

Quelles solutions énergétiques faut-il favoriser pour participer à la transition vers un territoire zéro-énergie? Stratégie appliquée au cas de la région Wallonne.

Auteur : Mayenga-Matondo-Ngoy, Kristel

Promoteur(s) : Attia, Shady; Reiter, Sigrid

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5358>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

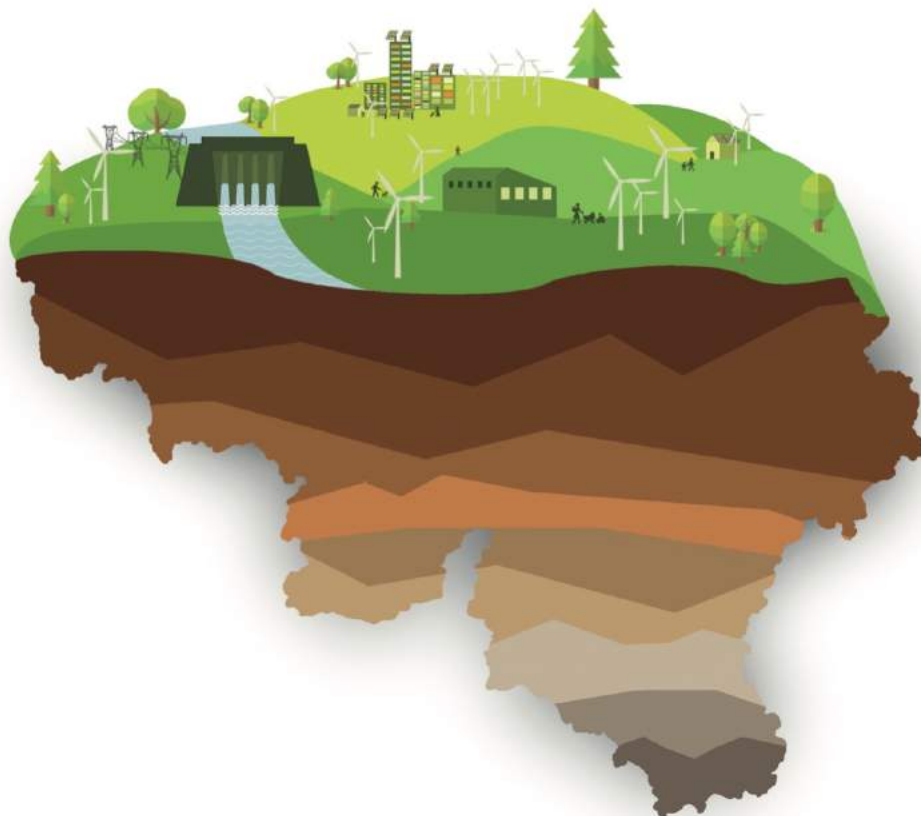
METHODOLOGIE DE TRANSITION VERS UN TERRITOIRE-QUASI-ZERO- ENERGIE AUTONOME APPLIQUEE AU CAS DE LA REGION WALLONNE

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION

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

Promoteurs : Shady ATTIA & Sigrid REITER

Jury : Pierre DEWALLEF, Jean-Marie HAUGLUSTAINE & Jacques TELLER



REMERCIEMENTS

*« Le possible n'est pas loin du nécessaire »
Pythagore.*

Je voudrais remercier tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leur encouragement tout au long de l'élaboration de ce travail de fin d'études.

Merci à madame Sigrid Reiter, promotrice, pour son expérience, ses sages suggestions, son énergie, sa grande disponibilité, et ses relectures attentives.

Merci à monsieur Shady Attia, promoteur, pour ses conseils judicieux, son temps accordé et son intérêt pour la problématique.

Merci à monsieur Pierre Leclercq pour son soutien durant tout ce cursus universitaire. Ce travail de fin d'études n'aurait jamais vu le jour sans son encadrement.

Merci à messieurs Jean-Marie Hauglustaine, Jacques Teller, et Pierre Dewallef, membres du jury, pour l'intérêt et l'examen qu'ils portent à ce travail.

Enfin, merci à ma famille, mes proches, et particulièrement Gaetan, pour m'avoir donné l'opportunité de faire évoluer ce travail, pour leur support, et leur patience.

CHAPITRE 1| INTRODUCTION

1.1 Avant-Propos	2
1.2 Objectifs	5
1.3 Structure du travail	6

CHAPITRE 2| ETAT DE L'ART

2.1 Stratégies à l'échelle du territoire	9
2.1.1 Recherche théorique - Internationale.....	9
A Résilience énergétique urbaine, NIES - Japon	9
2.1.2 Recherches théoriques - Belges.....	11
A Toward low energy cities - Université de Liège	11
B Rénovation énergétique des ilots - Université de Liège.....	13
C Zero-energy at the neighbourhood scale - Université de Liège.....	14
D Etude de prospective de transition énergétique - IWEPS.....	15
E Bureau fédéral du plan	16
2.1.3 Exercices pratiques	19
A L'île de la Réunion - France	19
B Le Mené, Bretagne – France	20

CHAPITRE 3| METHODOLOGIE

3.1 Bilan de l'état de l'art.....	22
3.2 Caractérisation du « Territoire-quasi-zéro-énergie autonome »	24
3.2.1 Période d'équilibre énergétique.....	24
3.2.2 Limites physiques du site.....	24
3.2.3 Définition d'un territoire-quasi-zéro-énergie autonome	25
3.3 Scénarios de réhabilitation du parc immobilier	28
3.3.1 Performances énergétiques des bâtiments	28
3.3.2 Renouvellement du parc immobilier.....	31
3.3.3 Climat	33
3.3.4 Démographie.....	34
3.3.5 Stratégie de réhabilitation du parc immobilier du TqZEA.....	37
3.4 Scénarios de transformation du parc énergétique.....	38
3.4.1 Performances énergétiques des systèmes de production	40
A L'énergie hydraulique – la centrale hydroélectrique	40
B L'énergie éolienne – Le grand éolien	41
C L'énergie solaire – les panneaux photovoltaïques	42
3.4.2 Stratégie de transformation du parc énergétique du TqZEA	44
3.5 La règle des 4A	45
3.5.1 Indicateurs d'un territoire-quasi-zéro-énergie autonome	45
A Availability.....	45
B Accessibility.....	47
C Affordability	48
D Acceptability.....	50
3.5.2 Critères de comparaison	52

CHAPITRE 4| APPLICATION

4.1 Présentation du cas d'étude.....	55
4.1.1 Le territoire Wallon	55
A Réseau de distribution d'énergie	56

B Degré d'urbanisation du territoire qZEA.....	56
4.1.2 Structure du parc immobilier.....	58
A Taux de renouvellement du parc bati.....	58
B Demande énergétique du stock bati.....	58
C Cout de rénovation du bati.....	60
4.1.3 Systèmes de production d'électricité.....	61
A Installations de production préexistantes.....	61
B Nouvelles infrastructures de production d'électricité.....	62
C Taux de production.....	62
D Cout de production.....	64
E Acceptation sociale et environnementale.....	65
4.2 Modélisation des scénarios de consommation et de production.....	67
4.2.1 Signification des formats de cellules.....	67
4.2.2 Insertion des données entrantes.....	67
A Données administratives.....	67
B Données démographiques & climatiques.....	68
C Données énergétiques et urbaines liées à la consommation.....	69
D Données énergétiques et urbaines liées à la production.....	71
4.2.3 Implémentation des équations.....	72
A Taux de rénovation du parc immobilier.....	72
B Taux de production du parc énergétique.....	73
4.2.4 Indicateurs de résilience liés au TqZEA.....	74
4.3 Résultats de la simulation des scénarios.....	77
4.3.1 Invariants de calcul – Climat et démographie du territoire Wallon.....	77
4.3.2 Scénarios de réhabilitation du parc immobilier.....	77
A Analyse globale des scénarios de réhabilitation du parc immobilier Wallon.....	79
B Availability – Taux de réduction de la consommation.....	81
C Affordability – Cout moyen de rénovation du parc bati.....	83
D Acceptability – Indice de pente moyenne.....	84
E Résultats de la simulation liés à la consommation.....	86
4.3.3 Scénarios de transformation du parc énergétique.....	87
A Analyse globale des scénarios de transformation du parc énergétique Wallon.....	87
B Availability – Facteur de disponibilité.....	88
C Accessibility - Facteur d'allocation des ressources.....	89
D Affordability - Cout moyen de production du parc énergétique.....	90
E ACCEPTABILITY - Acceptation sociale et environnementale.....	91

CHAPITRE 5| BILANS & CONCLUSIONS

5.1 Solutions énergétiques à favoriser.....	93
5.2 Indicateurs de résilience.....	97
5.3 Conclusion.....	98
5.4 Perspectives de recherche.....	100

Sources.....	I
Table des illustrations.....	V
Table des tableaux.....	VI
Table des annexes.....	VIII

CHAPITRE 1| INTRODUCTION



1.1 | AVANT-PROPOS

Le plan d'action climat énergie adopté en 2008 par l'Union Européenne (UE) fait l'objet d'accord politique visant les grands défis énergétiques du 21^{ème} siècle : le changement climatique, la sécurité d'approvisionnement et la compétitivité. L'Europe s'est fixé un objectif "zéro-énergie" pour répondre à cette triple préoccupation. Néanmoins, selon de nombreux observateurs, l'absence d'objectifs contraignants en matière d'énergies renouvelables, le type d'utilisation de l'énergie incluse dans le bilan et les options d'approvisionnement d'énergie renouvelable déforcent le cadre et les orientations adoptés par les Etats membres de l'UE.

Pour répondre à ces problématiques, la notion de transition énergétique est apparue. Elle désigne une révision des modes de production et de consommation de l'énergie par le passage d'un système énergétique utilisant dans sa quasi-totalité des sources d'énergie non renouvelable vers un mix énergétique basé principalement sur des ressources renouvelables.

« Un aspect essentiel de la transition énergétique est la maîtrise des consommations énergétiques qui passent elles-mêmes par la recherche de l'efficacité énergétique et de la lutte contre le gaspillage. C'est ce qu'on appelle également la "sobriété énergétique". A ne pas confondre avec la "décroissance énergétique" car le progrès humain n'est certainement pas la privation d'énergie. » (Roger-Machart et al., 2013)

Les enjeux liés à une transition énergétique touchent notamment à des valeurs économiques, environnementales et sociétales.

L'économie

En partant du constat que la demande énergétique mondiale augmente continuellement et est soutenue par l'épanouissement de nouveaux pays industrialisés, par l'augmentation de la population mondiale, ainsi que l'amélioration du niveau de vie, le déclin des ressources énergétiques sur lesquelles nos sociétés se reposent actuellement est inévitable.

