mazout, au bois, et la PAC. Même si l'échelle de l'îlot ne nous permet pas dans ce cas-ci d'exploiter une centralisation de la production de chaleur, elle nous permet d'exploiter plus efficacement le potentiel solaire en considérant que les PV ne sont placés que sur les toitures qui reçoivent plus de 90 % de l'ensoleillement solaire, si néanmoins leur production est suffisante. Ainsi, chaque mètre carré de PV produira en moyenne 5% d'électricité en plus que si leur production était décentralisée au niveau de chaque habitation. L'échelle de l'îlot permet également de considérer le potentiel éolien d'une petite éolienne d'une puissance nominale de 50 kW, dont l'apport annuel a été calculé au chapitre 3. En ce qui concerne le potentiel des capteurs solaires thermiques, c'est néanmoins la décentralisation de ceux-ci qui a été retenue, en raison des pertes thermiques que la centralisation induit. Rappelons que leur potentiel correspond à 60 % de la demande annuelle en énergie pour l'eau chaude sanitaire.

La figure ci-dessous rappelle la valeur des potentiels calculés au chapitre 3. La valeur indiquée pour les PV est le potentiel maximum. La surface en dessous de la ligne discontinue blanche représente la production des PV lorsqu'ils sont centralisés sur les toitures qui reçoivent minimum 90 % de l'ensoleillement.

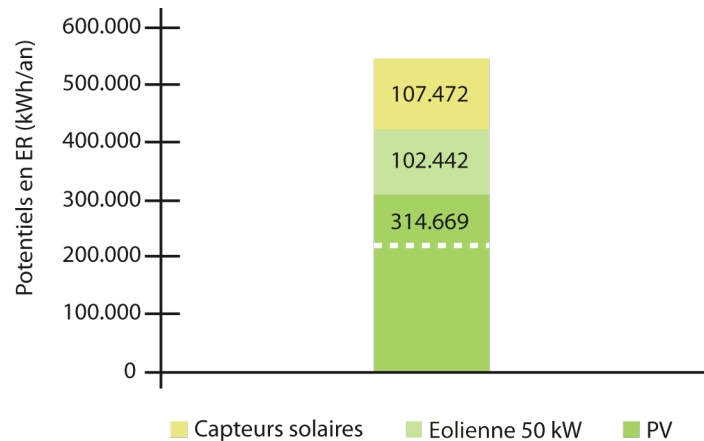


fig. 42 : Potentiels en énergies renouvelables sur le site de Rotheux

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus pour le bilan global des consommations en énergie primaire de l'îlot de Rotheux, dans le cas d'une rénovation basse énergie, avant d'exploiter les potentiels solaire et éolien.

Les rendements de production, nécessaires pour connaître les consommations finales en énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire d'après les besoins bruts, repris de l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments, ont démontré qu'il n'y avait qu'une très faible différence entre celui de la chaudière au mazout et celui de la chaudière au bois. Puisque le facteur de conversion en énergie primaire est de 1 dans chacun des deux cas, leur bilan global est très proche en terme de consommation en énergie primaire. Ne sont présentés ici, de ce fait, que les résultats de la chaudière au bois, représentatifs donc de ces deux cas, en ce qui concerne la consommation en énergie primaire.

ROTHEUX – RENOVATION BE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE				
	Chaudières GAZ		PAC eau	
	CONSO FINALE	CONSO EP	CONSO FINALE	CONSO EP
Chauffage	869.669 kWh/an (74,2 kWh/m ² .an)	869.669 kWh/an (74,2 kWh/m ² .an)	394.984 kWh/an (33,7 kWh/m ² .an)	987.461 kWh/an (84,25 kWh/m ² .an)
ECS	398.044 kWh/an (33,96 kWh/m ² .an)	398.044 kWh/an (33,96 kWh/m ² .an)	127.943 kWh/an (10,9 kWh/m ² .an)	319.858 kWh/an (27,3 kWh/m ² .an)
Electricité (Aux+appareils)	208.395 kWh/an (17,8 kWh/m ² .an)	520.908 kWh/an (44,5 kWh/m ² .an)	208.395 kWh/an (17,8 kWh/m ² .an)	520.908 kWh/an (44,5 kWh/m ² .an)
Transport (Covoiturage)		297.772 kWh/an (25,4 kWh/m ² .an)		297.772 kWh/an (25,4 kWh/m ² .an)
Total		2.086.473 kWh/an 178 kWh/m².an		2.126.077 kWh/an 181,4 kWh/m².an

tab. 74 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – production de chaleur individuelle

De nouveau, la consommation en énergie primaire globale semble élevée, même si elle est inférieure au cas de Vivegnis, pour le même type de rénovation, avec des chaudières décentralisées alimentées au gaz. Observons, à nouveau, la répartition de la consommation en énergie primaire selon chacun des postes consommateurs, par comparaison avec le graphique qui avait été dressé pour Vivegnis, dans le cas d'une rénovation BE également, avec des chaudières décentralisées au gaz.

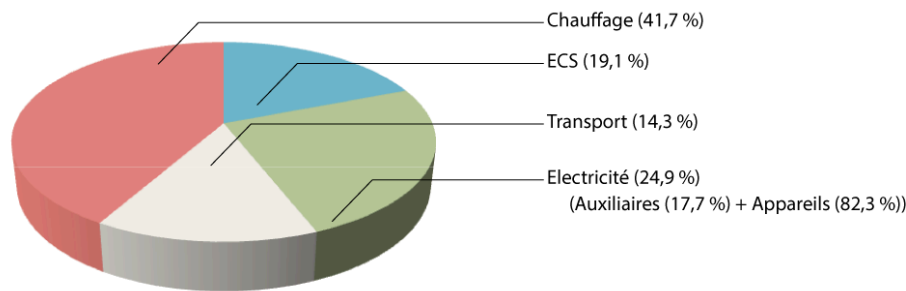


fig. 43 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – Répartition de la consommation en énergie primaire entre les différents postes

On constate premièrement que le chauffage occupe une part relative beaucoup plus importante dans le cas de Rotheux (41,7%) comparé au cas de Vivegnis (29,2 %), alors que le nombre d'habitations est proche dans les deux cas (55 à Rotheux et 57 à Vivegnis). Cela découle directement du fait que la surface chauffée moyenne par logement est beaucoup plus importante à Rotheux qu'à Vivegnis (respectivement 213 m² et 135 m²). En ce qui concerne la consommation électrique, on observe qu'elle n'occupe plus la part relative prépondérante qu'elle occupait à Vivegnis, alors que les mêmes postes électriques sont considérés. La raison de ce fait vient de la façon dont sont occupées les habitations dans les deux cas. À Rotheux, chaque habitation est occupée par un ménage, alors qu'à Vivegnis, nous avons constaté que les habitations étaient communément divisées en plus petits logements, pour plusieurs ménages. Or, la consommation électrique relative aux postes électriques hors auxiliaires est proportionnelle au nombre de ménages dans l'îlot. Puisque Vivegnis contient 97 ménages pour ces 57 habitations, et Rotheux uniquement 55 ménages, on comprend pourquoi la part relative de la consommation électrique est diminuée dans le cas de Rotheux. C'est également pour cette raison que la consommation globale finale est plus faible à Rotheux, comparée à celle de l'îlot de Vivegnis.

Ce phénomène touche également la consommation relative à l'ECS, qui est également proportionnelle au nombre de ménages dans l'îlot (phénomène moins marqué, car le nombre de personnes par ménage est plus faible à Vivegnis). À Vivegnis, c'était cette haute consommation en ECS au sein de l'îlot qui permettait à la PAC d'être légèrement avantageuse par rapport à la chaudière au gaz, même sans PV (conséquence directe des rendements de production). Mais lorsqu'on regarde les résultats du tableau ci-dessus, on voit que l'avantage de la PAC sur la chaudière pour l'ECS ne se marque plus dans la consommation finale, car la part relative du chauffage, pour laquelle la PAC ne permet pas de bénéficier, est beaucoup plus importante ici.

Rappelons, comme il a été dit précédemment, que les conclusions tirées ici ne concernent que des niveaux de rénovation élevés. Dans le cas de Rotheux, les besoins en énergie pour le chauffage des habitations de l'îlot sont actuellement, en moyenne, de 235 kWh/m².an, et la consommation globale en énergie primaire, calculée comme dans le tableau ci-dessus (cas des chaudières bois ou mazout), est alors de 394,4 kWh/m².an. La rénovation basse énergie permet donc un gain de 45 % sur la consommation globale.

À partir de ces résultats, nous allons intégrer progressivement les différents potentiels en énergie renouvelable calculés. Techniquement, les potentiels solaire thermique, photovoltaïque et éolien peuvent être cumulés (à l'inverse de Vivegnis). En ce qui concerne la production d'électricité, la cumulation de l'éolienne avec les PV n'est cependant pas toujours nécessaire. En effet, contrairement à Vivegnis, la production des PV, centralisés sur les toitures les mieux exposées, suffit à couvrir les besoins annuels des

habitations en électricité. Lorsque la demande en électricité augmente, soit par l'utilisation d'une PAC, soit par l'intégration des voitures électriques, le potentiel éolien pourrait alors être sollicité. La figure suivante illustre dans quelle proportion les potentiels en énergie renouvelable peuvent influencer sur le bilan. Pour chacun des deux scénarios (chaudières et PAC décentralisées), est représentée la *consommation en électricité de l'îlot*, en parallèle de la production électrique des PV et de l'éolienne.

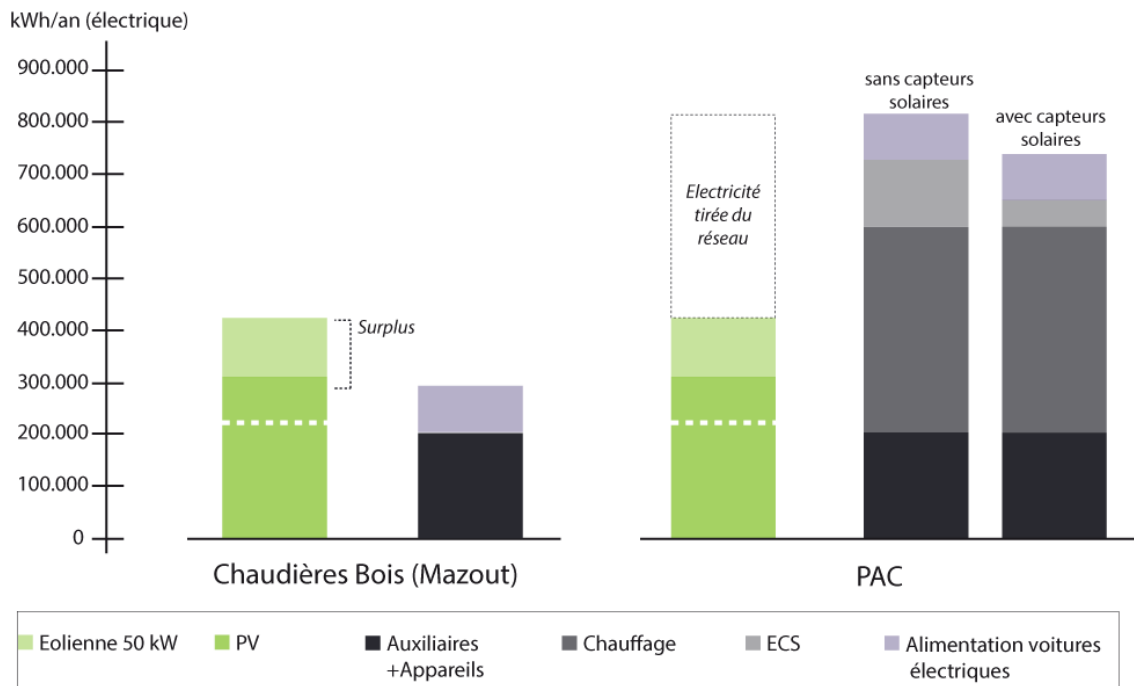


fig. 44 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur

Observons maintenant l'impact chiffré de l'intégration de ces potentiels en énergie renouvelable sur la consommation globale en énergie primaire. Le tableau ci-dessous reprend les résultats des bilans calculés de la même façon que précédemment, en tenant compte cette fois-ci des apports solaires et/ou éolien.

ROTHEUX – RENOVATION BE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE				
Capteurs solaires	PV	Eolienne	Chaudière BOIS CONSO EP (kWh/m ² .an)	PAC eau CONSO EP (kWh/m ² .an)
			178	181,4
X			157,6	165
	X		133,6	114,3
		X	156,2	159,5
X	X		113,2	97,9
X		X	135,8	143,2
	X	X	133,6	92,4
X	X	X	113,2	76,1

tab. 75 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – scénarios d'intégration des ER

À l'inverse de Vivegnis, on observe donc ici un réel avantage à l'utilisation de la PAC, à condition que celle-ci soit utilisée en combinaison avec un moyen de production d'électricité renouvelable sur le site. Les PV seuls, l'éolienne seule, ou même la combinaison des deux ne permettent pas cependant de couvrir l'ensemble de la demande en électricité générée par la PAC (comme on pouvait le voir illustré à la figure x). On comprend donc que plus le niveau de rénovation atteint sera élevé, plus l'électricité produite sur place pourra couvrir une part importante de la demande en électricité de la PAC, et plus celle-ci sera intéressante d'un point de vue de la consommation en énergie renouvelable, par rapport à la chaudière au bois (ou au mazout).

Au niveau du choix entre l'exploitation des différents potentiels en énergie renouvelable, on constate de nouveau que, si on doit faire le choix entre le potentiel des capteurs solaires thermiques ou celui des PV, on optera pour le potentiel des PV (2148 m²) qui permettent un gain de 25 % sur la consommation en énergie primaire, par rapport aux capteurs (352 m²) dont le gain est de 11,5 %. Cependant, si on diminue la surface des PV jusque la surface qu'occuperaient les capteurs solaires (c'est-à-dire 352 m²), ces PV ne permettent plus qu'une réduction de 4,4 % de la consommation globale en EP. À surface égale, il est donc préférable d'installer des capteurs solaires.