Le développement actuel de nos sociétés repose principalement sur la production des sources d'énergies à combustibles fossiles, abondantes et bon marché mais posant de nombreux problèmes en matière d'environnement.

Comme on peut le voir Fig. 1, les ressources d'énergie non renouvelable se répartissent inégalement à travers le monde. La production belge avoisine les 0. L'Europe n'atteint pas le top 3 des producteurs mondiaux d'énergie (≈4% des réserves mondiales).

A long terme, l'Europe sera de plus en plus dépendante de l'extérieur, les facteurs volatils (prix d'import, quantité, accès, etc.) liés à l'utilisation des énergies fossiles et nucléaires rendant celles-ci inadéquates. Hypothétiquement et à plus long terme¹, les productions de pétrole et de gaz naturel rencontreront un épuisement inéluctable qui engendrera naturellement une augmentation de leurs prix.

Ainsi, la hausse du prix étouffera la demande à laquelle l'offre ne pourra répondre.

Face à ce déclin et aux inégalités d'accès à l'énergie existants dans le monde, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable (SER) se présente comme une solution pour diminuer

¹ « Ces ressources ne seront pas épuisées à court terme car, au rythme actuel, les réserves prouvées de pétrole représentent environ 54 ans de consommation, celles de gaz naturel 64 ans, et celles de charbon 112 ans. » (Favennec & Mathieu, 2014). De plus, on découvre encore de nouveaux gisements (notamment de pétrole en Antarctique).

les tensions géopolitiques qui mettent en péril la sécurité des approvisionnements pétroliers et gaziers, en tendant à l'**indépendance énergétique** pour tous :

- amélioration de l'indépendance économique et politique vis-à-vis des pays exportateurs de combustibles fossiles ou d'uranium ;
- réduction des risques économiques liés aux pénuries d'énergie² grâce à des sources d'énergie primaire pratiquement illimitées ;
- accroissement de la richesse nationale grâce à une réduction des importations d'énergie primaire.

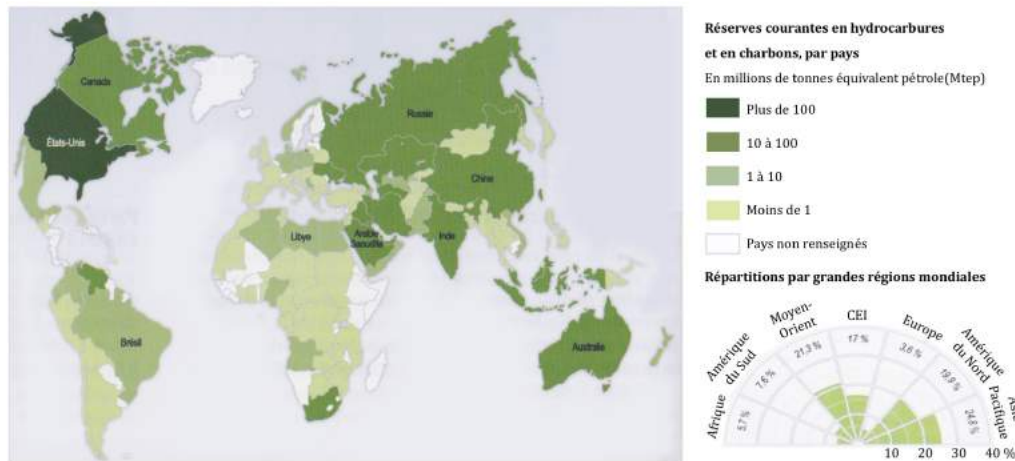


Fig. 1: Réserves courantes en hydrocarbures et en charbons, par pays, au 1^{er} janvier 2014 (Favennec & Mathieu, 2014)

L'environnement

Les états membres de l'Union Européenne se sont d'ailleurs dotés d'objectifs ambitieux (20-20-20) en plaçant le développement des nouvelles énergies renouvelables en priorité. On note que les discussions sur la transition énergétique, notamment au travers des travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), révèlent une intégration urgente du **contexte écologique** dans les politiques publiques. On reconnaît dans ces travaux les conséquences du dérèglement climatique lié à nos émissions de gaz à effet de serre (GES). Selon l'agence internationale de l'énergie (AIE), le secteur de l'énergie est à l'origine de 60 à 70% de ces GES au niveau mondial.

Considérant que le dérèglement climatique signalé par le GIEC est une priorité, une transition énergétique vise la réduction de la part des énergies productrices de gaz à effet de serre. Cela implique de réduire considérablement la consommation de combustibles fossiles, de développer progressivement des solutions de remplacement aux combustibles fossiles et de transiter vers une énergie plus propre.

En Europe occidentale, la majorité des scénarios prévoient de réduire progressivement le recours aux combustibles fossiles et fissiles (uranium, plutonium, etc.), et de les remplacer par des sources d'énergies renouvelables pour la quasi-totalité des activités humaines (chauffage, transport, industrie, éclairage, etc.).

² L'économie mondiale a subi 3 grandes crises pétrolières au cours des 50 dernières années. Le dernier "choc pétrolier" datant de 2008 (Quioc & Dugua, 2008). Bien que les causes et les conséquences de chacune de ces crises soient différentes, de nombreux spécialistes craignent une répétition de celles-ci en raison de la dépendance accrue de l'économie mondiale au pétrole et de la diminution des réserves naturelles de pétrole. (Kergueris & Saunier, 2005)

Néanmoins, les productions d'énergie issues de l'éolien, du solaire, et dans une moindre mesure de l'hydraulique sont dépendantes du climat et donc plus difficilement programmables qu'avec des centrales fossiles.

Les valeurs mensuelles observées Fig. 2 mettent en évidence la disparité du taux de production d'énergie éolienne.

Des techniques de stockage sont ainsi à développer en parallèle pour couvrir les besoins énergétiques réels. Il faut aussi diversifier les types de centrale de production d'énergie et assurer une large répartition géographique des installations.

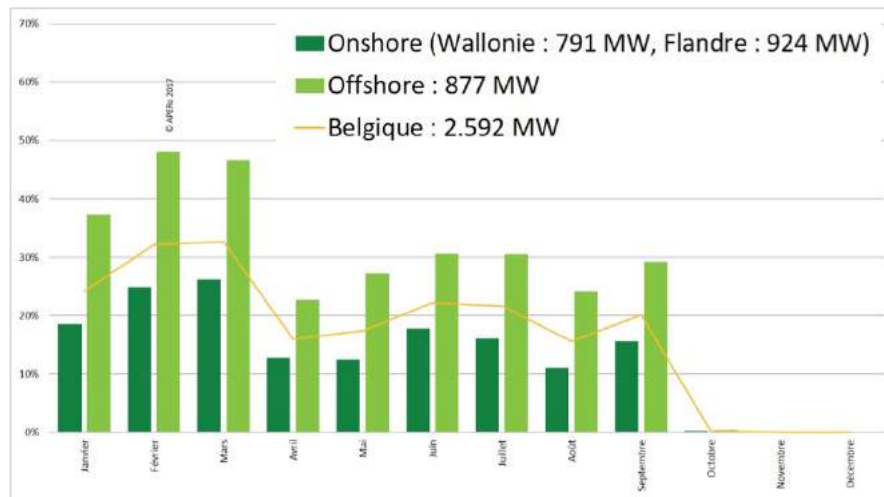


Fig. 2 : Taux de charge éolien belge 2017 [source : APERe]

La société

Il est nécessaire d'engager une transition vers un système faisant appel à d'autres sources d'énergie lorsque celles-ci sont un frein à l'expansion économique d'une communauté. Se poser la question d'une transition énergétique, c'est s'interroger sur un modèle jugé acceptable pour une société donnée, mais également soutenable économiquement.

Dans une perspective de "**justice sociale**", le modèle économique de développement énergétique devrait impliquer toutes les tranches de la population et en particulier les groupes de personnes qui sont généralement les plus vulnérables aux augmentations des prix de l'énergie. Or en Belgique, plus de 20% des ménages sont en situation de précarité énergétique [source de JCV, 2018]. Avec la hausse du prix de l'énergie, cette inégalité s'accroît et touche de plus en plus de ménages. Dès aujourd'hui, un changement du modèle énergétique permettrait de mettre en place de nouvelles actions en veillant à réduire les fractures sociales, voire à faire disparaître celles qui existent. (Wiliquet, 2014)

Les enjeux

Dans un contexte tel que présenté, l'objectif de ce travail est de relever les défis énergétiques qui se posent aujourd'hui dans une perspective de justice sociale et de développement durable, de manière à enclencher une transition énergétique d'échelle territoriale et s'émanciper des énergies non renouvelables.

1.2 | OBJECTIFS

L'enjeu de ce travail concerne la consommation et la production d'énergie globalisées à l'échelle d'un territoire dans le but de participer à la transition vers un territoire quasi-zéro-énergie autonome (TqZEA). On ne considère ni un ensemble de bâtiment répondant individuellement aux exigences zéro-énergie, ni la multiplication de quartiers zéro-énergie, mais bien un territoire global.

La stratégie étudiée s'appuie sur les demandes annuelles de chaleur (chauffage, eau chaude sanitaire), de climatisation, et d'électricité (éclairage, ventilation, appareils électriques, etc.) des secteurs résidentiel et tertiaire.

L'objectif est donc de concevoir une méthodologie qui permettra de définir les solutions énergétiques et durables les plus efficaces dans une optique de transition vers un territoire quasi-zéro-énergie autonome. Et de créer un outil d'accompagnement à la conception interactif, reposant sur le tableur Microsoft Excel, qui aidera à l'implémentation des variables et au modèle d'optimisation des performances énergétiques du territoire.

Les principales questions auxquelles ce travail tente de répondre sont :

- Qu'est-ce que le zéro-énergie à l'échelle d'un territoire ?
- Comment mettre en place une méthodologie visant à identifier les solutions énergétiques à favoriser tout en restant dans une politique durable ?
- Comment atteindre les objectifs de réduction de la consommation d'énergie du territoire Wallon tout en préservant un mode de vie agréable ?
- Quels systèmes de production d'énergie renouvelable sont envisageables à grande échelle ?
- Quelles solutions énergétiques faut-il favoriser pour participer à la transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome ?

Produit de la recherche

Au sortir de ce travail, un outil de calcul interactif basé sur le logiciel Excel 15.21.1 permettra de mettre en évidence un scénario de transition énergétique du territoire étudié. Les paramètres pris en compte touchant à 4 domaines dits les 4A (availability, affordability, accessibility, acceptability) pour intégrer des notions techniques, urbaines et sociales dans la stratégie de transition.

Son rôle est de fournir les méthodes d'encodage et de calcul nécessaires pour concevoir ou valider un territoire quasi-zéro-énergie autonome.

Objectifs de recherche

Concrètement les objectifs de ce travail de fin d'études visent à :

- fournir une étude objective quantifiée qui permette d'assister les acteurs publics ou privés lors de la conception de plans stratégiques tels que le "paquet climat-énergie";
- présenter la problématique des performances énergétiques liées à l'habitat et la transposer à une échelle touchant un plus grand nombre de monde ;
- montrer qu'il est possible de concevoir un territoire durable en conciliant efficacité énergétique, bien être collectif et qualité environnementale ;
- créer un outil de calcul dynamique avec des paramètres d'entrée simples pour optimiser les performances énergétiques du stock de bâtiments du territoire wallon.

Fig. 3: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif-formulaire territoire-zéro-énergie-autonome

1.3| STRUCTURE DU TRAVAIL

Ce travail se compose de deux grandes parties. Une partie théorique comprenant un état de l'art et le développement d'une méthodologie de transition vers un territoire quasi-zéro-énergie-autonome. Et une partie pratique permettant d'appliquer cette démarche de transition sur un territoire réel.

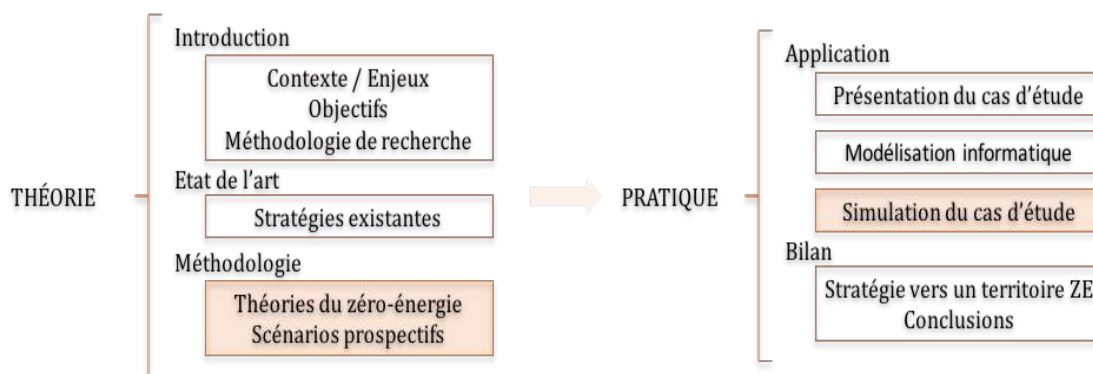


Fig. 4 : Structure du travail

La partie théorique se divise en trois chapitres. Dans le premier chapitre, on analyse le contexte et les enjeux liés à une transition énergétique. Pourquoi les systèmes énergétiques actuels sont inadaptés à long terme et en quoi l'utilisation de ressources renouvelables répond à cette problématique. Les questions et la méthodologie de recherche utilisées sont détaillées dans cette partie.

Le deuxième chapitre, l'état de l'art, s'intéresse aux multiples méthodologies déjà développées à grande échelle afin d'arriver à un site répondant à un objectif homologue au zéro-énergie (à l'échelle d'un quartier, d'une ville ou d'un pays).

Dans le troisième chapitre qui concerne l'analyse de ce travail de fin d'études, on étudie tout d'abord de manière théorique ce qu'est un territoire-zéro-énergie-autonome en s'intéressant aux diverses définitions d'une entité zéro-énergie. On définit ensuite une méthodologie pour y parvenir. Pour ce faire, on s'attèle à déterminer des scénarios prospectifs de consommation adaptés à l'échelle du territoire, et de production exploitant des ressources renouvelables. En se posant des questions telles que : Quelles sont les exigences de performances énergétique du bâti qui s'appliqueront dans le futur ? Quelles sont les ressources renouvelables disponibles ? Peuvent-elles fournir les formes d'énergie nécessaires pour répondre aux besoins ? Cette analyse permet ainsi de se positionner par rapport aux recherches existantes, et plus particulièrement de poser des limites à la définition d'un "Territoire quasi-zéro-énergie autonome".

La partie pratique se divise en deux chapitres. Dans un premier temps, le chapitre d'application présente le cas d'étude et introduit toutes les données nécessaires à la démarche de transition énergétique. C'est à la suite de ce chapitre que l'on modélise la méthodologie déployée dans l'outil informatique sous forme d'un fichier Excel. Finalement on met en pratique la stratégie développée dans la méthodologie.

Ce travail de fin d'études se clôture par un résumé des solutions énergétiques présentées, de la méthodologie de transition développée, et des possibles perspectives de recherches qui lui sont associées. Ce chapitre a pour but de faire le bilan des résultats obtenus, confronter ceux-ci à la théorie développée, présenter les limites rencontrées, discuter de la méthodologie employée et des questions de recherches formulées.

METHODOLOGIE DE RECHERCHE

La méthodologie de recherche utilisée dans ce mémoire de fin d'études se décompose en 3 étapes (état de l'art, méthodologie, application) qui sont expliquées ci-après.

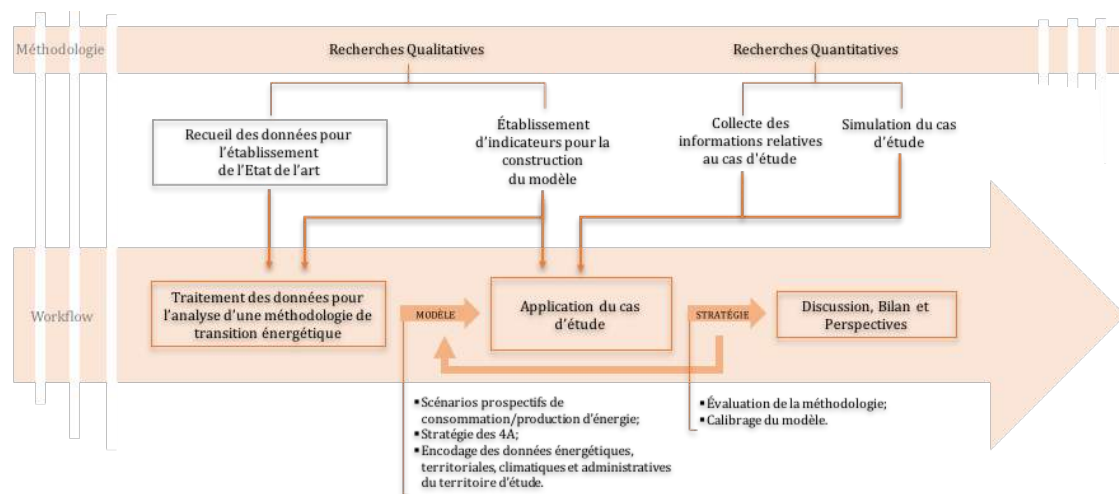


Fig. 5: Méthodologie de recherche appliquée : collecte et traitement des données

Etat de l'art

Les publications scientifiques relatives aux initiatives liées à l'énergie sur un territoire plus grand qu'un quartier sont encore rares. L'attrait pour ce domaine émergeant depuis seulement une 20^{aine} d'années. Dès lors, l'analyse de contenu a consisté en un examen méthodique de l'ensemble des documents trouvés. L'objectif principal de cette recherche qualitative étant de fournir une description complète et détaillée du sujet de recherche. Afin d'inclure le plus grand nombre possible d'études pertinentes, un protocole de revue spécifique et étendu a été développé. Les bases de données électroniques suivantes ont été consultées pour identifier des études potentiellement pertinentes : Scopus, ScienceDirect et Google Scholar (les 100 premiers résultats). Le travail de recherche s'est effectué par mots-clés : zero energy, energy autonomy, transition énergétique, énergie renouvelable, stockage d'énergie, urban energy, énergie positive, sustainable energy. En outre, la méthode dite "boule de neige" a été utilisée pour inclure d'autres études. Lors de la lecture des articles sélectionnés, les études pertinentes citées dans leur section bibliographique ont été ajoutées à la base de données de la revue. La sélection des documents s'est effectuée en accord avec les questions de recherche déterminées au préalable.

Méthodologie

Dans une 1^{ère} phase, les données recueillies sur base de l'état de l'art ont été codifiées de manière qualitative afin de définir la notion de "territoire-quasi-zéro-énergie autonome", les hypothèses à mettre en place, les scénarios prospectifs de consommation et de production d'énergie adaptés et les 4 critères qui vont permettre de mesurer les performances du territoire (availability, affordability, accessibility, acceptability). Par la suite, les données collectées dans l'état de l'art ont fait l'objet de traitements à des fins d'analyse et d'interprétation. Les transformations opérées se sont articulées de façon à créer de nouvelles données quantitatives (indicateurs des 4A). Il s'agit ainsi de balayer les données recueillies en les filtrant puis en les regroupant selon des critères congruents.

Application

Pour identifier la pertinence et l'importance de chaque critère, une simulation sur cas réel a été réalisée. Cela permet également de réduire les biais, et augmenter la fiabilité de l'étude. Les données quantitatives mesurées/repérées touchent aux informations énergétiques, climatiques, territoriales et administratives du cas d'étude.

CHAPITRE 2| ETAT DE L'ART



2.1| STRATEGIES A L'ECHELLE DU TERRITOIRE

Diverses institutions gouvernementales et ONG ont proposé des définitions et scénarios de transition énergétique. Cependant, la littérature française et anglaise sur les initiatives liées à l'énergie est dans un état émergent, les publications dans ce domaine sont donc encore rares.