L'îlot de Rotheux permet néanmoins la cumulation des deux potentiels, ce qui est très intéressant, notamment combinés aux PAC, afin de réduire la demande en électricité de celles-ci. La combinaison la plus avantageuse d'un point de vue de la consommation en EP est, évidemment, l'utilisation simultanée des capteurs, des PV, et de l'éolienne, combinés avec la PAC, permettant un gain de 58 % sur la consommation globale. D'un point de vue économique, cette solution est cependant difficilement envisageable. Une solution qui semble être, à première vue, un bon optimum économique-énergétique, est la combinaison des PV et des capteurs solaires. Ceux-ci, utilisés en parallèle des chaudières, permettent de diminuer la consommation de 36 %. Dans ce cas, l'entièreté du potentiel photovoltaïque n'est pas nécessaire, et on peut se contenter de la situation optimale des 2148 m² de PV positionnés sur les toitures les mieux exposées. Si les PV et les capteurs sont utilisés en parallèle cette fois-ci des PAC, la consommation en EP globale est de 13,5 % inférieure à la situation avec des chaudières, mais l'entièreté du potentiel des PV est cette fois-ci exploité, ce qui correspond à 3171 m² de PV, non centralisés sur les toitures les mieux exposées. On aura donc plutôt tendance à s'orienter vers la combinaison chaudières+PV+capteurs, plutôt que PAC+PV+capteurs, car même si cette dernière permet un gain de 13,5 % sur l'autre, elle nécessite que la surface des PV soit, elle, augmentée de 48 %.

Combiner les PV et l'éolienne ne semble pas très intéressant à première vue, quand le potentiel PV de l'îlot lui permet de couvrir sa propre consommation électrique. De plus, l'éolienne possède bien plus de difficultés d'intégration et d'installation que les PV. On remarquera cependant un certain avantage à combiner l'éolienne aux PV, car leur courbe de production annuelle est complémentaire, comme l'illustre le graphique ci-dessous. En effet, la production des PV est maximale en été, alors que celle de l'éolienne sera minimale à ce moment-là, car les vents sont plus faibles.

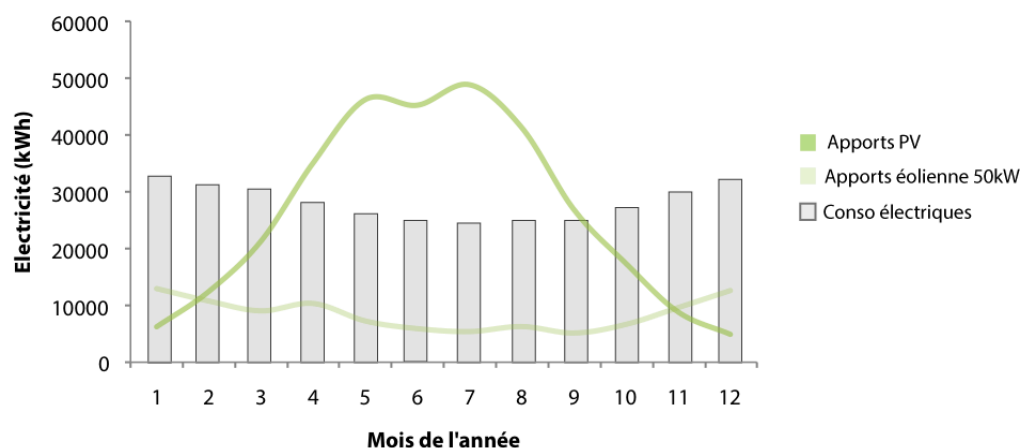


fig. 45 : Apports mensuels des PV et de l'éolienne à Rotheux, comparés aux consommations électriques mensuelles

Du point de vue de la demande mensuelle, il serait donc possible de trouver une juste combinaison entre une surface adéquate de PV combinée à l'éolienne, afin que la courbe de production approche au maximum la courbe de consommation en électricité.

En ce qui concerne le pôle transport, qui détient ici une part relative plus importante qu'à Vivegnis dans le bilan global, on constate que l'introduction de la voiture électrique (mêmes hypothèses que pour Vivegnis) permet de diminuer la consommation globale en EP. Pour pouvoir intégrer les voitures électriques au bilan, il faut que 90.899 kWh_{élec}/an soient produits sur l'îlot. Les voitures électriques associées aux consommations électriques des auxiliaires et des appareils représentent 95 % du potentiel photovoltaïque du site (cela était illustré à la figure x). En considérant la combinaison chaudières + PV + capteurs, leur introduction permet de réduire la consommation globale en énergie primaire de 21 % (on passe de **113,2 kWh/m².an** à **89,6 kWh/m².an**). Cela suppose cependant d'augmenter la surface des PV de 40 % (3023 m² au lieu de 2148 m²). Pour la combinaison PAC + PV + capteurs, l'entièreté du potentiel solaire est déjà sollicitée par les consommations du bâtiment. L'électricité fournie aux voitures sera donc de l'électricité qui ne sera plus fournie au bâtiment. Cela dit, on remarque dans cette situation que la consommation globale en EP, compte tenu des véhicules électriques, tombe tout de même à **93,7 kWh/m².an**, soit une diminution de 4,3 %. La raison de ce bénéfice tient du fait que le transport possède une part relative importante dans le bilan global, et que l'impact de la diminution de la consommation en EP relative au transport grâce aux voitures électriques se fait dès lors ressentir dans le bilan global.

À l'issue de cette première investigation, on peut donc tirer plusieurs conclusions :

- L'intégration de la voiture électrique dans l'attitude des habitants de l'îlot permet un réel gain sur la consommation en énergie primaire. Ce gain est surtout important lorsque le système de production de chaleur n'est pas consommateur d'électricité, car l'îlot contient dès lors le potentiel solaire nécessaire à la production de l'électricité qui leur est nécessaire.
- La justification de l'utilisation du potentiel éolien ne se fait pas tant au niveau de l'apport annuel, qui reste faible comparé à l'apport des PV, mais plutôt au niveau de l'apport mensuel, qui pourrait venir compléter intelligemment un apport solaire optimisé de façon à se rapprocher de la courbe de consommation électrique.
- La PAC, pour ce cas de rénovation, n'apparaît pas comme le système privilégié. En effet, le faible gain qu'elle permet par rapport aux chaudières, comparé à la surface nécessaire des PV qu'il faut installer en plus pour couvrir les besoins électriques de la PAC, ne la rend pas intéressante. On préférera dès lors la combinaison des chaudières avec des PV centralisés sur les toitures les mieux exposées.

Cette dernière conclusion pourrait cependant évoluer en fonction du niveau de rénovation considéré.

Nous allons à présent observer l'effet d'une réduction de la demande en énergie pour le chauffage des bâtiments sur les résultats ci-dessus. Nous n'étudierons pas ici le cas de la rénovation PEB, dont la demande moyenne en énergie pour le chauffage est de 62,3 kWh/m².an, valeur très proche de la rénovation basse énergie étudiée ci-avant.

Nous passons donc directement à l'évaluation des bilans pour la rénovation très basse énergie (besoins nets en énergie pour le chauffage de 30 kWh/m².an), pour laquelle la consommation électrique liée au bâtiment a été augmentée de l'électricité nécessaire à un système de ventilation mécanique (système D). Alors que la consommation électrique (sans PAC et sans voitures électriques) nécessitait 2148 m² de PV, centralisés sur les toitures les mieux exposées, dans le scénario précédent, elle nécessite ici environ 2572 m² de PV (occupant donc des toitures recevant un peu moins d'ensoleillement également). Dans le cas de la PAC, l'entièreté du potentiel PV, même associé au potentiel éolien, est toujours insuffisante pour couvrir l'entièreté de la demande en électricité de celle-ci. Ces résultats sont illustrés à la figure suivante, reprenant la *consommation en électricité* de l'îlot, en parallèle de la production électrique des PV et de l'éolienne. Pour la PAC, on constate donc que par rapport au scénario de rénovation précédent, le gain sur consommation finale en électricité, du fait que les besoins en chauffage sont diminués, est atténué par la présence de la ventilation mécanique.

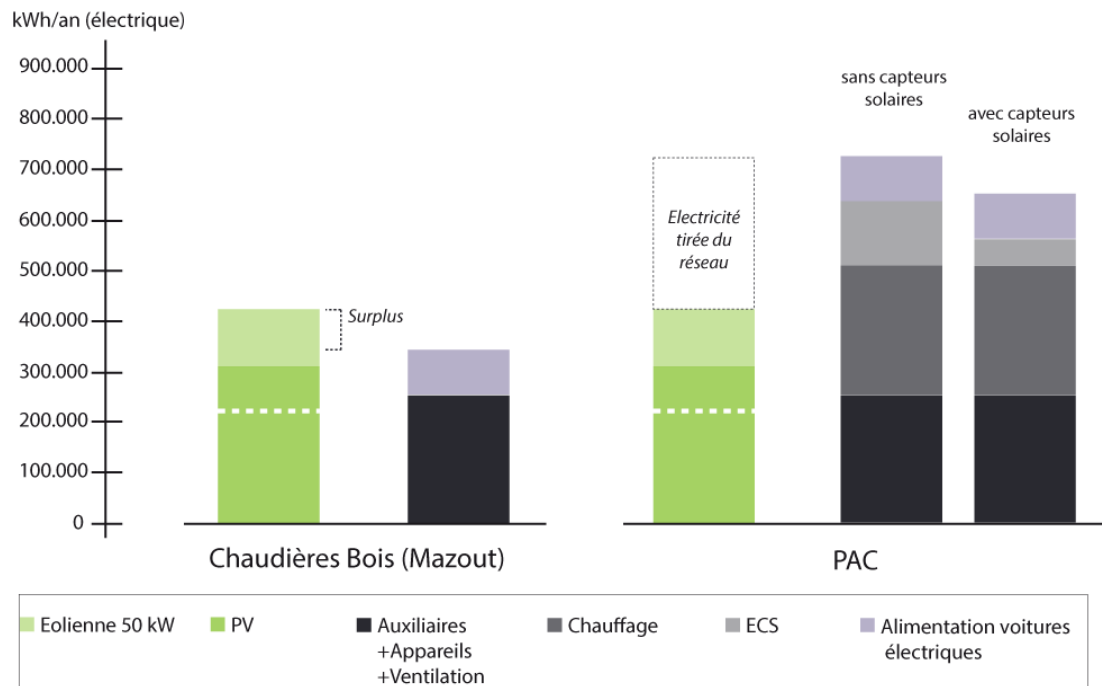


fig. 46 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation TBE – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur

A l'instar de la rénovation basse énergie, les différents potentiels solaires et éolien sont intégrés au bilan de façon à observer leur impact sur la consommation globale en énergie primaire. Les résultats des différentes combinaisons des systèmes sont repris dans le tableau ci-dessous.

ROTUEUX – RENOVATION TBE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE				
			Chaudière BOIS	PAC eau
Capteurs solaires	PV	Eolienne	CONSO EP (kWh/m².an)	CONSO EP (kWh/m².an)
			150,8	149,1
X			130,4	132,8
	X		96,5	82,5
		X	128,9	127,3
X	X		76,1	65,6
X		X	108,5	110,9
	X	X	96,5	60,2
X	X	X	76,1	43,8

tab. 76 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation TBE – scénarios d'intégration des ER

Par rapport au scénario précédent, on constate que rénover jusqu'au stade très basse énergie permet de diminuer la consommation en énergie primaire globale de 15,3 %. Or, l'utilisation du potentiel PV du site, en s'arrêtant à la rénovation basse énergie, permet d'économiser 25 % d'énergie primaire, ce qui semble plus intéressant, d'autant plus qu'il s'agit de la situation pour laquelle les PV sont centralisés, et fonctionnent donc à leur plus grande rentabilité.

En ce qui concerne le choix entre les PAC et les chaudières, comme il a été pressenti, les PAC pourraient se montrer plus intéressantes. Si on considère la combinaison capteurs + PV, utiliser des PAC à la place des

chaudières permet un bénéfice de 13,8 %, en augmentant cette fois-ci la surface des PV de 24 %. Dans le cas de la rénovation BE, le bénéfice de 13,5 % des PAC nécessitait d'augmenter la surface des PV de 48 %. On observe donc que la PAC se montre progressivement plus avantageuse.

Observons finalement l'impact de la rénovation passive sur le bilan. La seule donnée qui change par rapport au scénario précédent est la valeur de la demande en énergie pour le chauffage (diminuée de moitié). On observe sur la figure ci-dessous que dans le cas de la PAC, le gain par rapport à la rénovation TBE est plus important que le gain produit par le passage de la rénovation BE à la rénovation TBE, simplement puisque pour ce dernier, il fallait compter l'augmentation de la consommation d'électricité due à la ventilation par rapport à la rénovation BE. On constate également que dans le cas où les potentiels solaire thermique, photovoltaïque et éolien sont utilisés conjointement, presque l'entièreté de la consommation électrique nécessaire au chauffage, à l'ECS, aux auxiliaires, aux appareils électroménagers, à la ventilation et aux voitures électriques peut être couverte par ceux-ci ! Et elle est entièrement couverte si on ne considère pas l'intégration des voitures électriques.

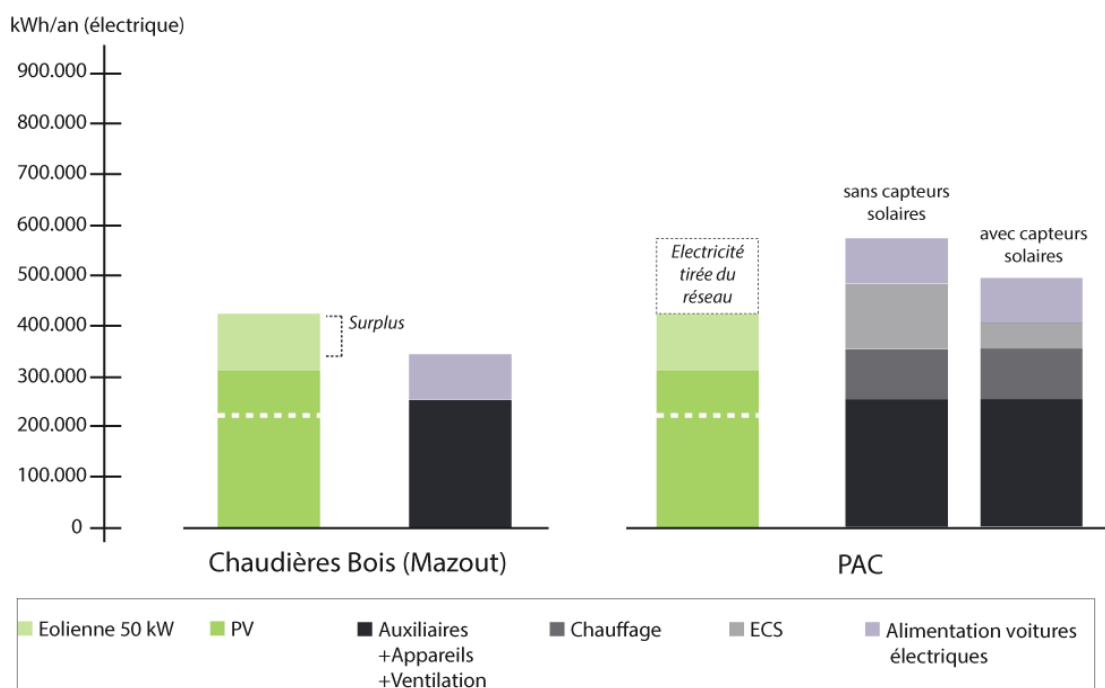


fig. 47: Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation P – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur

Toujours en considérant la combinaison des PV et des capteurs solaires, on constate que l'utilisation des PAC permet un bénéfice de 22,6 % sur la consommation en énergie primaire par rapport aux chaudières, nécessitant une augmentation de la surface des PV de 24 %. Le gain des PAC est donc plus important ici que dans le cas de la rénovation TBE, pour la même surface de PV. Alors que l'intérêt des PAC était mitigé jusqu'à la rénovation TBE, on constate qu'ici, elle pourrait s'avérer plus avantageuse.