2.1.1| RECHERCHE THEORIQUE - INTERNATIONALE

A| RESILIENCE ENERGETIQUE URBAINE, NIES - JAPON

Deux chercheurs de l'institut national d'études environnementales au Japon se sont penchés sur la notion de résilience urbaine. La publication " Principles and criteria for assessing urban energy resilience", (Sharifi & Yamagata, 2016) présente les résultats de leurs recherches. Dans cet article, ils passent en revue la littérature pour développer un cadre théorique pouvant servir de base au développement d'outils d'évaluation de la résilience énergétique urbaine. Les résultats du processus d'évaluation de la résilience énergétique urbaine peuvent permettre aux planificateurs et aux décideurs d'identifier les priorités et prendre des décisions plus éclairées qui facilitent la transition vers des communautés plus résilientes. Les principaux objectifs de cette étude préliminaire sont :

- élaborer un cadre conceptuel pour évaluer la résilience énergétique urbaine ;
- introduire plusieurs catégories de critères de planification et de conception pouvant être utilisés pour évaluer la résilience énergétique urbaine ;
- explorer les associations possibles entre les critères retenus et les composants du cadre de résilience énergétique ;
- identifier la pertinence des critères sélectionnés pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

Cette étude adopte une approche adaptative de la résilience énergétique urbaine où la durabilité est fortement liée au concept de résilience dans le contexte de l'énergie urbaine. Dans le cadre théorique, il est proposé que pour être résilient, le système énergétique urbain durable doit élaborer des stratégies efficaces pour être capable de "planifier et se préparer", "absorber", "se remettre de" et "s'adapter" à tout événement indésirable qui pourrait survenir dans le temps et dans des conditions d'incertitude variables. L'intégration de ces quatre capacités dans le système lui permettrait d'aborder en permanence la disponibilité "availability", l'accessibilité "accessibility", l'abordabilité "affordability" et l'acceptabilité "acceptability" comme les quatre dimensions de la résilience énergétique liées à la durabilité. Selon les chercheurs de cet article :

- **la disponibilité** dénote l'existence de réserves adéquates de ressources énergétiques, ainsi que d'une infrastructure appropriée pour les transformer en services énergétiques. Pour assurer la durabilité, des mesures de précaution doivent être prises afin de reconnaître les incertitudes futures et d'éviter les risques potentiels qui peuvent constituer une menace pour la disponibilité des sources d'énergie. Des exemples de mesures comprennent la fourniture de marges de réserve, l'augmentation de la diversité des ressources, le développement de sources de secours et de sources alternatives ;
- **l'accessibilité** est l'une des composantes de l'équité intra-générationnelle. Elle fait référence à l'importance de la proximité spatiale de l'offre et de la demande d'énergie. Cela implique également une distribution équitable des services énergétiques, à tous les membres d'une communauté, en termes de quantité et de qualité. Cependant, il n'est pas nécessaire de s'assurer que chaque individu et chaque communauté ait un accès satisfaisant aux ressources nécessaires pour maintenir des niveaux de bien-être décents et équitables. Ces éléments sont pris en compte par le paramètre

d'abordabilité expliqué ci-après. Dans le contexte de la gestion de l'énergie urbaine, l'accessibilité implique l'accès physique aux sources d'énergie et l'accès à d'autres types de services tels que la main-d'œuvre et les technologies nécessaires à la fourniture d'énergie de haute qualité ;

- **L'abordabilité** est une autre composante de l'équité intra-générationnelle. Il est important d'étudier à quel point l'accès à l'énergie et aux ressources est abordable. Elle signifie que la part du revenu que les ménages doivent dépenser pour satisfaire leurs besoins énergétiques de base (chauffage, climatisation, éclairage, etc.) ne doit pas dépasser un certain seuil. Dès lors, la stabilité et la prévisibilité des prix de l'énergie sont importantes pour assurer l'accessibilité à l'énergie.

L'abordabilité peut également être définie en termes de capacité des communautés à investir et à financer les innovations technologiques de pointe nécessaires pour faciliter la transition vers des sociétés sobres en carbone et résilientes ;

- la dernière dimension, **l'acceptabilité**, implique des mécanismes de gouvernance qui reconnaissent la nécessité d'une participation citoyenne active et large et la mobilisation des parties prenantes, la sensibilisation, le renforcement des capacités et la prise de décision collective et participative.

Les questions liées à la justice environnementale devraient également être prises en compte. Cela implique également de minimiser les impacts environnementaux des systèmes énergétiques, d'éviter une exposition disproportionnée aux risques environnementaux associés aux systèmes énergétiques et de surmonter les obstacles sociaux et organisationnels à l'adoption et à l'innovation des technologies. Dans le contexte des systèmes énergétiques, cela est lié à la résolution de problèmes tels que la répartition inéquitable des impacts négatifs associés à la localisation et à la distribution des installations de production et de transport d'énergie.

Le Tableau 1 met en évidence les associations entre les composants du cadre d'évaluation de la résilience en général. On observe que les critères sont inextricablement liés et que des changements dans l'un peuvent affecter les autres. Lorsque l'on regarde les 4 composantes nécessaires à la résilience d'un système énergétique urbain durable (encadré en orange), on constate que le critère de disponibilité (A1) est fortement lié à celui d'accessibilité (A2), à 83%. Les dimensions de durabilité et les principes du cadre conceptuel (encadré en mauve) indiquent quant à eux que la disponibilité est l'élément le plus répandu lié à la résilience énergétique, suivi par l'acceptabilité et l'abordabilité.

La méthode de détermination de ces corrélations est expliquée en détail dans la section 2 de l'article. (Sharifi & Yamagata, 2016)

Cette étude met en évidence la nature interconnectée et multidimensionnelle de la résilience énergétique en tant que concept synergique et souligne l'importance d'adopter une approche systémique pour son amélioration. L'exploration de la pertinence des critères identifiés pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique a révélé que les décisions relatives à un composant sont susceptibles d'affecter également d'autres composants. Autrement dit, les efforts liés à l'amélioration des composantes d'un système énergétique durable ne doivent pas être effectués indépendamment les uns des autres.

Tableau 1: Matrice d'association des éléments constitutifs de la résilience énergétique urbaine (Sharifi & Yamagata, 2016, p. 18)

	A	R	Ad	A1	A2	A3	A4	R	S	F	Re	CC	Rd	D	FC	I	In	C	A	Ad	SO	Cr	E	Eq
P	79	30	69	92	32	46	80	2	12	7	16	12	5	22	15	17	6	4	5	20	9	4	71	14
A		26	68	85	29	47	74	2	9	7	12	10	4	22	11	16	5	5	6	24	8	4	68	12
R			17	31	23	14	20	0	5	5	10	8	3	6	4	5	4	3	4	4	4	1	17	5
Ad				73	23	44	70	0	8	4	10	8	1	19	8	15	3	5	3	22	8	4	65	11
A1					83	50	33	2	11	8	17	12	5	22	14	17	6	6	6	24	9	4	76	12
A2						21	26	0	5	5	8	7	2	11	5	10	3	1	4	5	2	1	23	4
A3							49	0	5	2	10	5	1	15	4	13	1	3	3	18	5	2	45	11
A4								1	8	4	15	10	1	21	12	15	4	5	4	24	8	4	75	14
R								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S									1	2	1	0	2	1		2	1	0	0	2	1	0	5	3
F										1		1	2	1	1	0	1	1	2	1	1	0	3	0
Re											7	1	1	2		1	0	2	1	3	1	1	12	4
CC												0		1	0	0	3	1	1	1	1	0	8	3
Rd													1	1		1	0	0	1	0	1	0	1	0
D														5		13	1	0	1	2	2	1	20	2
FC																1	0	0	3	1	1	0	10	2
I																	2	0	0	1	3	1	30	0
In																		0	1	0	1	1	3	1
C																			0	2	3	0	5	1
A																				1	0	0	3	1
Ad																					2	2	23	3
SO																						0	8	2
Cr																							4	0
E																								9

P, Preparation ; A, Absorption ; R, Recovery ; Ad, Adaptation ; A1, Availability ; A2, Accessibility ; A3, Affordability ; A4, Acceptability ; R, Robustness ; S, Stability ; F, Flexibility ; Re, Resourcefulness ; CC, Coordination Capacity ; Rd, Redundancy ; D, Diversity ; FC, Foresight Capacity ; I, Independence ; In, Interdependence ; C, Collaboration ; A, Agility ; Ad, Adaptability ; SO, Self-Organization ; Cr, Creativity ; E, Efficiency ; Eq, Equity

Ex: 79 dans la première cellule signifie que 79% des critères sont pertinents à la fois pour la préparation et l'absorption.

2.1.2| RECHERCHES THEORIQUES - BELGES

Un certain nombre d'organismes belges se sont déjà posé la question de la transition énergétique en Wallonie en y intégrant tous les types d'énergies. A priori, aucune étude ne s'appuie exclusivement sur le 100% renouvelable à l'horizon 2050, ni ne considère le territoire belge comme autarcique.

A| TOWARD LOW ENERGY CITIES - UNIVERSITE DE LIEGE

Une étude proposant une méthodologie pour évaluer l'évolution possible de la consommation énergétique résidentielle des bâtiments, ainsi que pour simuler les effets de certaines stratégies de renouvellement urbain a été réalisée à l'université de Liège. Dans cette étude, l'utilisation d'outils de système d'information géographique urbain est combinée à un traitement statistique des critères urbains afin de développer un modèle énergétique à l'échelle de la ville. (Reiter & Marique, 2012)

L'intérêt de cette recherche se situe dans l'évaluation des consommations énergétiques résidentielles en faisant varier les exigences de performances énergétiques des bâtiments. Ses étapes sont présentées ci-dessous.

Consommations énergétiques résidentielles

Une première étape dans la détermination des consommations énergétiques résidentielles a été la définition de la typologie bâtie de la zone urbaine. Pour ce faire, de nombreux critères énergétiques du bâtiment ont été croisés selon leurs similitudes et 4 ont été choisis : date de construction du bâtiment, rénovation du bâtiment, type de bâtiment et type de logement. Les besoins en énergie des bâtiments résidentiels à l'échelle de la ville ont été calculés en ajoutant les résultats de l'analyse de la consommation d'énergie pour chaque type de maison en fonction de leur répartition dans la zone urbaine. Lorsque ces valeurs sont liées à chaque bâtiment, il est possible d'établir la consommation globale d'énergie résidentielle à l'échelle de la ville. Notons toutefois que les besoins de

refroidissement dans le secteur des bâtiments résidentiels ont été négligés car ils sont minimes en Belgique.

La deuxième étape de cette étude a été la détermination du stock de bâtiments résidentiels prévisionnel. Pour cela, une courbe de base de l'évolution du parc bâti en fonction des statistiques de son évolution a été évaluée. (Reiter & Marique, 2012)

Troisièmement, 6 scénarios d'amélioration de la consommation d'énergie des bâtiments résidentiels ont été comparés :

- [1] nouveaux bâtiments suivant la directive PEB³ sur les performances énergétique des bâtiments ;
- [2] renforcement de la politique énergétique vers le niveau passif pour les nouveaux bâtiments ;
- [3] réduction de 40% de la consommation d'énergie de l'ancien stock de bâtiments ;
- [4] rénovation de l'ancien parc immobilier pour atteindre la directive PEB ;
- [5] rénovation de tous les bâtiments existants pour atteindre la directive PEB ;
- [6] tous les bâtiments existants atteignant la directive PEB et les nouveaux bâtiments atteignent la norme passive.

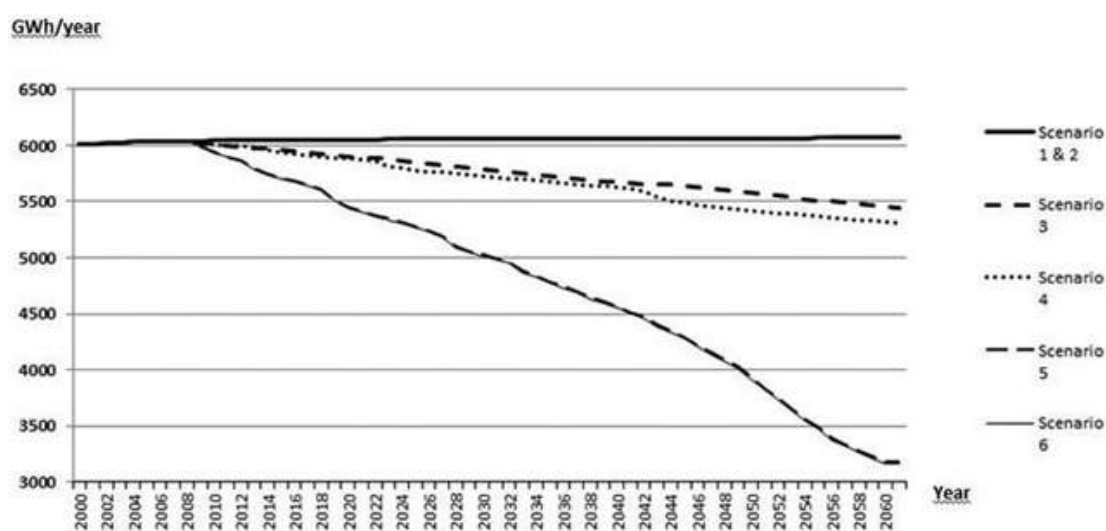


Fig. 6: Consommation d'énergie de la zone urbaine de Liège suivant les 6 scénarios de prévision (Reiter & Marique, 2012, p. 7)

L'hypothèse principale de la modélisation prévisionnelle est que la croissance urbaine est répartie équitablement entre les différents quartiers de la zone urbaine. Le taux de rénovation des bâtiments est évalué à 0,6% par an (pour la ville de Liège).

On observe Fig. 6 que les résultats des scénarios 1&2 et 5&6 sont relativement similaires entre eux. La faible diminution des scénarios 1&2, et l'écart avec les scénarios 5&6 montrent qu'il n'est pas possible d'assurer une réduction significative de la consommation d'énergie à l'échelle de la ville en appliquant uniquement des politiques énergétiques pour les nouveaux bâtiments. (Marique & Reiter, 2012)

Cette étude montre que les objectifs en matière de changement climatique sont impossibles à atteindre sans une augmentation stratégique de la rénovation des logements existants. Elle permet également de réduire le champ des stratégies à développer dans ce domaine, tout en donnant une manière stable et durable de calculer les consommations énergétiques résidentielles.

³ En 2012 : la consommation d'énergie du bâtiment ne doit pas dépasser 115 kWh/m².an

B| RENOVATION ENERGETIQUE DES ILOTS - UNIVERSITE DE LIEGE

L'état qui suit se base sur un travail de fin d'études réalisé par Marine Penders (2013). Le sujet traite de l'intégration des énergies renouvelables dans le but de tendre vers l'objectif zéro-énergie à l'échelle d'un ilot.

Deux typologies d'ilots résidentiels sont étudiées afin de mettre en évidence les divergences qui existent dans la stratégie à adopter. Le choix se porte vers un ilot 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 en opposition, vers un ilot situé en périphérie, qui diffère par sa morphologie du bâti, sa faible densité bâtie, sa mono fonctionnalité, et sa plus faible accessibilité aux transports en commun. Ces ilots sont appelés respectivement "ilot urbain" et "ilot périurbain".

Les stratégies à adopter diffèrent d'un ilot à l'autre, en fonction des différents paramètres qui régissent les consommations énergétiques et les potentiels en énergie renouvelable.

Dans cette étude, le parti est pris de réhabiliter le parc immobilier des ilots avant toute formulation de scénarios. La rénovation se concentre sur l'augmentation des performances de l'enveloppe des bâtiments et de leurs installations énergétiques. Les hypothèses de rénovation s'effectuent à 4 stades de demande nette en énergie pour le chauffage : 1/respectant les critères de la PEB (PEB) ; 2/déterminés par le standard basse énergie (BE) ; 3/ déterminés par le standard très basse énergie (TBE) ; 4/déterminés par le standard passif (P). Ensuite pour chaque cas de rénovation étudié (PEB, BE, TBE ou P), différents systèmes énergétiques sont envisagés de façon à répondre aux besoins.

Ce travail de fin d'étude va servir de base à l'élaboration de scénarios de production d'énergie en prenant en compte le réseau de distribution d'énergie et les 2 échelles d'urbanisation du territoire (milieu urbain et milieu périurbain).

Les réseaux de distribution d'énergie

Il est observé dans cette étude que bien qu'il ne soit pas envisageable d'exclure un réseau de distribution électrique à l'échelle urbaine, les pertes thermiques induites par un réseau de chaleur participent à atténuer les bénéfices de la centralisation de la production de chaleur à l'échelle urbaine.

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. (Penders, 2013, p. 22)

En effet, le transport d'énergie au sein d'un réseau entraînent des déperditions de l'énergie acheminée vers les bâtiments, fonction de la longueur et de la dimension des canalisations, et de la température de fonctionnement. Ces déperditions sont donc beaucoup plus conséquentes à l'échelle d'un territoire pour lequel les longueurs de canalisations sont plus importantes par exemple. Sans oublier le coût d'investissement non négligeable dû aux importants travaux engendrés lors de l'implantation d'un réseau de chaleur.

Systèmes énergétiques à utiliser

Dans cette recherche (Penders, 2013), les critères qui influencent les performances des énergies renouvelables sont étudiés, ainsi que les freins à leur pleine exploitation (plus particulièrement en région Wallonne). Avec ces informations, l'échelle de production et le milieu urbain du système de production sont envisagés.

Le tableau ci-dessous résume ces informations suivant les différents systèmes de production d'énergie.

Tableau 2:Récapitulatif des systèmes de production à l'échelle d'un ilot (Penders, 2013)

	Energie du bâtiment		
	Production d'électricité	Production de chaleur	Production de chaleur et de froid
Energie éolienne	Petite éolienne (<100kW)		
Energie solaire	Panneau photovoltaïque		
		Capteur solaire thermique	
Biomasse		Combustion du bois	
			Bois énergie ou Huile végétale
Géothermie		Géothermie "basse énergie"	
Pompes à chaleur		Chaleur du sol	
		Chaleur de l'air	
Milieu urbain Production centralisée favorable			Milieu périurbain Production centralisée favorable
Milieu urbain Production décentralisée favorable			Milieu urbain & périurbain Production centralisée favorable
Milieu urbain Production décentralisée favorable			Milieu urbain & périurbain Production décentralisée favorable

C| ZERO-ENERGY AT THE NEIGHBOURHOOD SCALE - UNIVERSITE DE LIEGE

Dans le cadre d'une recherche réalisée par Marique & Reiter (2014) sur le concept de "bâtiment à énergie zéro" à l'échelle d'un quartier en tenant compte de deux défis principaux qui sont l'impact de la forme urbaine sur les besoins énergétiques et la production sur site d'énergie renouvelable, et l'impact de l'emplacement du quartier sur la consommation d'énergie de transport, il est expliqué que la performance énergétique des bâtiments est devenue au fil du temps objet de conscientisation de la part des responsables politiques, des parties prenantes et même des citoyens. Notamment du fait de l'adoption de la directive européenne qui a pour objectif principal d'établir des normes minimales pour la performance énergétique des bâtiments neufs et des bâtiments existants de plus de 1 000 [m²] soumis à d'importantes rénovations. En conséquence, de nouveaux standards de construction et de rénovation (basses énergies, maisons passives, zéro-énergie) ont été développés pour réduire considérablement la consommation d'énergie des bâtiments neufs et rénovés et les émissions de gaz à effet de serre associées.

Selon les chercheuses de cette étude, les défis liés aux sites à énergie zéro s'articulent autour de 3 axes :

- [1] l'adaptation et la réhabilitation du parc immobilier existant (tout en tenant compte de la difficulté à arriver au zéro-énergie qui augmente lorsque la performance énergétique initiale est plus faible) en complément de nombreuses études portant sur la production de nouveaux bâtiments optimisés.

L'étude et la comparaison des bilans énergétiques annuels de deux archétypes communs de quartiers belges (urbain et périurbain) montrent que, bien que chaque forme urbaine nécessite des solutions personnalisées en matière d'efficacité

énergétique dans les secteurs du bâtiment et des transports, la demande d'énergie doit être réduite en utilisant des mesures d'efficacité énergétique telles qu'une réhabilitation majeure de l'enveloppe des bâtiments pour atteindre un bilan énergétique quasi nul (qZE) à l'échelle du quartier. Le résultat doit satisfaire aux normes basses énergie, passives ou zéro-énergie ;

- [2] les impacts des paramètres liés à la forme urbaine sur le choix et l'efficacité des sources d'énergie renouvelables sur site (panneaux photovoltaïques, panneaux solaires thermiques et éoliennes) ;
- [3] l'impact de la localisation des résidences, des lieux de travail et des services sur les habitudes de mobilité quotidienne. Et la corrélation entre consommation d'énergie des bâtiments et mobilité quotidienne.

Les résultats montrent que l'objectif qZE nécessite la minimisation des besoins énergétiques pour la mobilité quotidienne, même dans les zones urbaines.

L'intérêt de cet article porte sur l'étude de la faisabilité d'un objectif quartier-zéro-énergie dans un cadre simplifié incluant la consommation d'énergie du bâtiment, la production d'énergie sur-site, et l'impact de la forme urbaine. Cette étude permet de mettre en évidence différentes solutions à mettre en place lors de l'élaboration de scénarios prospectifs de consommation ou production d'énergie dans une optique architecturale et urbaine durable.

D| ETUDE DE PROSPECTIVE DE TRANSITION ENERGETIQUE - IWEPS

Dans une étude de prospective de transition énergétique réalisée pour l'Institut Wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique (IWEPS), il est mis en exergue certaines faiblesses ou menaces qui pourraient survenir suite à un scénario de transition énergétique. Ces points sont à prendre en considération lors de l'élaboration d'une stratégie de transition énergétique qui se veut durable.(Boulanger et al., 2015)

Les divers scénarios s'articulent principalement autour du développement des infrastructures de production d'énergie, à un moment où les coopératives sous-territoriales, ou les petites institutions n'ont pas une taille suffisante pour réaliser des investissements d'intérêt local et n'ont pas la capacité de fournir un effort financier nécessaire. On retrouve parmi ces défaillances les risques liés :

La sécurité d'approvisionnement

- à la gestion de l'intermittence des sources renouvelables impliquent d'importer de l'électricité et de la biomasse, dont la durabilité doit être garantie ;

La participation démocratique

- à l'augmentation importante du phénomène NIMBY ("not in my back yard") ;
- à la difficulté à adopter une politique d'aménagement du territoire cohérente, ainsi que le développement anarchique de certains territoires ;

La protection environnementale

- au développement des sources d'énergie décentralisées (éolien, photovoltaïque, biomasse) qui amène de fortes pressions foncières, tant dans les communes rurales qu'urbaines. Ces pressions enchérissent le foncier rural, provoquent la fuite des cultures alimentaires et favorisent un exode des campagnes vers les zones urbanisées. On note ainsi les effets négatifs sur l'environnement rural de l'accaparement des sols et de l'augmentation des cultures agro-énergétiques intensives. Tandis que l'on examine la tendance à l'étalement urbain inversé comme un point positif ;
- au développement incohérent du territoire. La problématique de l'accès au réseau dans les zones moins favorisées entraîne un moins grand niveau de confort énergétique et un niveau de stress important ;

La viabilité économique / Cohésion sociale

- à un coût de transition énergétique plus élevé que prévu. L'intervention gouvernemental (subsidés, répression, infrastructure, urbanisme) est supportée par le territoire seul, ce qui impacte fortement les finances publiques ;
- Le territoire est isolé et ne parvient pas à financer suffisamment l'innovation et la recherche de solutions technologiques.