Elle est en tout cas très intéressante d'un point de vue théorique, lorsque l'on considère des PAC en combinaison avec les potentiels solaire, photovoltaïque et éolien. D'un point de vue pratique, cette solution est difficilement envisageable pour des raisons financières. Mais comme il a été dit précédemment, cette combinaison permet de couvrir l'entièreté de l'énergie consommée par les maisons à l'aide des énergies renouvelables. Dans ce cas, il ne reste plus dans le bilan que la composante relative au transport, de **25,4 kWh/m².an**. La consommation globale en énergie primaire peut encore être diminuée par l'intégration des voitures électriques, pour lesquelles une partie de l'électricité nécessaire peut également être couverte par les énergies renouvelables (14%). Le bilan tombe alors à **18,5 kWh/m².an**, qui est la valeur la plus faible que nous pouvons obtenir ici. Ces résultats sont présentés au graphique de la page suivante.

ROTHEUX – RENOVATION PASSIVE – PRODUCTION DE CHALEUR INDIVIDUELLE				
Capteurs solaires	PV	Eolienne	Chaudière BOIS CONSO EP (kWh/m ² .an)	PAC eau CONSO EP (kWh/m ² .an)
			132,2	128,1
X			111,8	111,7
	X		77,9	60,9
		X	110,4	106,2
X	X		57,5	44,5
X		X	90	89,9
	X	X	77,9	39,1
X	X	X	57,5	25,4

tab. 77 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation P – scénarios d'intégration des ER

Enfin, le dernier scénario envisagé est la rénovation passive « tout électrique ». D'un point de vue économique, cette solution est intéressante. D'un point de vue de la consommation en énergie primaire, on constate par contre que cette solution n'est pas du tout intéressante, même lorsque l'on considère le potentiel énergétique des PV, de l'éolienne et des capteurs simultanément. Cette observation est illustrée à la figure suivante, sur laquelle on peut voir que la consommation finale en électricité de la solution « tout électrique » est presque aussi importante que celle du scénario rénovation basse énergie + PAC.

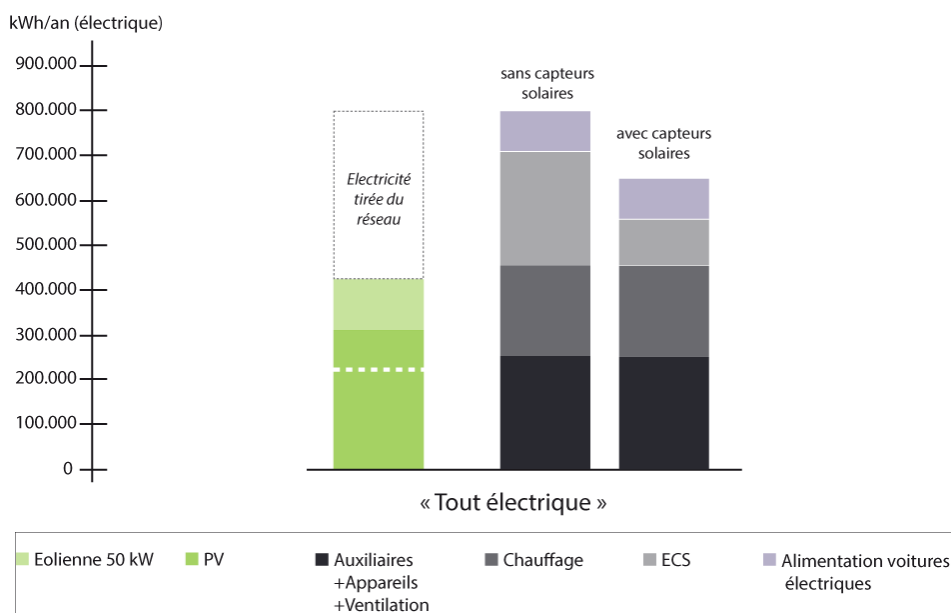
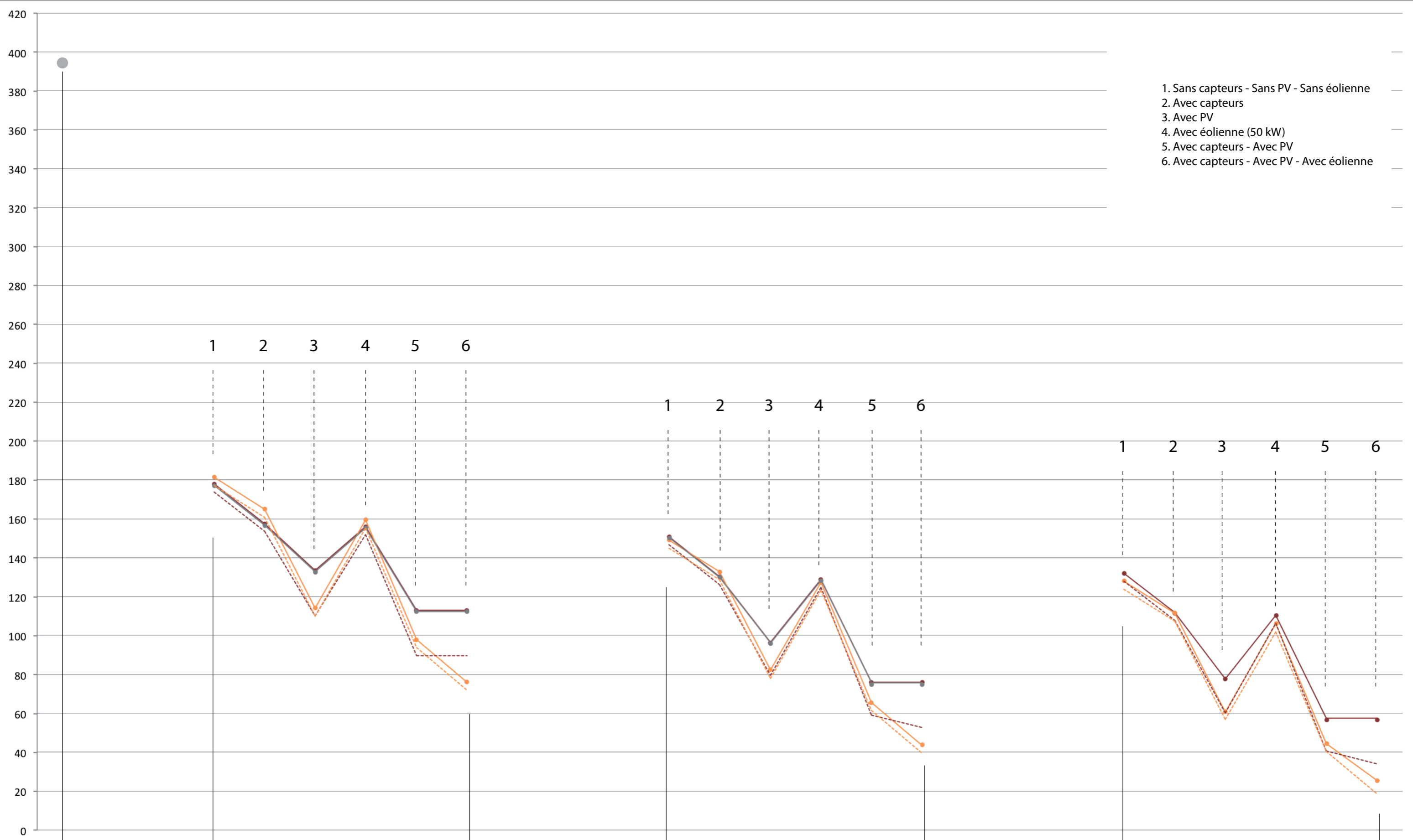


fig. 48 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation P – Consommations électriques de l'îlot dans le cas du « tout électrique »

Alors qu'il est possible de diminuer la consommation en énergie primaire jusqu'à **25,4 kWh/m².an** avec les PAC, la consommation dans le cas du « tout électrique » restera au minimum égale à **75,2 kWh/m².an**.

Afin de conclure l'analyse relative à l'îlot de Rotheux, nous avons repris dans le graphique de la page suivante l'ensemble des bilans calculés, afin de visualiser l'allure de la diminution de la consommation en énergie primaire globale au fil de l'augmentation du niveau de rénovation et de l'intégration progressive des énergies renouvelables.



- 1. Sans capteurs - Sans PV - Sans éolienne
- 2. Avec capteurs
- 3. Avec PV
- 4. Avec éolienne (50 kW)
- 5. Avec capteurs - Avec PV
- 6. Avec capteurs - Avec PV - Avec éolienne

Situation actuelle

Rénovation Basse Energie

Rénovation Très Basse Energie

Rénovation Passive

- Chaudières bois décentralisées
- PAC décentralisées
- Chaudières mazout décentralisées
- ... Chaudières bois décentralisées + VE
- ... PAC décentralisées + VE

Ce graphique permet de visualiser les conclusions tirées au cours de l'analyse réalisée ci-avant. Tout d'abord, on remarque que la courbe relative au mazout superpose la courbe relative au bois, puisque d'un point de vue de la consommation en énergie primaire, il n'y a presque pas de différence entre les deux systèmes. Ensuite, d'une manière générale, on constate que la courbe relative à la PAC se confond quasiment avec la courbe des chaudières au bois pour les points 1, 2 et 4, mais permet un gain sur la consommation en énergie primaire pour les points 3, 5 et 6, c'est-à-dire lorsque l'on profite de l'entièreté du potentiel photovoltaïque du site pour alimenter les PAC. Comme nous en avons déjà discuté, ce gain est à mettre en parallèle, alors, avec la surface de PV supplémentaire que cela nécessite. Nous ne reviendrons pas là dessus, mais il avait été conclu que la PAC semble très intéressante pour la rénovation passive, alors que son intérêt est plus mitigé pour les rénovations BE et TBE pour lesquelles le gain ne semble pas assez intéressant par rapport à la surface de PV à ajouter. On observe également que l'éolienne (point 4), n'apporte jamais de bénéfice comparable au potentiel des PV (point 5), pris séparément. Mais comme nous l'avons expliqué auparavant, son intérêt est plutôt la complémentarité aux PV au niveau des productions mensuelles.

Ce graphique nous permet également d'observer que l'intégration des voitures électriques possède un réel avantage au niveau de la consommation en énergie primaire, puisque l'on constate que la courbe chaudières + VE (voitures électriques) est toujours inférieure à la courbe chaudières (sans VE). De plus, on constate qu'elle suit l'allure de la courbe PAC (sans VE), et qu'elle est toujours inférieure (ou égale) à celle-ci ! En effet, en ce qui concerne le scénario basé sur les chaudières, nous avons constaté que pour la rénovation BE, l'entièreté de la consommation électrique (bâtiment + voitures) pouvait être couverte par le potentiel photovoltaïque. En rénovation TBE et P, le potentiel photovoltaïque peut couvrir 90% de celle-ci. Ainsi, on voit qu'il est plus intéressant, d'installer des chaudières au bois dans chaque habitation combinées au potentiel PV et d'introduire les voitures électriques, plutôt que d'installer des PAC combinées à ces PV. Cela met en évidence l'importance de considérer dans le cas de cet îlot le transport dans le bilan énergétique, puisqu'il peut avoir un impact important dans le bilan.

Enfin, ce graphique permet de comparer visuellement les gains apportés par les différents niveaux de rénovation. Selon les bilans calculés, on obtient les gains sur la consommation globale en énergie primaire suivants (sans énergie renouvelable) :



Cependant, comme le montre le graphique global, le point 3 de chaque stade de rénovation est toujours largement inférieur au point 1 du stade de rénovation suivant. Cela signifie donc qu'il sera plus intéressant, du point de vue de la consommation en énergie primaire, de s'arrêter à la rénovation BE et d'exploiter le potentiel PV du site qui permet une réduction 25 % de la consommation en énergie primaire, plutôt que de rénover jusqu'au stade TBE (gain de 15,3 %). De même, il sera plus intéressant de s'arrêter au stade de rénovation TBE en exploitant le potentiel PV (gain de 36 %), plutôt que de rénover jusqu'au passif (gain de seulement 12,3 % !).

La rénovation passive a cependant démontré son intérêt énergétique par la diminution extrême de la consommation en énergie primaire qu'elle permet, grâce aux potentiels en énergie renouvelable du site. Bien que ce scénario soit difficilement envisageable, il permet d'illustrer l'impact que peuvent avoir les énergies renouvelables disponibles sur un îlot comme Rotheux, dont la production, à l'échelle d'un îlot, permet de couvrir presque l'entièreté des consommations énergétiques de l'îlot résidentiel. Ce résultat incite également à la réflexion pour la réalisation de nouvelles constructions.

2. Conclusions

En guise de rappel, voici le tableau qui reprend l'ensemble des caractéristiques des deux îlots étudiés.