Ces différentes remarques vont être intégrées de manière diverse dans cette stratégie de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome et dans la caractérisation des qualités de sa durabilité, les 4A (availability, accessibility, affordability et acceptability) définis par après §3.5]. Notamment la crainte d'approvisionnement intégrée aux critères d'availability, la protection de l'environnement assimilée dans les critères d'accessibility et d'acceptability, la peur d'un manque de participation citoyenne intégrée à la notion d'acceptability, et la crainte de rentabilité économique de cohésion sociale se répondant dans le critère d'affordability.

E| BUREAU FEDERAL DU PLAN

De nombreux scénarios prospectifs de consommation énergétiques intégrant totalement ou quasiment les énergies renouvelables en tant que sources de production ont déjà été développés auparavant. Le bureau fédéral du plan (BFP), dont l'une des principales missions est d'aider les décideurs à anticiper les évolutions futures de l'économie belge, en a développé sur le territoire belge. (Devogelaer & Gusbin, 2017)

Le scénario dit de référence décrit l'évolution à politique inchangée du système énergétique et des émissions de gaz à effet de serre de la Belgique d'ici 2050. Une période aussi longue permet de s'inscrire dans les initiatives européennes afin d'assurer la transition vers une énergie propre ou une société bas carbone en 2050. Elle s'explique aussi par le fait que, à l'instar de l'industrie et des bâtiments, le secteur énergétique présente des cycles d'investissement très longs.

Hypothèses et cadre politique

Les principales hypothèses et le cadre politique retenus pour élaborer le scénario de référence sont rassemblés en 5 volets :

- [1] Macroéconomique : l'activité économique (revenu des ménages, etc.) constitue un déterminant clé de la demande future d'énergie. Elle est décrite par le produit intérieur brut (PIB) et ses composantes.
- [2] Prix internationaux des combustibles fossiles : les prix des énergies fossiles constituent également un facteur important dès lors qu'ils influencent la quantité et le type d'énergie consommée.
- [3] Les politiques et mesures : le scénario de référence tient compte des politiques et mesures adoptées en Belgique et au niveau européen jusqu'à la fin 2014 :
 - politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) relative à la directive ETS (Emission Trading System). Le système européen d'échange de quotas d'émission est une pièce importante de la politique de l'Union Européenne pour réduire les émissions de GES des secteurs dits ETS qui regroupent principalement la production électrique, les industries grandes consommatrices d'énergie et le transport aérien ;
 - politique de développement des sources d'énergie renouvelables. Le scénario de référence table sur la réalisation de l'objectif belge d'arriver à une part des SER dans la consommation finale brute d'énergie de 13 % en 2020 (cf. directive 2009/28/CE) ;
 - politique de démission progressive des centrales nucléaires pour la production électrique ;

- contrainte relative aux centrales au charbon. Dans le modèle aucun investissement dans de nouvelles centrales de ce type n'est possible d'ici 2050 ;
 - mesures pour l'éolien offshore. Dans un contexte belge, un potentiel maximum de 2,3 GW a été considéré en 2020. Ce potentiel correspond à la capacité qui pourra être installée sur les concessions domaniales à ce jour attribuées en mer du Nord. À plus long terme et dans un contexte de transition énergétique, des ambitions jusqu'à 4 GW ont été évoquées dans le cadre des travaux de la "North Seas Countries Offshore Grid Initiative".
- [4] Démographique : la population et le nombre de ménages ont un impact direct sur la consommation d'énergie du secteur résidentiel, car ils déterminent le nombre d'appareils ménagers et la superficie habitée totale devant être chauffée et éclairée. Le Tableau 3 reprend un certain nombre d'indicateurs démographique qui servent de base aux projections énergétiques du scénario de référence. Il présente tant les valeurs absolues que les taux de croissance annuels. Suite à la part croissante des ménages d'une personne, le nombre de ménages privés augmente plus vite que la population (0,5 % par an en moyenne entre 2015 et 2050). La taille moyenne des ménages en Belgique diminue donc (2,21 personnes par ménage en 2050 comparé à 2,32 en 2015).

Tableau 3: Hypothèses démographiques pour la Belgique (Devogelaer & Gusbin, 2017)

				Taux de croissance annuel moyen [%]		
	2015	2030	2050	2015/30	2030/50	2015/50
Population [x10⁶]	11,2	12	12,7	0,4	0,3	0,4
Nombre de ménages [x10⁶]	4,8	5,3	5,8	0,6	0,5	0,5
Taille moyenne d'un ménage [personne/ménage]	2,32	2,27	2,21	-0,1	-0,2	-0,1

- [5] Hypothèses de nature technicoéconomique :
- le parc électrique belge de départ est celui de 2015 ;
 - les degrés-jours donnent une image du profil moyen des besoins en chauffage d'un bâtiment. Ils reflètent ainsi les conditions climatiques susceptibles d'avoir une influence considérable sur la consommation d'énergie.

Résultats liés à la production d'électricité

Selon les chercheurs du BFP (Devogelaer & Gusbin, 2017), la production nette d'électricité est régie par les exigences, les réglementations et les politiques mises en place. Cependant, 2 facteurs mutuellement liés axent l'évolution de la capacité de production : le caractère intermittent d'une partie des SER, et les exigences en termes de sécurité d'approvisionnement de la production électrique.

Le 1^{er} facteur s'explique par le fait qu'une partie de la capacité renouvelable à installer est intermittente ou variable, car elle dépend des conditions météorologiques et non de la demande. Cela provoque que la demande soit couverte même si le soleil ne luit pas ou que le vent ne souffle pas. Dès lors, il faut pouvoir compter sur une capacité additionnelle en plus de la capacité offerte par les sources variables. Des centrales de "back-up" doivent donc être prévues dans le système. Et vu que cette capacité de back-up n'est pas opérationnelle en permanence, il en résulte une pression à la baisse sur le taux d'utilisation du parc de production, qui se réduit de nouveau.

Un 2^{ème} facteur s'explique par le fait que le système doit toujours être en mesure de couvrir la charge de pointe. Cela signifie qu'une capacité suffisante doit être disponible lors du pic de consommation électrique (habituellement pendant l'hiver vers 18-19h) et que cette capacité doit être fiable et sûre. Vu que ce pic est atteint après le coucher du soleil, le solaire photovoltaïque n'est pas opérationnel. Et même s'il est probable que l'éolien soit disponible, la disponibilité de l'ensemble du parc éolien ne peut être considérée comme

totallement assurée dans les calculs. Par ailleurs, les centrales nécessitent des entretiens, de même que des pannes imprévues peuvent survenir. De ce fait, il faut développer une capacité supplémentaire permettant d'assurer la couverture de la charge de pointe. La nécessité de disposer d'une certaine capacité fiable disponible vient augmenter la capacité totale installée et explique le rythme de croissance plus élevé de la capacité par rapport à la production électrique.

Résultats liés à la consommation finale d'énergie

Un premier constat posé dans cette étude du BFP (Devogelaer & Gusbin, 2017) est que la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiel et tertiaire est particulièrement sensible aux températures extérieures. Cette dépendance est perceptible pour les années historiques où les consommations réelles sont rapportées Fig. 7. Ainsi, 2010 a été une année particulièrement froide, caractérisée par une consommation énergétique élevée.

À l'inverse, 2015 a été une année plutôt chaude. Elle présente un niveau de consommation énergétique bien inférieur à celui des années précédentes. Le chauffage des bâtiments représentant $\approx 3/4$ de la consommation énergétique de ces secteurs.

Un deuxième constat est que l'accroissement de la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel est proportionnel au nombre sans cesse croissant d'appareils électriques par ménage et à l'augmentation du nombre de ménages.

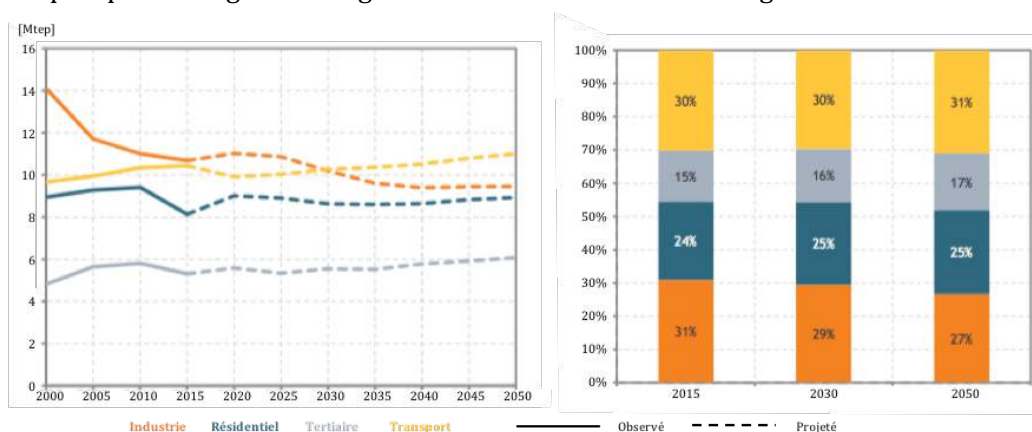


Fig. 7: Consommation finale d'énergie par secteur du BFP, [sources: Eurostat 2015 & PRIMES], (Devogelaer & Gusbin, 2017)

Conclusion

Par conséquent, ce scénario de référence constitue un point de repère pour évaluer d'autres scénarios qui permettent de déterminer l'impact quantitatif d'objectifs énergétiques à long terme⁴. Dans le contexte de ce travail de stratégie à l'échelle d'un territoire, les hypothèses démographique et technicoéconomiques vont pouvoir être intégrées. Les hypothèses et exigences politiques sont inhérentes au projet de par la volonté d'utilisation de ressources 100% renouvelables. Les résultats liés à la consommation et la production d'énergie vont permettre de définir les différentes variables du modèle à développer dans ce travail.

⁴ Cette caractéristique du scénario de référence a été valorisée par la commission européenne dans l'évaluation des impacts de différentes mesures proposées dans le paquet pour une énergie propre.

2.1.3| EXERCICES PRATIQUES

A| L'ILE DE LA REUNION - FRANCE

L'île de la Réunion, département français de l'océan Indien compte une population d'un peu plus de 877 000 habitants pour une superficie de 2 512 km². Depuis 2000 les politiques réunionnaises investissent dans les énergies renouvelables, la Réunion disposant de ressources énergétiques renouvelables abondantes. L'île a programmé une autonomie énergétique en plusieurs étapes : en 2020 une autonomie électrique partielle avec 60% d'électricité renouvelable, en 2025 une autonomie électrique totale, et en 2030 une autonomie énergétique quasi totale sur l'électricité et les transports. (Ernst & Hege, 2012).

Malgré sa superficie peu étendue, l'île de la Réunion se présente comme un lieu idéal pour générer recherche et innovation dans le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie. En effet, elle présente des problématiques énergétiques complexes qui se retrouvent dans de nombreux territoires du monde telles que :

- la présence de nombreux acteurs de la production ;
- un nombre important de consommateurs répartis de façon non homogène ;
- un grand nombre de microclimats différents ;
- ses sources d'énergie de différents types.

La Réunion s'est ainsi dotée de deux fermes éoliennes, d'un grand parc photovoltaïque, et d'une installation de biogaz de décharge. A ce jour, selon les politiques françaises, l'île de la Réunion est un exemple de territoire autonome en énergie. (Praene et al., 2012)

Une méthode de modélisation de l'aménagement énergétique d'un territoire, orientée par des systèmes multi-agents a été proposée par des chercheurs réunionnais.

Elle consiste à mettre en place plusieurs dynamiques visant l'intégration de la gestion des flux d'énergie. Les agents producteurs et consommateurs étant géo localisés. (Gangat et al., 2009)

La méthodologie présentée dans cette étude va permettre de servir de base à la détermination d'une stratégie de transition énergétique suivant les scénarios prospectifs de consommation et de production d'énergie, et les critères d'availability, d'accessibility, d'affordability et d'acceptability.

Dynamique de production

Cette dynamique se construit sur base de caractères cognitifs qui sont localisés sur les centres de productions d'énergie tels que :

- le type et la modularité de la production d'énergie ;
- la capacité de production suivant la période ;
- l'impact des contraintes météorologiques ;
- le coût de la production (autant le coût économique que le coût CO₂).

Dynamique de population

La mise en place d'une dynamique d'évolution de la population repose sur les interactions d'une grande quantité d'usagers qui évolueraient selon un modèle comportemental spécifique :

- l'évolution de la population dans le temps ;
- le type d'activité (tertiaire, particulier et industriel) ;
- le niveau de satisfaction des usagers selon des critères de confort thermique, de coût, d'empreinte écologique, etc.

Dynamique de mode d'occupation du sol (MOS)

L'île est découpée en parcelles sur lesquelles les agents consommateurs et producteurs sont géo localisés. Cette dynamique a pour moteur trois agents qui ont une vision à l'échelle macroscopique de l'environnement :

- l'agent naturel dont l'objectif est d'obtenir une surface d'espaces naturels à conserver sur l'île ;
- l'agent agricole dont l'objectif est d'atteindre une surface de terre agricole donnée ;
- l'agent urbain dont l'objectif est d'assurer l'étalement urbain nécessaire à l'installation de la nouvelle population.

Les dynamiques de population et de MOS coexistent ensemble, non causalement l'une envers l'autre, mais en inter-influence l'une de l'autre.

B | LE MENE, BRETAGNE – FRANCE

La communauté de communes (CdC) de Le Mené, pionnière en autonomie énergétique française, s'est lancée en 2004 le défi de couvrir la totalité de ses besoins en électricité, chauffage et transport grâce aux énergies renouvelables. L'objectif étant l'autonomie énergétique complète pour la mobilité des habitants, et le chauffage et l'électricité des bâtiments (en prenant en compte les constructions résidentielles, tertiaires et industrielles) situés sur le territoire. A l'époque, la CdC de Le Mené est composé de sept communes réparties sur une superficie de 163,2 km² et compte 6500 habitants. (Ernst & Hege, 2012)

Sur base de cette initiative, des chercheurs ont réalisé une étude de cas traitant de la portée des mécanismes mis en œuvre à Le Mené, de l'organisation sociale derrière le développement de ce projet de transition énergétique et de la capacité à utiliser la production d'énergie en tant que "ressource sociale". La question de recherche principale décrite dans l'article étant : comment une initiative locale axée sur l'énergie apparaît-elle? (Yalçın-Riollet et al., 2014)

« L'indépendance énergétique de la Bretagne est l'une des plus faibles de France avec moins de 7% de production locale. L'éloignement géographique des installations de production d'électricité en Bretagne impose des contraintes importantes sur le réseau de transport d'électricité et rend la zone vulnérable en termes d'approvisionnement. Dans cette région, le mouvement séparatiste est né lors de la lutte contre la production d'électricité centralisée et les usines locales (entre autres). Mis à part ce contexte régional, des problématiques spécifiques au territoire et non directement liées à l'énergie ont conduit à l'émergence d'initiatives liées à l'énergie. [...] Le plus important dans ce cas est la combinaison dense de politiques et de projets qui ont parfois déjà été mis en œuvre dans d'autres territoires français, mais de façon fragmentaire. L'innovation est le fruit de l'émergence d'un système sociotechnique hybride, qui est un ensemble de mécanismes complémentaires et d'acteurs divers et multi-positionnés, qui évoluent ensemble, développent une identité commune et un langage commun. »
traduit de (Yalçın-Riollet et al., 2014)

Selon ce même article, le système hybride développé à Le Mené s'appuie sur 5 cibles à atteindre afin de construire une transition énergétique pragmatique : conserver une relation avec l'histoire ; entretenir une relation avec les politiques ; favoriser l'argument économique plutôt qu'écologique ; parvenir à l'autosuffisance du territoire ; et maintenir une relation avec le marché d'import/export d'énergie.

Cette initiative énergétique portée par les acteurs locaux est une forme de transition sociotechnique. Ce sont les besoins et le contexte qui ont modelé au fur et à mesure la stratégie de transition énergétique. La multiplicité et la diversité des acteurs locaux impliqués rendent ce cas très intéressant. On se rend compte que pour mener à bien une transition énergétique efficace, il ne faut pas négliger le caractère social, voir participatif de la démarche qui amène à une acceptation plus aisée des changements qui s'installent.

CHAPITRE 3| METHODOLOGIE



3.1| BILAN DE L'ETAT DE L'ART

Sur base de la revue de la littérature présentée ci-avant, on ressort que dans une optique de développement durable et de résilience urbaine, une stratégie de transition énergétique doit prendre en considération des facteurs liés à l'économie énergétique et monétaire, l'environnement, et la société.

Les défis attachés à la transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome s'articulent autour de la **réhabilitation du parc immobilier** existant ; et la **transformation du parc énergétique** du territoire par l'intégration des paramètres associés à la **morphologie urbaine**, au **type de production d'énergie**, et à la **modularité de la production des SER**. (Marique & Reiter, 2014), (Gangat et al., 2009)

On a de plus observé que les paramètres **démographiques** et **climatiques** ont un impact notable sur l'évolution de la consommation/production énergétique belge. Et que la politique de développement des sources d'énergie renouvelables (SER) liée à la **part des SER** dans le bilan global a une influence considérable sur l'évolution du système de production d'énergie. (Devogelaer & Gusbin, 2017)

Tout en gardant à l'esprit qu'il faut éviter les risques liés à la **sécurité d'approvisionnement**, la **non-participation** citoyenne, et la détérioration de **l'environnement** (Boulanger et al., 2015), une stratégie de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome se doit dès lors d'inclure ces différents facteurs par l'intégration **des quatre critères de résilience urbaine** (l'availability, l'accessibility, l'affordability, et l'acceptability), dits les 4A.

Plus particulièrement, en ce qui concerne les performances énergétiques des bâtiments, les études ont démontré qu'il n'est pas possible de garantir une réduction significative de la consommation d'énergie sans **augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments** à rénover. (Reiter & Marique, 2012).

METHODOLOGIE DE TRANSITION VERS UN TERRITOIRE-QUASI-ZERO-ENERGIE AUTONOME

La méthodologie de transition vers un TqZEA proposée dans le cadre de cette étude part donc de l'analyse de la demande d'énergie du territoire pour laquelle des efforts de réduction sont effectués par le biais d'outils d'efficacité énergétique innovants, et par l'encouragement des comportements individuels et collectifs tendant à la sobriété énergétique. Après avoir agi sur la consommation d'énergie, le modèle se concentre sur le développement de systèmes de production d'énergie sur le lieu de consommation, afin de créer des dispositions permettant de se rapprocher d'un équilibre production/consommation.

La méthodologie est basée sur une approche d'analyse en 16 sous-étapes, regroupées en 4 grandes, reprises ci-dessous.

Caractérisation du territoire quasi-zéro-énergie autonome

- |1| Etablir la période et le cycle d'équilibre ;
- |2| Délimiter le territoire ;
- |3| Déterminer le type d'utilisation de l'énergie incluse dans le bilan ;

Modélisation des scénarios de consommation – réhabilitation du parc immobilier

- |4| Définir différents niveaux de consommations spécifiques en énergie finale des bâtiments et les scénarios de réhabilitation du parc immobilier qui s'y rapportent ;
- |5| Estimer l'impact du climat (degrés-jours) sur les consommations des bâtiments ;
- |6| Evaluer l'évolution prospective de la population et des ménages ;

- |7| Déterminer le potentiel de réduction de la consommation d'énergie prévue à la fin du cycle de transition ;
- |8| Définir les besoins énergétiques du territoire (avec scénarios de réduction de consommation énergétique) ;
- |9| Quantifier les taux de renouvellement nécessaires à l'approche future des exigences de consommation d'énergie du bâtiment ;
- |10| Faire une première comparaison des scénarios de réhabilitation du parc immobilier suivant les critères des 4A afin d'éliminer les scénarios qui n'y répondent pas de manière efficace ;

Modélisation des scénarios de production – transformation de parc énergétique

- |11| Lister les SER acceptées vis-à-vis du réseau de distribution d'énergie et du mode d'approvisionnement en énergie, et élaborer divers mixes énergétiques associés à différents scénarios de transformation du parc énergétique ;
- |12| Estimer le facteur moyen de perte d'énergie due au réseau de distribution ;
- |13| Définir les performances des systèmes de production d'énergie choisis , et si besoin, déterminer le degré d'urbanisation du territoire;
- |14| Quantifier les performances des SER existantes pour le territoire ;
- |15| Quantifier le taux de production nécessaire à l'approche future des exigences d'un territoire-zéro-énergie-autonome ;

Comparaison des solutions de consommation + production

- |16| Comparer les différents résultats liés aux scénarios de consommation/production afin d'établir un classement de ceux-ci vis-à-vis des critères des 4A

La méthodologie développée aide à choisir l'intégration des flux d'énergie et de ressources, en fonction des besoins du territoire, de ses ressources et des technologies applicables.