	Ilot périurbain: ROTHEUX	Ilot urbain: VIVEGNIS
DONNÉES		
Nombre d'habitations	55	57
Nombre de ménages	55	97
Taille moyenne du ménage	2,74 personnes	1,86 personnes
Nombre d'habitants	151	180
Superficie de l'îlot	120.236 m ² (12,02 ha)	9.692 m ² (0,97 ha)
Densité bâtie de l'îlot (toute surface bâtie comprise, sauf annexes)	6390 m ² bâti au sol/ha (5%)	3619 m ² bâti au sol/ha (37%)
Densité d'habitations	4,57 habitations/ha	58,8 habitations/ha
Densité de ménages		
Superficie chauffée moyenne par habitation	213 m ²	136 m ²
Superficie chauffée totale	11.721 m ²	7.727 m ²
Type d'habitations		
4 façades	76,4 %	7 %
3 façades	20 %	17,5 %
2 façades	3,6 %	75,5 %
CONSOUMATIONS EP POUR LE TRANSPORT		
<i>Initialement</i>	320.833 kWh/an	170.409 kWh/an
Scénario de réduction choisi	297.772 kWh/an	130.572 kWh/an
Intégration des VE	21.499 kWh/an	27.444 kWh/an
BESOINS BRUTS DE CHALEUR		
<i>Chauffage: Initialement</i>	2.754.341 kWh/an	1.421.694 kWh/an
Chauffage: rénovation PEB	808.002 kWh/an	396.153 kWh/an
Chauffage: rénovation BE	790.153 kWh/an	520.894 kWh/an
Chauffage: rénovation TBE	395.076 kWh/an	260.447 kWh/an
Chauffage: rénovation P	197.538 kWh/an	130.223 kWh/an
ECS	179.120 kWh/an	214.445 kWh/an
CONSOUMATIONS ÉLECTRIQUES		
Appareils + Cuisson	171.490 kWh/an	320.446 kWh/an
Auxiliaires	36.905 kWh/an (43.945 si production de chaleur centralisée sur l'îlot)	28.272 kWh/an (33.630 si production de chaleur centralisée sur l'îlot)
Ventilation (P et TBE)	46.208 kWh/an	26.120 kWh/an
Voitures électriques	90.899 kWh/an	44.642 kWh/an
PRODUCTION ER		
Capteurs solaires	107.472 kWh/an (S=352 m ²)	128.667 kWh/an (S=432 m ²)
Panneaux photovoltaïques	314.669 kWh/an (S=3171 m ²)	139.945 kWh/an (S=1505 m ²)
Eolienne 50 kW	102.442 kWh/an	

tab. 78: Résumé des données relatives aux îlots de Vivegnis et de Rotheux

Nous avons repris dans les deux tableaux ci-dessous l'ensemble des résultats des bilans réalisés dans cette étude, qui ont servi de base à l'élaboration des deux graphiques globaux qui étaient repris à la fin des analyses de l'îlot de Vivegnis à l'îlot de Rotheux (toutes les valeurs sont en kWh/m².an).

Ilot de Vivegnis - Situation actuelle: Conso en énergie primaire globale de 423 kWh/m².an						
	chaudières gaz		PAC		cogénération gaz	
	Sans VE	Avec VE	Sans VE	Avec VE	Sans VE	Avec VE
<i>Rénovation basse énergie</i>						
1	262,2		257,7		224	
2	216,9	218	212,4	213,5	209,4	196
3	225,2		228			
<i>Rénovation PEB</i>						
1	246,9		241,1		243,7	
2	201,6	202,7	195,8	196,9	218,5	205,1
3	209,9		211,3			
<i>Rénovation très basse énergie</i>						
1	232,3		224,2		264,8	
2	187,1	188,2	178,9	180	219,6	220,6
3	195,3		194,4			
<i>Rénovation passive</i>						
1	213,2		202,9			
2	168	169,1	157,7	158,7		
3	176,2		173,2			

1 = scénario sans PV et sans capteurs

2 = scénario avec PV

3 = scénario avec capteurs

tab. 79 : Résumé des bilans en énergie primaire de l'îlot de Vivegnis (en kWh/m².an)

Ilot de Rotheux - Situation actuelle: Conso en énergie primaire globale de 394 kWh/m².an					
	chaud.mazout	chaudières bois		PAC	
	Sans VE	Sans VE	Avec VE	Sans VE	Avec VE
<i>Rénovation basse énergie (≈ rénovation PEB)</i>					
1	177,2	178	173,8	181,4	177,2
2	156,8	157,6	153,5	165	160,8
3	132,8	133,6	110	114,3	110,1
4	155,4	156,2	151,9	159,5	155,4
5	112,4	113,2	89,6	97,9	93,7
6	112,4	113,2	89,6	76,1	71,9
<i>Rénovation très basse énergie</i>					
1	150,4	150,8	146,6	149,1	144,9
2	130	130,4	126,2	132,8	128,6
3	96,1	96,5	79,5	82,5	77,8
4	128,5	128,9	124,7	127,3	123,1
5	75,7	76,1	59,1	65,6	61,5
6	75,7	76,1	52,5	43,8	39,6
<i>Rénovation passive</i>					
1	150,4	132,2	128	128,1	123,9
2	130	111,8	107,7	111,7	107,5
3	96,1	77,9	60,2	60,9	56,8
4	128,5	110,4	106,2	106,2	102
5	75,7	57,5	40,5	44,5	40,4
6	75,7	57,5	34	25,4	18,5

1 = scénario sans rien

2 = scénario avec capteurs

3 = scénario avec PV

4 = scénario avec éolienne

5 = scénario avec capteurs + PV

6 = scénario avec les 3

tab. 80 : Résumé des bilans en énergie primaire de l'îlot de Rotheux (en kWh/m².an)

Intégrer jusqu'à 100 % d'énergie renouvelable est certainement la direction dans laquelle il faut se diriger, bien que cela soulève des questions économiques à court terme et une réflexion sur l'esthétique du site, dont nous n'avons pas tenu compte dans cette étude. Toutefois, énergie renouvelable ne signifie pas énergie « durable », laquelle implique également un comportement judicieux (consommer moins) et efficient (consommer mieux, types de matériaux, etc.) (APERE, 2013). Nous avons abordé ces deux thèmes en considérant une rénovation élevée des bâtiments, un changement des habitudes de transport, et en privilégiant par exemple les panneaux photovoltaïques qui permettraient d'être les mieux utilisés (centralisés sur les toitures les mieux exposées). On pourrait aller encore plus loin, notamment au niveau de la consommation énergétique des bâtiments, puisque les pôles consommateurs autres que l'énergie de chauffage peuvent également être réduits.

Ce comportement est d'ailleurs nécessaire dans le cas de l'îlot de Vivegnis, où nous constatons que même le niveau de rénovation le plus sévère ne permet pas d'atteindre un bilan global des consommations en énergie primaire compétitif.

En effet, le scénario le plus performant de Rotheux permet d'atteindre la très faible consommation globale en énergie primaire de 18,5 kWh/m².an, alors que le plus performant de Vivegnis atteint toujours 158,7 kWh/m².an. Cette faible diminution provient d'une part de la haute consommation électrique de l'îlot, pour laquelle la plus grande consommation vient des appareils électriques. Or, leur consommation est proportionnelle au nombre de ménages dans l'îlot, et prend dès lors une part très importante dans le bilan d'un îlot dont les habitations sont divisées en plusieurs logements. Elle provient d'autre part du faible potentiel photovoltaïque de l'îlot, par rapport à celui de Rotheux. On a vu que la cogénération était un moyen intéressant de réduire la consommation globale en énergie primaire, mais uniquement pour une rénovation basse énergie. Si les besoins en énergie de chauffage diminuent, le bénéfice de la cogénération diminue également.

L'échelle de l'îlot n'est peut-être donc pas l'échelle adaptée à l'obtention du bilan zéro-énergie, en milieu urbain. L'îlot pourrait alors faire partie d'une échelle urbaine plus importante, qui permettrait d'exploiter par exemple l'énergie solaire à un endroit mieux exposé que les surfaces de l'îlot, ou encore d'utiliser la cogénération, même si les besoins en énergie de chauffage de l'îlot sont réduits, parce qu'elle sert à alimenter d'autres fonctions urbaines plus consommatrices.

Le scénario le plus performant est obtenu pour la rénovation passive. Cependant, nous avons vu que la rénovation passive, même si c'est elle qui permet au final d'atteindre la consommation globale la plus faible, ne se justifie pas si elle n'exploite pas le potentiel photovoltaïque existant, par rapport à une rénovation moins exigeante, mais qui utiliserait le potentiel PV.

En effet, dans le cas de l'îlot de Vivegnis, alors que la rénovation basse énergie, alliée au potentiel photovoltaïque du site permet une réduction de 49 % de la consommation globale en énergie primaire, la rénovation passive à elle seule, permet un gain de 50 %, soit uniquement 1% de plus. Puisque la rénovation passive est parfois irréalisable, et que son coût pourrait empêcher de recourir aux PV engendrant des frais supplémentaires, cette conclusion est très importante.

Dans le cas de l'îlot de Rotheux, ce phénomène est encore plus marqué puisque la rénovation basse énergie alliée au potentiel PV engendre un gain de 66 %, alors que la rénovation passive seule ne permet qu'un gain de 62 %. Cependant, la rénovation passive dans le cas de Rotheux permet d'atteindre quasiment un bilan zéro-énergie lorsqu'elle est alliée aux potentiels renouvelables du site, ce qui la positionne tout de même comme un élément intéressant.

A Vivegnis, puisque le bilan des consommations dans le scénario de rénovation passive alliée aux potentiels en énergie renouvelable reste élevé, son intérêt est très mitigé.

Enfin, notons que la meilleure solution pour diminuer la consommation globale en énergie primaire n'est pas nécessairement la meilleure solution financière, et pas nécessairement non plus celle qui permet la réduction la plus élevée des émissions de CO₂.

Par exemple, alors qu'une chaudière au mazout et une chaudière au bois entraîneront la même consommation d'énergie primaire (à peu de chose près, en fonction du rendement de la chaudière), le bois est un réel avantage en ce qui concerne les émissions de CO₂.

C'était également le cas du tram, qui trouve son avantage au niveau de la diminution de la pollution, plutôt que de la diminution de la consommation énergétique.

L'intérêt serait donc de croiser les résultats de ce travail, avec des études similaires tenant compte cette fois-ci d'un bilan zéro-émission de CO₂, par exemple. De plus, il serait également nécessaire de mener une étude financière en parallèle, puisque l'intégration des énergies renouvelables ne pourra être une solution compétitive que si, finalement, elle présente un avantage financier pour ses utilisateurs, par rapport aux alternatives exploitant les énergies fossiles existantes. Comme nous l'avons dit précédemment, un des avantages de travailler à l'échelle d'un îlot d'habitations est précisément ce point. Alors que l'exploitation des énergies renouvelables à l'échelle d'une habitation n'est pas toujours rentable, elle peut le devenir lorsque les besoins sont globalisés. Il serait intéressant tout de même, pour chacune des techniques, de comparer la rentabilité financière des différentes solutions.

3. Perspectives

L'analyse de ce travail est basée sur les consommations et productions énergétiques annuelles, puisque l'objectif zéro-énergie s'effectue sur un an. Cependant, les courbes mensuelles de consommations et de productions mettent en évidence la différence qui existe tout au long de l'année entre celles-ci. Lorsque la courbe de production est supérieure à la courbe de consommation, la question du stockage se pose.

Le graphique ci-dessous représente, pour l'îlot de Rotheux, les besoins bruts annuels en eau chaude sanitaire, et l'apport des capteurs solaires disposés en toiture, dimensionnés pour couvrir 60 % des besoins.

On constate que les mois d'été, la production d'eau chaude sanitaire est supérieure à la demande. Le déphasage entre la demande thermique et la production thermique permis par un dispositif de stockage est limité généralement à quelques jours maximum, voir quelques heures.

Pour permettre une meilleure utilisation de l'installation solaire thermique, il faudrait avoir recours à des dispositifs de stockage de longue durée, appelés également « accumulateurs saisonniers ». Ces systèmes de stockage utilisent la chaleur naturelle du sous-sol, en stockant la chaleur dans de grands réservoirs d'eau ou avec des sondes verticales. Ils permettent ainsi à la production thermique de l'été d'être utilisée l'hiver suivant.

On ne les rencontre pour le moment qu'à grande échelle, dépassant celle de l'îlot, mais ils sont de toute façon une solution peu favorable car les déperditions thermiques restent conséquentes.

Des principes de stockage chimique, pour lesquels le flux thermique est maîtrisé grâce à des réactions chimiques réversibles pouvant capter ou libérer de la chaleur, sont au stade expérimental, et pourraient jouer un grand rôle dans l'avenir. En effet, ils présentent l'avantage de libérer la chaleur uniquement au moment voulu, sans déperdition thermique (Hegger et al., 2011).

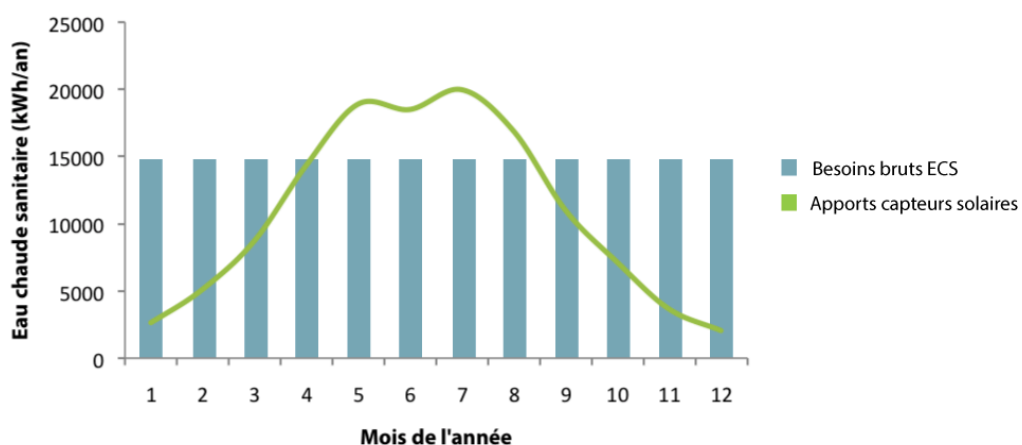


fig. 49 : Apports mensuels des capteurs solaires thermiques à Rotheux, comparés aux besoins bruts mensuels en eau chaude sanitaire

Le graphique ci-dessous illustre, de nouveau pour l'îlot de Rotheux, les consommations électriques mensuelles relatives aux auxiliaires, aux appareils et aux voitures électriques, et la production du potentiel photovoltaïque et du potentiel éolien du site.

On a vu précédemment que le potentiel photovoltaïque était suffisant pour compenser la consommation électrique annuelle. Cependant, on observe que l'îlot est loin d'être autonome !

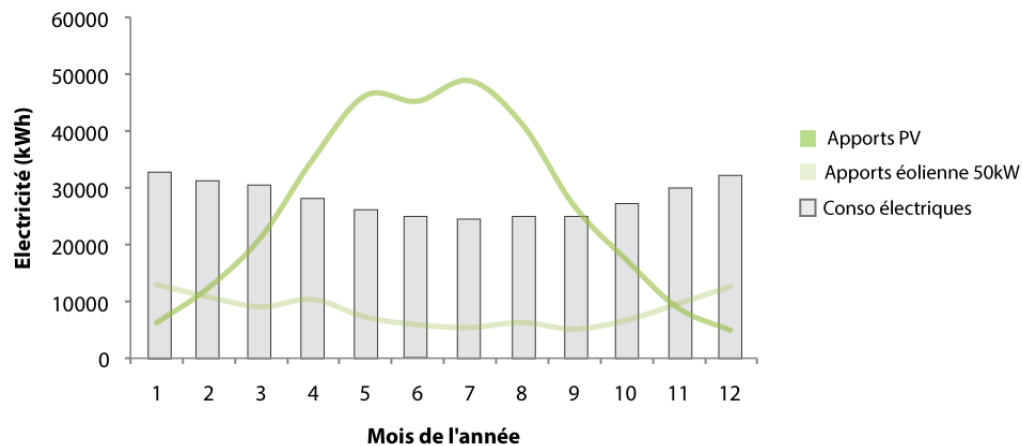


fig. 50 : Apports mensuels des PV et de l'éolienne à Rotheux, comparés aux consommations électriques mensuelles

Le problème est qu'aujourd'hui, les dispositifs de stockage de l'électricité sur plusieurs mois sont encore très difficiles à l'échelle d'un îlot d'habitations. L'intérêt de ce développement est grand, surtout dans ce cas-ci, où l'îlot produit de l'électricité excédentaire pendant presque 6 mois.

Notons que ce type de stockage est particulièrement intéressant pour les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne qui, comme nous l'avons vu, peut présenter une très forte variabilité de la production.

Mais dans le cas de l'éolienne, on observe par contre que si une éolienne d'une plus grande puissance était installée, sa courbe de production serait très proche de la courbe de consommation, ce qui est particulièrement intéressant lorsque le raccordement au réseau de distribution n'est pas possible. Ici, le calcul a été réalisé avec une éolienne de 50 kW, puisque c'est la plus grande puissance des "petites éoliennes" disponible actuellement sur le marché belge. On voit donc tout l'intérêt de développer des petites éoliennes de 75 ou 100 kW, puisqu'elles permettraient, théoriquement, de répondre relativement précisément à la demande électrique d'un îlot d'une cinquantaine d'habitations.

L'essence de l'objectif zéro-énergie à l'échelle de l'îlot est donc l'idée que l'on peut répondre de manière optimale aux besoins énergétiques des bâtiments et du transport grâce à de l'énergie non polluante, renouvelable, disponible localement, et de préférence à faible coût.

Cela ne signifie pas par contre que l'îlot sera pour autant autonome ! À l'heure actuelle, le raccordement au réseau est nécessaire, puisque ce n'est pas parce que la balance énergétique annuelle est réalisée, que les bâtiments seront en mesure de produire mensuellement l'énergie qui leur est nécessaire. Sans ce raccordement, l'objectif zéro-énergie serait très difficile à atteindre, puisque l'excédentaire de l'énergie produite serait considérée comme perdue, sauf si un dispositif de stockage est mis en place. Or, les dispositifs de stockage d'énergie actuels sont très limités ou ne sont pas accessibles à l'échelle de l'îlot résidentiel.

Mais dans des scénarios futurs de forte pénétration d'îlots zéro-énergie dans le contexte bâti, le réseau de distribution sera-t-il en mesure de supporter l'entièreté de l'énergie excédentaire produite par les îlots, les mois où ils ne sont pas en mesure de la consommer directement ? Il va de soi que la recherche tournée vers les îlots d'habitations zéro-énergie ne peut être envisagée sans une évolution en parallèle des technologies de stockage de l'énergie. De même, le développement des recherches d'optimisation du réseau de distribution ("smart grid") sera indispensable. Enfin, les voitures électriques ont le potentiel de jouer un rôle majeur à ce niveau également, avec la possibilité d'utiliser leur batterie pour stocker l'électricité lorsqu'elle est excédentaire.

Table des Figures

<i>fig. 1: Les 3 pôles constituant la base de l'étude</i>	5
<i>fig. 2: Méthodologie et structure du travail</i>	6
<i>fig. 3 : Localisation des deux îlots étudiés dans la Province de Liège (source: maps.google.fr)</i>	9
<i>fig. 4: Ilot urbain de Vivegnis, quartier Saint Léonard, Liège (Belgique) (source: maps.google.fr)</i>	10
<i>fig. 5: Ilot périurbain de Rotheux-Rimièr, Neupré (Belgique)) (source: maps.google.fr)</i>	10
<i>fig. 6: Comparaison de la superficie des deux îlots</i>	11
<i>fig. 7 : Les énergies renouvelables les plus utilisées et leurs applications (source: APERE, 2013)</i>	21
<i>fig. 8: Potentiel pour la géothermie profonde en Wallonie – étude menée par la SGB et l'Ulg (source: Nollet, 2011)</i>	39
<i>fig. 9: Plaquettes (gauche) – Pellets (centre) – Bûches (droite)</i>	41
<i>fig. 10: Tableau comparatif des répartitions modales de l'îlot de Vivegnis et de Rotheux en situation actuelle (source des données: ESE, 2001)</i>	60
<i>fig. 11 : Consommation annuelle en kWh/personne.an pour les déplacements domicile-travail et domicile-école, pour l'îlot de Vivegnis et de Rotheux</i>	62
<i>fig. 12: Influence de la vitesse et des auxiliaires sur la consommation électrique (source: Centre d'analyse stratégique, 2011)</i>	63
<i>fig. 13: Consommations électriques des voitures électriques sur différents cycles (source: Centre d'analyse stratégique, 2011)</i>	63
<i>fig. 14: Influence du covoiturage pour les déplacements domicile-école sur la consommation d'énergie primaire liée à transport à Vivegnis et à Rotheux</i>	70
<i>fig. 15: Parts relatives des postes énergétiques des habitations dans la consommation finale d'énergie (source: ICEDD, 2010)</i>	72
<i>fig. 16: Passage des besoins nets à la consommation en énergie primaire pour le chauffage (source: Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments)</i>	75
<i>fig. 17: Besoins nets mensuels pour l'énergie de chauffage à Rotheux, rénovation PEB</i>	79
<i>fig. 18: Passage des besoins nets à la consommation en énergie primaire pour l'ECS (source: Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments)</i>	82
<i>fig. 19: Consommations électriques (hors chauffage, ECS et cuisson) des ménages wallons (source: ICEDD, 2010b)</i>	84
<i>fig. 20: Répartition de la consommation électrique au sein des appareils électroménagers (source: ICEDD, 2010b)</i>	85
<i>fig. 21 : Consommation électrique mensuelle des auxiliaires de l'îlot de Rotheux</i>	86
<i>fig. 22 : Consommation électrique mensuelle des auxiliaires de l'îlot de Vivegnis</i>	86
<i>fig. 23: Hypothèse de la division des charges pour évaluer le critère de rentabilité du réseau</i>	91
<i>fig. 24: Longueur du réseau autour de l'îlot de Rotheux (gauche) et autour de l'îlot de Vivegnis (droite)</i>	92
<i>fig. 25: Critère de densification pour assurer la rentabilité d'un réseau à Rotheux</i>	93
<i>fig. 26: Vivegnis – rénovation BE – Production mensuelle de la cogénération</i>	95
<i>fig. 27: Définition d'une surface dans le logiciel Townscope</i>	99
<i>fig. 28: Démarche de l'utilisation du logiciel Townscope pour déterminer le facteur de réduction M</i>	100
<i>fig. 29: Énergie solaire mensuelle reçue par une surface en Belgique (Architecture et Climat, 2013)</i>	100
<i>fig. 30: Coupes et façades types à Vivegnis</i>	101
<i>fig. 31 : Coupes et façades types à Rotheux</i>	102
<i>fig. 32: Production mensuelle relative au potentiel photovoltaïque</i>	104
<i>fig. 33: Localisation des toitures les mieux exposées sur l'îlot de Vivegnis (représentées en bleu)</i>	107
<i>fig. 34: Production mensuelle relative au potentiel solaire thermique</i>	107
<i>fig. 35: Production mensuelle de l'éolienne C&F green energy CF50</i>	112
<i>fig. 36: Niveau de bruit engendré par l'éolienne Northerpower 100-24</i>	113
<i>fig. 37: Distance à respecter entre plusieurs éoliennes Northerpower 100-24</i>	114
<i>fig. 38 : Potentiels en énergies renouvelables sur le site de Vivegnis et de Rotheux</i>	118
<i>fig. 39: Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Répartition de la consommation en énergie primaire entre les différents postes</i>	119
<i>fig. 40 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Consommations électriques de l'îlot dans les deux cas de production de chaleur</i>	121

<i>fig. 41 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur individuels</i>	125
<i>fig. 42 : Potentiels en énergies renouvelables sur le site de Rotheux</i>	129
<i>fig. 43 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – Répartition de la consommation en énergie primaire entre les différents postes</i>	130
<i>fig. 44 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur</i>	131
<i>fig. 45 : Apports mensuels des PV et de l'éolienne à Rotheux, comparés aux consommations électriques mensuelles</i>	132
<i>fig. 46 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation TBE – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur</i>	134
<i>fig. 47: Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation P – Consommations électriques de l'îlot dans le cas des deux systèmes de production de chaleur</i>	135
<i>fig. 48 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation P – Consommations électriques de l'îlot dans le cas du « tout électrique »</i>	136
<i>fig. 49 : Apports mensuels des capteurs solaires thermiques à Rotheux, comparés aux besoins bruts mensuels en eau chaude sanitaire</i>	142
<i>fig. 50 : Apports mensuels des PV et de l'éolienne à Rotheux, comparés aux consommations électriques mensuelles</i>	143

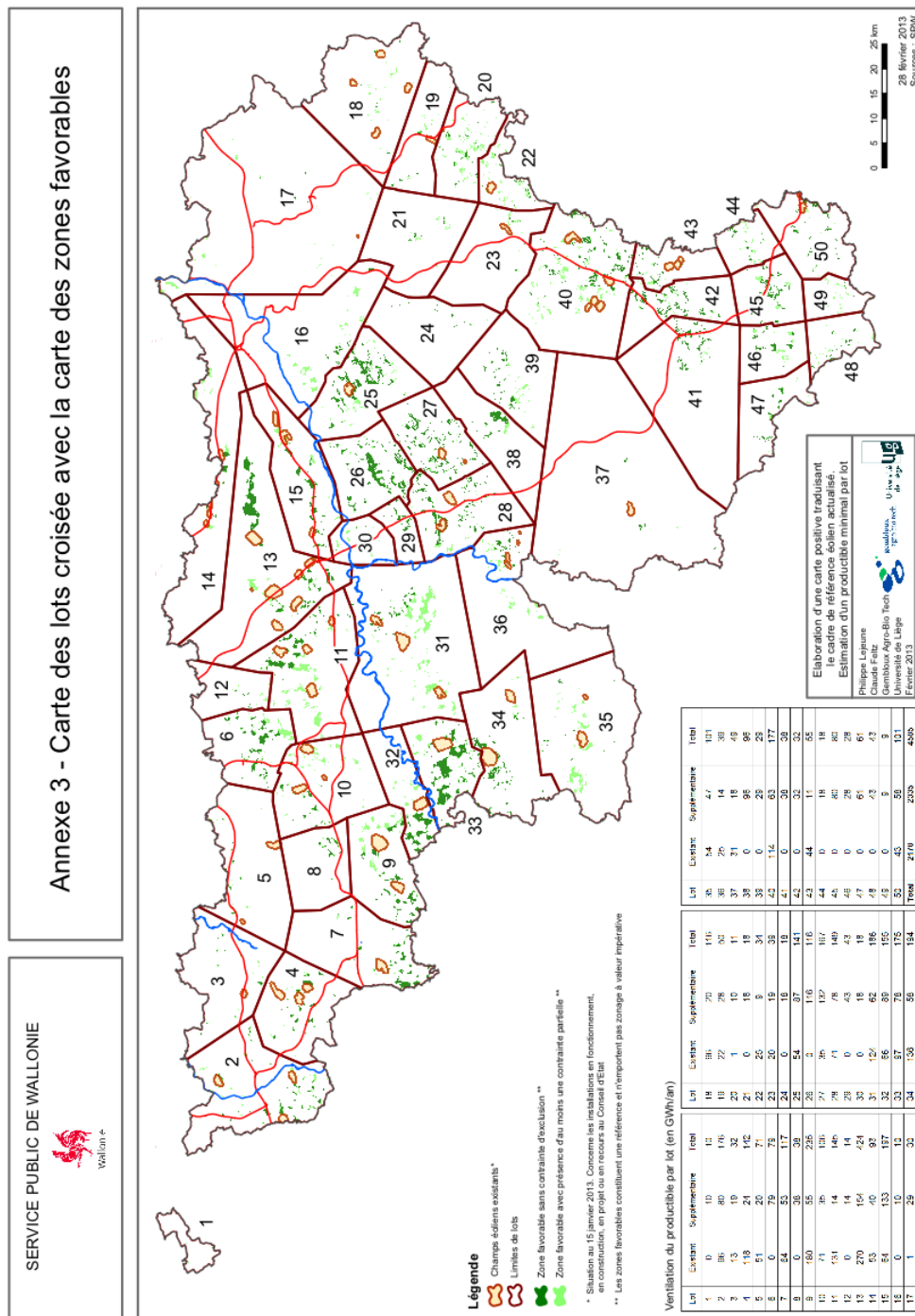
Table des Tableaux

<i>tab. 1 : Données relatives à l'îlot de Rotheux et l'îlot de Vivegnis</i>	11
<i>tab. 2: Les catégories de la biomasse (sources: Hegger et al., 2011 ; Filloux, 2010)</i>	17
<i>tab. 3: Exemple de quartier avec réseau de chaleur (source: Le Dû, 2012)</i>	23
<i>tab. 4: Rendement des cellules photovoltaïques (source: Hegger et al., 2011)</i>	29
<i>tab. 5: Pourcentage de l'énergie solaire reçue par une surface en Belgique (source: EF4, 2013)</i>	30
<i>tab. 6: Les types de capteurs solaires thermiques (source: Hegger et al., 2011)</i>	32
<i>tab. 7: Les combustibles bois et leurs caractéristiques (source: Crehay & Marchal, 2004)</i>	42
<i>tab. 8: Charge calorifique des combustibles bois (source: Hegger et al., 2011)</i>	43
<i>tab. 9: Facteurs de conversion d'énergie finale en énergie primaire (Plate-forme Maison Passive, 2013)</i>	57
<i>tab. 10: Facteurs de consommation en énergie finale et en énergie primaire des modes de transport</i>	58
<i>tab. 11: Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux en situation initiale</i>	61
<i>tab. 12: Facteurs de consommation en énergie finale et en énergie primaire des véhicules électriques</i>	64
<i>tab. 13 : Scénarios d'introduction des véhicules électriques</i>	64
<i>tab. 14 : Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux dans le cas de l'introduction des véhicules électriques alimenté par le réseau</i>	64
<i>tab. 15: Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux dans le cas de l'introduction des véhicules électriques alimenté par de l'énergie renouvelable produite sur place</i>	65
<i>tab. 16 : Consommations électriques des véhicules électriques selon les différents scénarios d'introduction</i>	65
<i>tab. 17 : Interprétation chiffrée du report modal de la voiture vers les transports en commun</i>	67
<i>tab. 18 : Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis dans le cas d'un report modal de la voiture vers les transports en commun (tram et bus)</i>	68
<i>tab. 19: Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis dans le cas d'un report modal de la voiture vers les transports en commun (bus)</i>	68
<i>tab. 20: Consommation en énergie primaire liée au transport à Rotheux dans le cas d'un report modal de la voiture vers les transports en commun (bus)</i>	69
<i>tab. 21 : Influence du covoiturage sur le facteur de consommation en énergie primaire</i>	69
<i>tab. 22 : Consommation en énergie primaire liée au transport à Vivegnis et à Rotheux dans le cas d'un covoiturage pour les déplacements domicile-école</i>	70
<i>tab. 23 : Gain sur la consommation en énergie primaire obtenu pour les différents scénarios étudiés</i>	71
<i>tab. 24 : Bases de calcul des postes énergétiques des bâtiments évalués dans ce travail</i>	72
<i>tab. 25: Superficie chauffée des habitations de l'îlot de Rotheux et de Vivegnis</i>	73
<i>tab. 26: Réglementation PEB 2012 (source: SPW-DG04, 2013)</i>	74
<i>tab. 27 : Résumé des critères relatifs aux standardx énergétiques et à la PEB</i>	76

tab. 28 : Besoins nets pour le chauffage des bâtiments de Vivegnis suite à la rénovation PEB	77
tab. 29 : Besoins nets pour le chauffage des bâtiments de Rotheux suite à la rénovation PEB	77
tab. 30 : Besoins nets en énergie de chauffage selon le type de rénovation pour les deux îlots	78
tab. 31 : DJ normaux et période de chauffe normale pour la Belgique (Architecture et Climat, 2013).	79
tab. 32 : Besoins nets mensuels en énergie de chauffage pour l'îlot de Vivegnis	80
tab. 33 : Besoins nets mensuels en énergie de chauffage pour l'îlot de Rotheux	80
tab. 34 : Besoins bruts en énergie de chauffage selon le type de rénovation pour les deux îlots	81
tab. 35 : Consommations finales en énergie de chauffage selon le type de rénovation pour les deux îlots	81
tab. 36 : Besoins nets en énergie pour l'eau chaude sanitaire pour les deux îlots	83
tab. 37 : Besoins bruts en énergie pour l'eau chaude sanitaire pour les deux îlots	83
tab. 38 : Consommations finales en énergie pour l'eau chaude sanitaire pour les deux îlots	84
tab. 39 : Consommation électrique annuelle des auxiliaires de l'îlot de Rotheux et de Vivegnis	86
tab. 40 : Consommation électrique annuelle de la ventilation D de l'îlot de Rotheux et de Vivegnis	88
tab. 41 : Résumé des caractéristiques et des consommations énergétiques des deux îlots	89
tab. 42 : Estimation de la pertinence d'un réseau de chaleur Vivegnis et à Rotheux	92
tab. 43 : Estimation de la pertinence d'un réseau de chaleur intérieur à l'îlot de Vivegnis	94
tab. 44 : Vivegnis – rénovation BE – Puissance thermique de la cogénération	95
tab. 45 : Vivegnis – rénovation BE – Puissance électrique de la cogénération	96
tab. 46 : Vivegnis – rénovation BE – Gain sur les CV	97
tab. 47 : Vivegnis – rénovation BE – Rentabilité de l'unité de cogénération	97
tab. 48 : Vivegnis – rénovation PBE et TBE – Rentabilité de l'unité de cogénération	98
tab. 49 : Facteur de réduction F de l'ensoleillement reçu par une surface (source: EF4, 2013)	99
tab. 50 : Comparaison des facteurs de réduction M relatifs aux toitures des deux îlots	101
tab. 51 : Comparaison des facteurs de réduction F relatifs aux toitures des deux îlots	102
tab. 52 : Potentiel photovoltaïque dans le cas de la production individuelle	102
tab. 53 : Pourcentage du rayonnement solaire reçu par les toitures	103
tab. 54 : Potentiel photovoltaïque dans le cas de la production centralisée	103
tab. 55 : Production mensuelle relative au potentiel photovoltaïque	104
tab. 56 : Potentiel solaire thermique dans le cas de la production individuelle	105
tab. 57 : Potentiel solaire thermique dans le cas de la production centralisée	106
tab. 58 : Production mensuelle relative au potentiel solaire thermique	107
tab. 59 : Fréquences des vitesses à Uccle, mois par mois (source: Bodeux, 1977)	109
tab. 60 : Classe de rugosité des sols (source: Suisse Eole, 2013)	109
tab. 61 : Données techniques de l'éolienne C&F green energy CF 50	111
tab. 62 : Production mensuelle de l'éolienne C&F green energy CF50	111
tab. 63 : Données techniques de l'éolienne Northerpower 100-24	112
tab. 64 : Production mensuelle de l'éolienne Northerpower 100-24	112
tab. 65 : Résumé des systèmes énergétiques qui seront étudiés	117
tab. 66 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et production de chaleur individuelle	119
tab. 67 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et production de chaleur individuelle – exploitation du potentiel photovoltaïque	120
tab. 68 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et production de chaleur individuelle – exploitation du potentiel solaire thermique	122
tab. 69 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE et cogénération centralisée	123
tab. 70 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation BE – Résumé	123
tab. 71 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation PEB – Résumé	124
tab. 72 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation TBE – Résumé	125
tab. 73 : Bilan énergétique de l'îlot de Vivegnis – Rénovation P – Résumé	126
tab. 74 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – production de chaleur individuelle	129
tab. 75 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation BE – scénarios d'intégration des ER	131
tab. 76 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation TBE – scénarios d'intégration des ER	134
tab. 77 : Bilan énergétique de l'îlot de Rotheux – Rénovation P – scénarios d'intégration des ER	136
tab. 78 : Résumé des données relatives aux îlots de Vivegnis et de Rotheux	139
tab. 79 : Résumé des bilans en énergie primaire de l'îlot de Vivegnis (en kWh/m ² .an)	140
tab. 80 : Résumé des bilans en énergie primaire de l'îlot de Rotheux (en kWh/m ² .an)	140

Annexes

Cadre éolien de la Région wallonne (janvier 2013)



Source : Henry P., 2013. *Ministre de l'Environnement, de l'Aménagement du territoire et de la Mobilité* : <http://www.henry.wallonie.be/Eolien>, consulté en mai 2013.

Les zones vertes foncées sont les zones favorables à l'installation d'une grande éolienne, sans contrainte d'exclusion. Les zones vertes claires sont favorables également mais possède au moins une contrainte (situation au 15 janvier 2013).

1. Typologie établie pour les deux îlots étudiés

TYPOLOGIE ROTHEUX		S. Chauffée (m ²)	V. Protégé (m ²)	% de l'îlot
MAISONS 4 FACADES				76,36
entre 60-80				
(R+1)	Maison 6	75	225	
	Maison 12	80	240	
	Somme	155	465	
	Moyenne	77,50	232,50	3,64
entre 101-120				
(R+0)	Maison 17	115	345	
	Maison 18	120	360	
(R+1)	Maison 3	120	360	
	Maison 19	110	330	
	Maison 50	116	348	
	Somme	581	1743	
	Moyenne	116,20	348,60	9,09
entre 141-160				
(R+1)	Maison 24	160	480	
	Maison 36	150	450	
	Maison 45	150	450	
	Somme	460	1380	
	Moyenne	153,33	460,00	5,45
entre 180-200				
(R+1)	Maison 1	200	600	
	Maison 7	198	594	
	Maison 15	190	570	
	Maison 30	180	540	
	Somme	768	2304	
	Moyenne	192,00	576,00	7,27
entre 201-220				
(R+1)	Maison 25	220	660	
	Maison 26	220	660	
	Maison 32	212	636	
	Maison 47	210	630	
	Somme	862	2586	
	Moyenne	215,50	646,50	7,27
entre 221-240				
(R+1)	Maison 11	240	720	
	Maison 23	230	690	
	Maison 27	240	720	
	Maison 55	240	720	
	Somme	950	2850	
	Moyenne	237,50	712,50	7,27
entre 260-280				
(R+1)	Maison 16	280	840	
	Maison 29	274	822	
	Maison 31	268	804	
	Maison 33	280	840	
	Maison 35	272	816	
	Maison 37	260	780	
	Maison 40	268	804	
	Maison 51	260	780	
	Maison 52	270	810	
(R+3)	Maison 13	270	810	
	Maison 53	280	840	
	Somme	2982	8946	
	Moyenne	271,09	813,27	20,00
entre 281-300				
(R+1)	Maison 2	290	870	
	Maison 14	300	900	
	Maison 28	288	864	
	Maison 34	300	900	
	Maison 38	290	870	
	Maison 54	300	900	
	Somme	1768	5304	
	Moyenne	294,67	884,00	10,91
plus de 300				
(R+1)	Maison 10	340	1020	
	Maison 39	314	942	
	Maison 46	334	1002	
	Somme	988	2964	
	Moyenne	329,33	988,00	5,45

MAISONS 3 FACADES				20,00
entre 141-160				
(R+1)	Maison 4	150	450	
	Maison 5	150	450	
	Maison 8	160	480	
	Somme	460	1380	
	Moyenne	153,33	460,00	5,45
entre 101-120				
(R+1)	Maison 9	110	330	
	Maison 20	110	330	
	Maison 48	116	348	
	Maison 49	110	330	
	Somme	446	1338	
	Moyenne	111,50	334,50	7,27
entre 180-200				
(R+1)	Maison 22	180	540	
	Maison 44	192	576	
	Somme	372	1116	
	Moyenne	186,00	558,00	3,64
entre 260-280				
(R+1)	Maison 41	260	780	
	Maison 43	260	780	
	Somme	520	1560	
	Moyenne	260,00	780,00	3,64
MAISONS 2 FACADES				3,64
entre 141-160				
(R+1)	Maison 21	150	450	1,82
entre 260-280				
(R+1)	Maison 42	260	780	1,82
MOYENNE GLOBALE				213,13 639,38 100%



TYPLOGIE VIVEGNIS	S. Chauffée (m²)	V. Protégé (m²)	% de l'îlot
-------------------	------------------	-----------------	-------------

MAISONS 4 FACADES 7,02

entre 60 - 80			
(R+1)	Maison 21	80	280
	Maison 22	60	180
	Maison 23	70	390
	Maison 24	70	390
	Somme	280	1240
	Moyenne	70,00	310,00

MAISONS 3 FACADES (ou assimilé si garage à côté) 17,54

entre 81 - 100			
(R+1)	Maison 17	82	218
	Maison 20	84	320
	Maison 57	99	346
	Somme	265	884
	Moyenne	88,33	294,67

entre 161-180			
(R+2)	Maison 16	168	476
	Maison 56	180	658
	Somme	348	1134
	Moyenne	174,00	567,00

entre 281-300			
(R+3)	Maison 25	296	888
	Somme		
	Moyenne		

entre 221-240			
(R+2)	Maison 44	222	910
	Maison 45	222	910
	Somme	444	1820
	Moyenne	222,00	910,00

entre 121 - 140			
(R+2)	Maison 41	135	544
(R+1)	Maison 42	122	488
	Somme	257	1032
	Moyenne	128,50	516,00

MAISONS 2 FACADES 75,44

plus de 300			
(R+3)	Maison 3	328	1144
	Somme		
	Moyenne		

entre 201-220			
(R+1)	Maison 5	202	606
(R+2)	Maison 32	210	805
	Somme	412	1411
	Moyenne	206,00	705,50

entre 161-180			
(R+2)	Maison 1	165	578
	Maison 26	180	540
	Maison 27	180	540
	Maison 31	165	570
	Maison 33	180	708
	Maison 38	180	600
	Maison 49	174	580
	Maison 51	168	616
	Maison 53	168	616
	Somme	1560	5348
	Moyenne	173,33	594,22

entre 141-160			
(R+2)	Maison 2	144	504
	Maison 6	147	412
	Maison 28	156	468
	Maison 36	141	498
	Maison 39	144	560
	Maison 40	141	540
	Maison 50	150	475
	Maison 55	150	530
	Somme	1173	3987
	Moyenne	146,63	498,38

entre 121 - 140			
(R+1)	Maison 4	134	402
	Maison 54	132	515
(R+2)	Maison 18	135	577
	Maison 29	138	414
	Maison 52	135	513
	Somme	674	2421
	Moyenne	134,80	484,20

entre 101-120			
(R+2)	Maison 7	114	336
	Maison 9	105	326
	Maison 10	120	322
	Maison 11	120	392
	Maison 12	120	362
	Maison 30	114	388
	Somme	693	2126
	Moyenne	115,50	354,33

entre 81 - 100			
(R+1)	Maison 13	90	244
	Maison 14	100	271
	Maison 34	92	368
	Maison 35	96	384
	Maison 43	96	384
	Maison 46	96	403
	Somme	570	2054
	Moyenne	95,00	342,33

entre 60 - 80			
(R+1)	Maison 15	76	232
	Maison 19	62	210
	Maison 37	70	238
(R+2)	Maison 8	69	238
	Maison 47	75	250
	Maison 48	75	250
	Somme	427	1418
	Moyenne	71,17	236,33

MOYENNE GLOBALE	135,56	472,05	100%
------------------------	---------------	---------------	-------------



2. Consommation électrique liée aux auxiliaires

Nous avons repris ci-dessous un extrait de l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments, concernant le calcul de la consommation électrique des auxiliaires, sur lequel nous nous sommes basés pour le calcul.

On détermine la consommation d'électricité mensuelle pour les fonctions auxiliaires comme suit:

$$W_{aux,heat,m} = \sum_j \left(\frac{\sum_i Q_{heat,gross,sec\ i,m}}{\sum_i Q_{heat,gross,sec\ i,a}} \right) W_{aux,heat,j} \quad (\text{kWh})$$

avec:

$$Q_{heat,gross,sec\ i,a} = \sum_{m=1}^{12} Q_{heat,gross,sec\ i,m} \quad (\text{MJ})$$

et où:

$Q_{heat,gross,sec\ i,m}$ les besoins mensuels bruts en énergie pour le chauffage du secteur énergétique i , en MJ, calculés selon 9.2;

$W_{aux,heat,j}$ la consommation d'électricité de la fonction auxiliaire, faisant partie de l'installation, en kWh, reprise au Tableau 12.

Ci-dessous se trouve le Tableau 12 dont parle l'extrait :

Appareil/composant	Variantes	Consommation d'énergie auxiliaire $W_{aux,heat,j}$ (kWh)
Circulateur par unité d'habitation	Sans régulation du circulateur	$0.70 \sum_{sec\ i}$
	Avec régulation du circulateur	$0.35 \sum_{sec\ i}$
Circulateur pour plusieurs unités d'habitation	En cas d'approvisionnement séparé en eau chaude sanitaire: circulateur uniquement pour le chauffage des locaux (fonctionnant uniquement pendant la saison de chauffe)	$0.35 \sum_{sec\ i}$
	Le circulateur sert aussi pour l'approvisionnement en eau chaude sanitaire par l'intermédiaire d'un circuit de fourniture: en fonctionnement toute l'année	$0.70 \sum_{sec\ i}$
Autres circulateurs	Circulateur supplémentaire en cas d'utilisation d'un réservoir de stockage pour le chauffage	$0.10 \sum_{sec\ i}$
	Circulateur supplémentaire entre la chaudière et les collecteurs/conduites de distribution	$0.10 \sum_{sec\ i}$
	Circulateur supplémentaire pour un échangeur de chaleur dans une caisson de traitement d'air	$0.10 \sum_{sec\ i}$
Chaudière/générateur	Ventilateur intégré	$0.30 \sum_{sec\ i}$
Chaudière/générateur	ELECTRONIQUE	$0.20 \sum_{sec\ i}$

Les valeurs par défaut à utiliser dépendront de si la production de chaleur sera centralisée à l'échelle de l'îlot, ou si elle sera présente dans chaque bâtiment. C'est pourquoi nous calculerons la consommation ici dans les deux cas. Les valeurs par défaut utilisées dans chacun des deux cas sont :

- Si la production de chaleur dans chaque bâtiment : Somme des Volumes protégés * (0,35 + 0,1 + 0,1 + 0,3 + 0,2)
- Si la production de chaleur est centralisée pour tout l'îlot: Il faut tenir compte des circulateurs supplémentaires, et du fait que la chaudière est située dans un unique volume chauffé.

Les volumes protégés nécessaires au calcul sont calculés sur base de la typologie mise en place. Ci-dessous sont repris les volumes protégés calculés pour chaque sous-type, pour les deux îlots.

ROTHEUX		
TYPLOGIE	V protégé Moyen	Nombre dans l'îlot
<i>4 façades</i>		
60-80	232,5	2
101-120	348,6	5
141-160	460	3
180-200	576	4
201-220	646,5	4
221-240	712,5	4
261-280	813,3	11
281-300	884	6
>300	988	3
<i>3 façades</i>		
101-120	334,5	4
141-160	460	3
180-200	558	2
260-280	780	2
<i>2 façades</i>		
141-160	350	1
260-280	780	1
		55
639,4		m³

VIVEGNIS		
TYPLOGIE	S chauffée Moyenne	Nombre dans l'îlot
<i>4 façades</i>		
60-80	310	4
<i>3 façades</i>		
81-100	294,7	3
121-140	516	2
161-180	567	2
221-240	910	2
281-300	888	1
<i>2 façades</i>		
60-80	236,3333333	6
81-100	342,3	6
101-120	354,3	6
121-140	484,2	5
141-160	498,4	8
161-180	594,2	9
201-220	705,5	2
>300	1144	1
		57
472,1		m³

Puisque le volume protégé moyen est une moyenne pondérée des volumes protégés de l'ensemble des habitations, selon la typologie, nous pouvons utiliser cette valeur pour calculer la consommation électrique des auxiliaires d'une habitation qui représente la moyenne de l'îlot. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour chacun des deux îlots.

<i>Consommation électrique des auxiliaires pour un bâtiment dont le volume protégé est le volume protégé moyen de l'îlot, établi selon la typologie.</i>			
Production de chaleur dans chaque bâtiment:			
	Rapport besoins mensuels/ besoins annuels	ROTHEUX kWh	VIVEGNIS kWh
Janvier	0,1922	129,0164	95,2522
Février	0,1610	108,0679	79,7860
Mars	0,1426	95,7648	70,7027
Avril	0,0832	55,8628	41,2432
Mai	0,0357	23,9412	17,6757
Juin	0,0059	3,9902	2,9459
Juillet	0,0000		
Août	0,0000		
Septembre	0,0079	5,3203	3,9279
Octobre	0,0644	43,2272	31,9144
Novembre	0,1268	85,1242	62,8468
Décembre	0,1803	121,0360	89,3603
TOTAL (1 habitation)		671	496 kWh/an
TOTAL (îlot)		36.905	28.272 kWh/an
Production de chaleur dans chaque bâtiment:			
	Rapport besoins mensuels/ besoins annuels	ROTHEUX kWh	VIVEGNIS kWh
Janvier	0,1922	153,5910	113,3955
Février	0,1610	128,6522	94,9833
Mars	0,1426	114,0057	84,1699
Avril	0,0832	66,5033	49,0991
Mai	0,0357	28,5014	21,0425
Juin	0,0059	4,7502	3,5071
Juillet	0,0000		
Août	0,0000		
Septembre	0,0079	6,3336	4,6761
Octobre	0,0644	51,4609	37,9933
Novembre	0,1268	101,3384	74,8177
Décembre	0,1803	144,0905	106,3814
TOTAL (1 habitation)		799	590 kWh/an
TOTAL (îlot)		43.945	33.630 kWh/an

3. Consommation électrique liée à la ventilation

Nous avons repris ci-dessous un extrait de l'Annexe 1 du décret wallon de la performance énergétique des bâtiments, concernant le calcul de la consommation électrique de la ventilation hygiénique, sur lequel nous nous sommes basés pour le calcul.

On détermine la consommation mensuelle d'électricité des ventilateurs comme suit:

$$W_{aux,fans,vent,m} = t_m \left(\sum_j \Phi_{fans,vent,j} \right) / 3.6 \quad (\text{kWh})$$

avec:

t_m la longueur du mois considéré, en Ms, voir Tableau 1;

$\Phi_{fans,vent,j}$ la valeur de calcul de la puissance électrique moyenne d'un ventilateur j déterminée selon 11.2.2.2, en W.

La longueur du mois en Ms est donnée dans le tableau ci-dessous.

Mois	Jour caractéristique	Longueur du mois t_m (Ms)
janvier	15	2.6784
février	46	2.4192
Mars	74	2.6784
Avril	105	2.5920
Mai	135	2.6784
Juin	166	2.5920
juillet	196	2.6784
AOÛT	227	2.6784
septembre	258	2.5920
octobre	288	2.6784
novembre	319	2.5920
décembre	349	2.6784

La valeur de la puissance électrique moyenne d'un ventilateur est tirée du tableau ci-dessous.

($V_{sec i}$: volume du secteur énergétique i)

Installation	Type de ventilateur	Puissance $\Phi_{fans,vent}$ (W)
MECANIQUE SIMPLE FLUX PAR INSUFFLATION OU EXTRACTION	ventilateur à courant alternatif	0.125 $\Sigma V_{sec i}$
	ventilateur à courant continu	0.085 $\Sigma V_{sec i}$
Mécanique double flux	ventilateur à courant alternatif	0.235 $\Sigma V_{sec i}$
	ventilateur à courant continu	0.150 $\Sigma V_{sec i}$
Mécanique simple flux par extraction avec utilisation de l'air repris comme source de chaleur pour une pompe à chaleur	ventilateur à courant alternatif	0.145 $\Sigma V_{sec i}$
	ventilateur à courant continu	0.100 $\Sigma V_{sec i}$
Mécanique double flux avec utilisation de l'air repris comme source de chaleur pour une pompe à chaleur	ventilateur à courant alternatif	0.270 $\Sigma V_{sec i}$
	ventilateur à courant continu	0.185 $\Sigma V_{sec i}$

Il faut faire une sommation sur le volume de tous les secteurs énergétiques i de la zone de ventilation considérée.

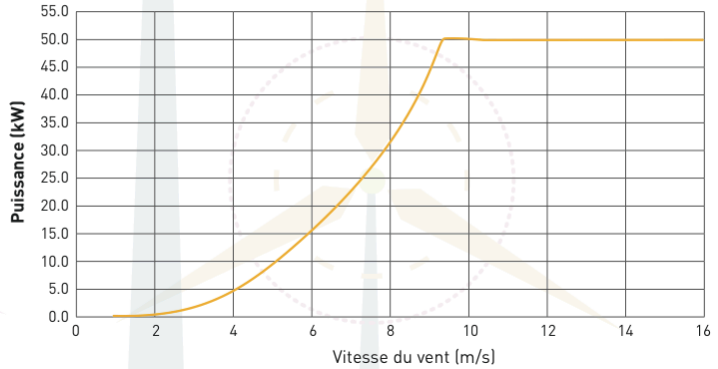
Puisque la méthode est identique à au calcul de la consommation électrique des auxiliaires, nous ne la détaillerons plus. Sur base des volumes protégés, on peut connaître la consommation électrique relative à la ventilation dans le cas d'une ventilation mécanique double flux (système envisagé dans ce travail), dans le cas d'un moteur à courant continu, ou d'un moteur à courant alternatif. Les résultats ont été donnés dans le travail.

4. Fiches techniques des éoliennes étudiées

Eolienne C&F green energy CF50 (Ecolia : <http://www.ecolia-energies.com>)

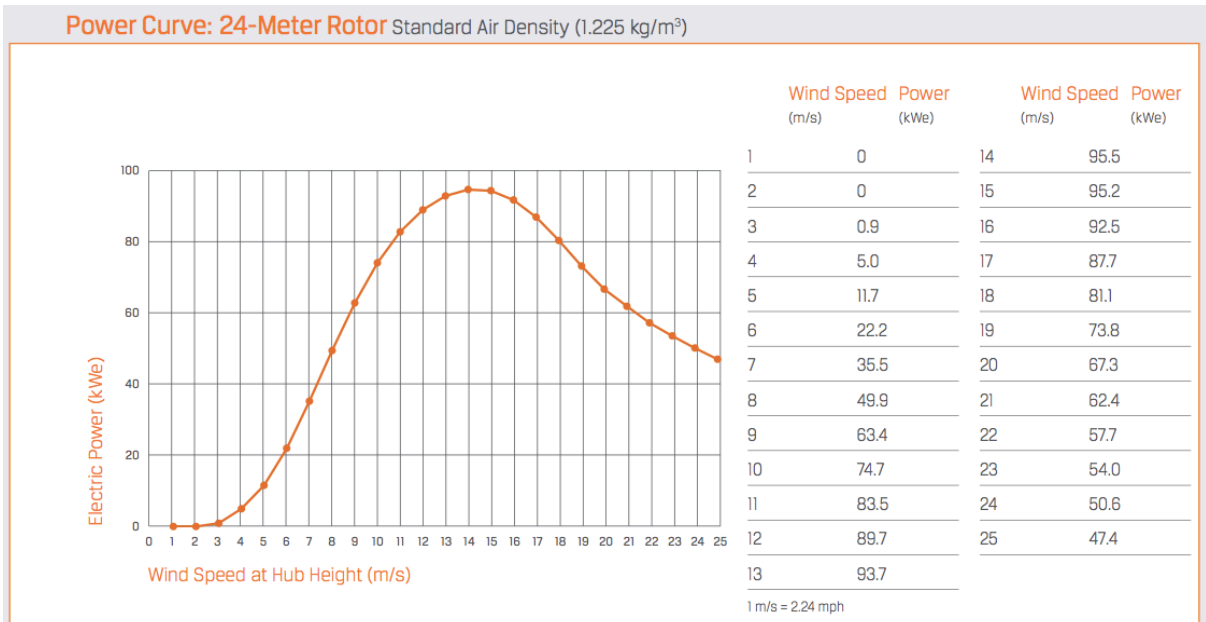
CF 50

Diamètre rotor	20 m
Mât fixe	29 m
Puissance maxi	50 kW
Vitesse nominale	9 m/s
Démarrage	2.2 m/s
Vitesse de coupure	30 m/s
CO2 préservé annuel	70 à 80 tonnes
Décibel à 5 m/s à 60 m	ND
Max RPM	50 RPM
Vitesse de vent moyenne annuelle (m/s)	Production annuelle (kWh)
4	78.100
4.5	92.150
5	117.250
5.5	141.940
6	164.900



Notons que nous ne nous sommes pas basés sur la courbe de production fournie par le fabricant pour calculer la production, parce que littérature préconise de s'en méfier en raison de l'absence de norme et de standard pour les petites éoliennes. En effet, le calcul basé sur l'équation de la puissance du vent, limité à son maximum avec la limite de Betz, nous a fourni des valeurs qui étaient toujours inférieures aux valeurs données ci-dessous.

Northern Power 100 (Northern Power systems : <http://www.northernpower.com>)



Bibliographie

AIE (Division des statistiques de l'Agence internationale de l'énergie) & Eurostat (l'Office statistique des Communautés européennes), 2005. Manuel sur les statistiques de l'énergie. Agence International de l'Energie, Paris, 209p.

APERe, 2007. Géothermie profonde et chauffage urbain en Hainaut, Renouveau webmag n°22, p22-23.

APERe, 2010. Prescriptions urbanistiques pour l'implantation d'une petite éolienne. Portail de l'énergie en Wallonie, Région wallonne : <http://energie-wallonie.be>, consulté en février 2013

APERe, 2011a. Situation de l'éolien en Région wallonne au 31/12/11. Portail de l'énergie en Wallonie, Région wallonne : <http://energie-wallonie.be>, consulté en février 2013

APERe, 2011b. Une petite éolienne chez moi ! C'est possible ? Portail de l'énergie en Wallonie, Région wallonne : <http://energie-wallonie.be>, consulté en février 2013

APERe, 2012a. La géothermie profonde renaît à Mons, Renouveau webmag n°40, page 6.

APERe, 2012b. Statistiques – Prix de l'énergie pour les ménages (p12). Renouveau webmag n°49, décembre 2012, 12p.

APERe, 2013. Association pour la Promotion des Energies Renouvelables : <http://www.apere.org>, consulté en février 2013.

Architecture et Climat, 2013. Energie +, SPW – DGO4 : <http://energieplus-lesite.be>, consulté en mars 2013.

Bauquis P-R., 2004. Quelles énergies pour les transports au XXI^e siècle ? Les cahiers de l'économie - n° 55, Série Analyses et synthèses, Ecole du pétrole et des moteurs, Institut français du pétrole, Rueil-Malmaison, 31p.

Barré B., Mérenne-Schoumaker B., 2011. Atlas des énergies mondiales: un développement équitable et propre est-il possible ?. Autrement, Paris, 75p.

Bodeux A., 1977. La vitesse et la direction du vent en Belgique, Institut Royal Météorologique, Bruxelles, 171p.

Bonnaure P., 2009. Quel avenir pour la voiture électrique ? Futuribles, n° 351, avril 2009, pp. 29-40.

Bureau d'études IRCO (Facilitateur en biométhanisation), 2010. Vade-mecum technique et administratif relatif à la biométhanisation de biomasse humide en Région wallonne, DG04 – SPW, Jambes, 78p.

Castello M, 2004. La géothermie. ADEME/brgm, France, 48p.

Centre d'analyse stratégique, 2011. La voiture de demain : carburants et électricité, rapport de la mission présidée par Jean Syrota. La Documentation française, Paris, 332p.

CETE de l'OUEST (Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de l'Ouest), 2013. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (République Française) : <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr>, consulté en mars 2013.

COGENGreen, 2013. Fabricant d'unités de micro-cogénération en Belgique: <http://www.cogengreen.com>, consulté en avril 2013.

Commission européenne – Europe 2020. Les objectifs d'Europe 2020: <http://www.ec.europa.eu>, consulté en mai 2013.

Crehay R., Marchal D., 2004. La filière bois-énergie. ValBiom (Valorisation de la biomasse asbl) – DGTRE. Namur, 58p.

Daoud I. – ICEDD asbl au nom de COGENSUD asbl, 2007. Installer une cogénération dans votre établissement, guide de pré-faisabilité pour les guides des acteurs du tertiaire, PME, PMI. Ministère de la Région Wallone - Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Énergie (DGTRE), Jambes, 40p.

De Herde A., Massart C., 2010. Elaboration d'un outil d'aide à la conception de maisons à très basse consommation d'énergie. Conception de maisons neuves durables. Service public de Wallonie, Jambes, 169p.

De Meester T., 2009. Guide de la rénovation basse énergie des logements en Belgique. Guide réalisé dans le cadre du projet LEHR (Low Energy Housing Retrofit). Politique scientifique fédérale, 59p.

De Meester T., Marique A.-F., De Herde A., Reiter S. 2013, Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in temperate climate in the northern part of Europe, *Energy and Buildings* 57, p313-323.

Detroz J., 2013. La rénovation résidentielle basse énergie & passive, la question des interventions structurelles. Travail de fin d'étude, Ulg, 204 pages.

Dronne Y., Forslund A., Guyomard H., 2011. Les biocarburants de deuxième génération et la compétition pour l'usage des terres. *OCL Volume 18 (1)* : 1-9. doi : 10.1684/ocl.2011.0361

Dubont F., 2013. Prise de position. Réaction de ValBiom face à la proposition d'amendement de la Commission européenne sur la Directive Energies renouvelables (COM(2012) 595 final). ValBiom, 3p.

ECEEE (European Council for an Energy Efficient Economy), 2011. Steering through the maze #2, Nearly zero energy buildings : achieving the EU 2020 target.

EF4 (Energie Facteur 4), 2013. <http://www.ef4.be>, consulté en mai 2013.

EWEA, 2013. The European Wind Energy Association : <http://ewea.org>, consulté en février 2013.

Filloux A., 2010. Intégrer les énergies renouvelables. CSTB, Nancy, 127p.

Frigon M., 2008 (publication revue en 2012). *En bref. Biocarburants : Comprendre les chiffres*, Publication no PRB 08-55F. Bibliothèque du Parlement, Ottawa (Canada), 9 pages.

Hegger M., Stark T., Fuchs M., Zeumer M., 2011. Construction et énergie, Architecture et développement durable. Presses polytechniques et universitaires romandes. DETAIL, Lausanne, 280p.

Henry P., 2013. Ministre de l'Environnement, de l'Aménagement du territoire et de la Mobilité : <http://www.henry.wallonie.be/Eolien>, consulté en mai 2013.

IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement), 2009. Infos fiches-énergie. Les éoliennes. Utiliser le vent pour produire de l'électricité et lutter contre l'effet de serre. Bruxelles environnement – IBGE, Bruxelles, 5p.

ICEDD, 2005. Bilan énergétique wallon 2005. Consommation du secteur du logement 2005. MRW-DG04, Jambes, 39p.

ICEDD, 2010a. Réaliser une étude de faisabilité de cogénération, dans les Règles de l'Art. Méthodologie à suivre et hypothèses "conservatives" à prendre. DG04, Jambes, 28p.

ICEDD, 2010b. Bilan énergétique de la Wallonie 2008, secteur domestique et équivalents. Service Public de Wallonie – DG04, Jambes, 132p.

ICEDD, 2011. Bilan énergétique de la Wallonie en 2009. Bilan de production et transformation. Service public de Wallonie, Jambes, 132 pages.

IEA (International Energy Agency), 2013. Net Zero Energy Buildings Database: <http://iea40.buildinggreen.com>, consulté en mai 2013.

Intradel, 2011. La mise en place de réseaux de chaleur : le chauffage urbain et industriel. Colloque Intradel chauffage urbain, salon Best.

Kints, C. 2008. La rénovation énergétique et durable des logements wallons. Analyse du bâti existant et mise en évidence des typologies de logements prioritaires. Division de l'Energie, Direction générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie, Ministère de la Région wallonne.

Le Dû S., 2012. Réseaux de chaleur et nouveaux quartiers, CETE de l'Ouest – Groupe Bâtiment & Energie - PCI Réseaux de Chaleur, France, 41p.

Les Compagnons d'Eole, APERe, Vents d'Houyet, E.R.B.E., 2012. Vade Mecum pour l'implantation des éoliennes de faible puissance en Wallonie. SPW-DGO4, Jambes, 76p.

Lilien, 2009. Cours d'installations électriques dans les bâtiments. Cours 5 – Micro-cogénération, cellules photovoltaïques et éolien. Université de Liège.

Lievens E., 2009. Agrocarburants : risques et opportunités pour les organisations paysannes. ValBiom, Belgique, 4p.

Lovinfosse I., Martin J., Tchouate Héteu P., Varone F., 2003. La filière hydroélectrique : Aspects technologiques et environnementaux. Working paper n°5. UCL (Université Catholique de Louvain), Louvain, 19p.

Marique A.-F., 2012a. Méthodologie d'Evaluation Energétique des Quartiers Périurbains. Perspectives pour le Renouvellement Périurbain Wallon, Thèse de doctorat, Université de Liège, 236p.

Marique A.-F., De Meester T., Winant S., De Herde A., Reiter S., 2012b. SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency) : an outline interactive tool for the energy assessment of residential buildings and transportation : <http://www.safe-energie.be>, consulté en avril 2013

Marique A.-F., Reiter S., 2012c. A Method to evaluate the energy consumption of suburban neighborhoods, HVAC&R Research 18 (1-2), p88-99.

Marique A.-F., Penders M., de Meester T., Reiter S., 2013. From Zero Energy Buildings to Zero Energy Neighbourhoods. Mobility and urban form matter. Passive and Low Energy Architecture International Conference (PLEA), Munich, 7p (article en cours d'évaluation).

Marszala A.-J., Heiselberga P., Bourrelleb J.-S., Musallc E., Vossck K., Sartorid I., Napolitanoe A., 2011. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. Energy and Buildings 43 (2011) pp971–979.

MATRIciel, 2010. Rapport technique – Bâtiments exemplaires, Fiche 3.2: comparatif des systèmes de chauffage et ECS pour les maisons individuelles et immeubles à appartements en conception passive et rénovation basse énergie. Bruxelles environnement - IBGE (institut bruxellois pour la gestion de l'environnement), Bruxelles, 40p.

Mérenne-Schoumaker B., 2011. Géographie de l'énergie – Acteurs, lieux et enjeux. Belin, Paris, 279p.

Ngô C., 2004. L'Energie. Ressources, technologies et environnement. Dunod, Paris, 148p.

Nollet J.-M., 2011. L'eau chaude, pétrole Wallon ? Ministère de l'Energie, Région wallonne, 20p.

OECD & IEA, 2011. Co-generation and renewables. Solutions for a low-carbon energy futur. International Energy Agency, Paris, 35p.

Pacot P-E., Reiter S., 2012. Evaluation du besoin de cogénération en Belgique dans la perspective des plans 2020-2030. Rapport final de recherche, 124p.

Pagès J.-M., Supparo E., Lafage B., Etienne J., Valet T., Galiano, M., 2003. Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité, pour les privés ou collectifs locaux. ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie), Valbonne, 159p.

Pétel M., 2011. Participation au projet de recherche SAFE. Stage Etude et Recherche, Maitre de stage : Reiter S. (ULg), 80p.

PEFC Belgium, 2013. Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes : <http://www.pefcbelgium.be>, consulté en mars 2013.

Pissart, Architecture et Environnement & Stratec, 2013. Insertion d'une ligne de tram et de son dépôt entre Jemeppe-sur-Meuse et Herstal. Etude d'incidences sur l'environnement. Volume 1. Société Régionale Wallonne du Transport - Direction technique, Namur, 851p.

Plate-forme Maison passive 2013 : <http://maisonpassive.be>, consulté en mars 2013.

Rienstra S.-A., Nijkamp P., 1998. The role of electric cars in Amsterdam's transport system in the year 2015 ; a scenario approach. Transpn Res.-D, Vol. 3, No. 1, pp. 29-40, Grande-Bretagne, 12p.

Soltherm, 2007. Un chauffe-eau solaire chez vous ! Ministère de la Région wallonne, Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie, Jambes, 16p.

SPW-DGO4 (Service Public de Wallonie – Direction générale opérationnelle : Aménagement du Territoire, Logement, Patrimoine et Energie), 2013. Portail de l'énergie en Wallonie, Région wallonne : <http://energie-wallonie.be>, consulté en mars 2013.

STIB, 2013. Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles : <http://www.stib.be>, consulté en avril 2013.

Suisse Eole, 2013. Toutes les données sur l'énergie éolienne en Suisse : <http://wind-data.ch>, consulté en avril 2013.

Torcellini P., Pless S., Deru M., Crawley D., 2006. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. National Renewable Energy Laboratory (NREL), California, 15p.

Union des Villes et Communes de Wallonie, 2009. Mouvement communal magazine, septembre 2009. Les réseaux de chaleur, p490-494

ValBiom, 2004. Les biocarburants, bientôt en Wallonie ? . Ministère de la Région wallonne - Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie, Jambes, 2p.

VITO Team geo, De Boever E., Lagrou D., Ben Laenen B., 2012. Guide de la géothermie en Belgique. Flemish Institute for Technological Research NV ("VITO"), Belgique, 30p.

Interviews

Monsieur Alain Dassargues de l'Ulg, en mars 2013.

Monsieur Mauro Baccarini de b2-architecture, en mars 2013.

Monsieur Damien Franzen de FHW Architectes, en mars 2013.

Madame Annick Lempereur, facilitatrice cogénération de la Région wallonne, en avril 20113

RENOVATION ENERGETIQUE DES ILOTS

Stratégie d'intégration des énergies renouvelables dans le but de tendre vers l'objectif zéro-énergie

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en Ingénieur Civil Architecte par **Marine PENDERS**
Faculté des sciences Appliquées ULg - Année académique 2012-2013

L'objectif "Zero Energy Building" (ZEB) est un moyen de répondre aux objectifs lancés par l'UE pour 2020.

L'objectif ZEB tient actuellement compte uniquement de l'échelle du bâtiment. Pourtant, considérer une échelle supérieure présente plusieurs enjeux intéressants. L'enjeu principal qui est exploré dans le cadre de ce travail concerne la consommation et la production d'énergie, avec la globalisation des besoins énergétiques à l'échelle de plusieurs bâtiments: l'échelle de l'îlot. De plus, nous avons décidé d'aller au-delà de la consommation des bâtiments en considérant également le transport.

Ce travail de fin d'étude s'articule autour de 3 pôles : la consommation énergétique liée aux bâtiments à l'échelle d'un îlot d'habitation ; la consommation énergétique liée au transport, engendrée par la localisation de l'îlot ; et l'apport en énergie renouvelable qu'il sera possible de fournir à ceux-ci.

L'objectif de cette étude est de déceler quelle serait la meilleure stratégie à adopter, dans l'optique d'intégration des énergies renouvelables dans le bilan énergétique global d'un îlot d'habitations, qui tend à l'objectif zéro-énergie.

Ce travail se décline en plusieurs chapitres. L'objectif du chapitre 2 est de déterminer, après un parcours de la littérature des systèmes exploitant les énergies renouvelables, quels sont ceux que l'on pourrait utiliser à l'échelle d'un îlot, en milieu urbain et/ou en milieu périurbain. Dans le chapitre 3, nous calculons l'ensemble des paramètres nécessaires à l'élaboration d'un bilan de consommation en énergie primaire global. Enfin, nous évaluons ces bilans au chapitre 4, en discutant des divers paramètres pour en tirer les conclusions et les perspectives qui s'ensuivent.

Les stratégies à adopter diffèrent évidemment d'un îlot à l'autre, en fonction des différents paramètres qui régissent les consommations énergétiques et les potentiels en énergie renouvelable. C'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer la méthode à un îlot urbain (îlot situé rue Vivegnis, dans le quartier Saint-Léonard, à Liège) et à un îlot périurbain (îlot situé à Rotheux-Rimière, à Neupré).

Nous avons investigué plusieurs scénarios de rénovation des bâtiments et de réduction des consommations du transport, afin de déterminer quelle attitude est la plus pertinente. Le bilan, effectué en **énergie primaire**, met en évidence les paramètres les plus influents sur la consommation. Notamment, on constate le faible impact d'une rénovation passive des bâtiments, comparé à une rénovation basse énergie qui exploite le potentiel solaire photovoltaïque.

Certains résultats de ce travail de fin d'études ont été sollicités pour la rédaction de l'article "From Zero Energy Buildings to Zero Energy Neighbourhoods. Mobility and urban form matter" (Marique et al., 2013), actuellement en cours d'évaluation.