Les sections qui suivent s'appliquent à développer les quatre grandes étapes de la méthodologie de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome, que sont la caractérisation du terme "Territoire-quasi-zéro-énergie autonome", la modélisation de scénarios de consommation et de production d'énergie, ainsi que l'introduction des indicateurs permettant d'évaluer le territoire suivant les critères des 4A.

3.2| CARACTERISATION DU « TERRITOIRE-QUASI-ZERO-ENERGIE AUTONOME »

Ce chapitre de description s'applique à poser des hypothèses et des limites à la définition d'un « Territoire-quasi-zéro-énergie autonome » tout en se positionnant par rapport aux recherches existantes, énoncées lors de l'état de l'art.

Pour avancer dans l'élaboration d'une définition d'un territoire-quasi-zéro-énergie autonome, plusieurs hypothèses invariables aux différents scénarios prospectifs sont à préciser. Ces principes, développés dans cette section, touchent à l'établissement d'une période d'équilibre énergétique et d'une frontière au territoire, ainsi qu'à la restriction des énergies incluses dans le bilan énergétique. (Marszal et al., 2011)

3.2.1| PERIODE D'EQUILIBRE ENERGETIQUE

Les bilans énergétiques dont disposent les divers états mettent à disposition des données objectives sur la production et la consommation d'énergie. Ces bilans ont pour vocation d'alimenter les rapports sollicités dans le cadre des directives européennes et internationales ainsi qu'enrichir les tableaux de bord de l'environnement, les travaux de prospective et les indicateurs d'efficacité énergétique. Ils s'étendent généralement sur une durée de 6 mois ou 1 an. Cependant l'équilibre production/consommation sur un territoire est rarement réaliste semestriellement en climats saisonniers.

La période d'équilibre (p) d'un territoire-zéro-énergie couvre ainsi un intervalle de 12 mois consécutifs pour toutes les mesures d'énergie.

ETENDUE

Les systèmes de production se situent sur des échelles de temps allant de quelques années pour ceux qui représentent les investissements les plus faibles, à deux ou trois décennies pour les systèmes s'appuyant sur des réseaux enterrés. Et la seule réalisation de leur aménagement peut s'étendre sur plusieurs années. On peut donc évaluer la durée de vie d'une opération d'aménagement à 30, voire davantage.

L'étude se déroulera ainsi sur un cycle (c) de 32 ans.

3.2.2| LIMITES PHYSIQUES DU SITE

La limite du site marque la limite de zone à travers laquelle l'énergie consommée et l'énergie produite sont mesurées.

La notion de subdivision territoriale cache souvent des enjeux de taille et sa mise en œuvre politique s'avère ordinairement complexe. Cependant que ce soit cohérent ou pas, l'histoire, les jeux de pouvoir ou de simples logiques administratives peuvent dicter le tracé de cette subdivision. (George & Verger, 2013)

La limite physique du site considérée dans cette caractérisation est la **frontière administrative** qui le délimite. C'est un critère pertinent lié intrinsèquement à la politique mise en place. Le territoire peut ainsi être circonscrit dans le but de faciliter son administration et sa gestion. De plus les subdivisions administratives forment le plus souvent des maillages juxtaposés à l'intérieur du territoire de l'État, on réduit des lors le risque de superposition des solutions énergétiques à favoriser dans le cas d'une analyse globale de l'état en étudiant chaque subdivision individuellement.

Dans le cadre de ce mémoire, la frontière administrative sur laquelle on travaille est celle de la Région Wallonne.

3.2.3| DEFINITION D'UN TERRITOIRE-QUASI-ZERO-ENERGIE AUTONOME

Différents qualificatifs correspondant à des normes précises peuvent s'appliquer pour définir les performances énergétiques d'une entité-zéro-énergie.

La notion d'entité-zéro-énergie (ZE) ou quasi-zéro-énergie (qZE) a été lancée par la Commission européenne. Le terme désignant une entité qui produit l'énergie nécessaire à sa propre consommation (via des panneaux solaires, une pompe à chaleur, etc.). La quantité d'énergie nécessaire provient de sources d'énergie renouvelable et est produite sur place ou à proximité. Chaque pays est libre de définir ses propres normes qZE : la quantité d'énergie que peut utiliser l'entité, les sources d'énergie renouvelable admises, et la proximité à laquelle cette énergie doit être produite. (Torcellini et al., 2006)

Cependant, bien qu'il existe des définitions pour les notions de villes-zéro-énergie, ou d'îles-zéro-énergie, la définition de territoire-zéro-énergie est à proprement parlé inexistante. Le regroupement des diverses hypothèses, définitions, thématiques et problématiques liées à l'énergie urbaine va permettre d'établir une définition personnelle du territoire-quasi-zéro-énergie, proposée ci-après.

Suivant le degré d'exigence souhaité, la notion de territoire-quasi-zéro-énergie va évoluer.

Un territoire-quasi-zéro-énergie (TqZE) est un territoire résilient qui répond conjointement aux critères d'availability, d'accessibility, d'affordability et d'acceptability durant l'entièreté de son cycle d'étude ; pour faire face aux demandes annuelles d'énergie du territoire.

Dans le cas le plus favorable, on définit un territoire-zéro-énergie (TZE) par un territoire résilient pour lequel existe un équilibre entre sa consommation et sa production d'énergie renouvelable alors qu'il répond conjointement aux critères d'availability, d'accessibility, d'affordability et d'acceptability durant son cycle d'étude ; pour faire face aux demandes annuelles d'énergie du territoire. D'un point de vue énergétique, l'énergie consommée est inférieure ou égale à l'énergie renouvelable transportée annuellement vers le réseau du territoire.

Le respect des critères des 4A suppose la résilience énergétique et la durabilité du territoire. On présume dès lors, qu'à plus long terme (sur un cycle plus long), l'exigence énergétique du territoire-zéro-énergie sera respectée.

Transfert d'énergie

Le caractère autonome du territoire est quant à lui lié au transfert d'énergie autorisé. En matière d'énergie, un aménagement ne se conçoit pas coupé de son environnement, il est lié aux territoires qui l'entourent. Cela signifie que le développement des énergies renouvelables sur une zone urbaine ne se limite pas à la production et la consommation d'énergie à l'intérieur de cette zone. Mais s'intéresse à l'énergie produite et consommée à l'intérieur du territoire ; l'énergie produite à l'extérieur et consommée à l'intérieur de la zone ; et l'énergie produite à l'intérieur et consommée à l'extérieur du territoire.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, bien que l'on admette que les échanges d'énergie aux frontières du territoire ne devraient pas être interdits, l'étude de transition énergétique va se limiter à un territoire-quasi-zéro-énergie autonome afin de simplifier la méthode de calcul. On introduit donc la notion d'autonomie à la définition d'un TqZE.

Ainsi un territoire-quasi-zéro-énergie autonome est un territoire résilient qui répond conjointement aux critères d'availability, d'accessibility, d'affordability et d'acceptability durant l'entièreté de son cycle d'étude ; pour faire face aux demandes annuelles d'énergie du territoire. Et pour lequel l'énergie renouvelable produite ne provient que de sources d'énergie se trouvant à l'intérieur du territoire. A aucun moment le territoire n'exploite une source d'énergie extérieure.

L'autonomie engendre une indépendance totale du territoire vis-à-vis de l'extérieur. L'avantage est que si le territoire surproduit, il pourra stocker le surplus ou le revendre vers l'extérieur. Inversement, l'inconvénient de cette condition est que si le territoire sous-produit, il n'aura pas d'aide provenant de l'extérieur pour permettre l'équilibrage entre sa consommation et sa production d'énergie renouvelable.

Type d'utilisation de l'énergie incluse dans le bilan

A la restriction des transferts d'énergie considérés, on ajoute une restriction aux secteurs d'activités dans lesquels l'énergie demandée sera utilisée. En tant qu'acteur dans le domaine de la construction et des équipements de l'édifice, le champ d'intervention couvert dans ce travail s'axe principalement sur l'énergie du bâtiment résidentiel et tertiaire, pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation, l'éclairage, l'éventuelle climatisation et les auxiliaires. Bien que la stratégie de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome proposée dans cette étude puisse s'appliquer en considérant la demande finale totale d'énergie du territoire (industrie, transport, agriculture, tertiaire et résidentiel), on fait le choix de ne se concentrer que sur la demande d'énergie du bâtiment résidentiel et tertiaire.

Comme on l'observe Fig. 8, dans le domaine de la production d'énergie, l'accent est mis sur la quantité d'énergie nette (énergie sur-Site), que l'on devrait produire chaque année pour faire face aux demandes annuelles d'énergie. Comme défini dans le glossaire présenté ci-après, les sources d'énergie exploitée sur-site pour la production proviendront de ressources renouvelables. Afin de pouvoir comparer les données de façon pertinente, les valeurs d'énergie nette seront transformées en énergie finale par l'intégration des pertes et conversions du système dues au réseau de transport.

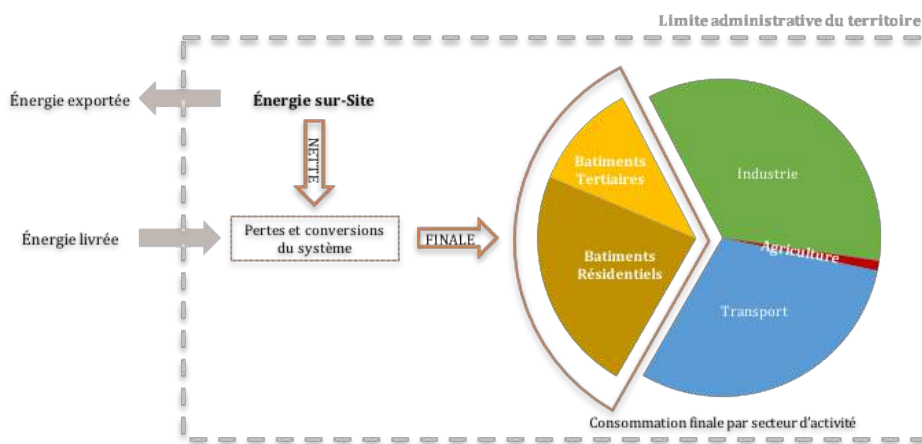


Fig. 8: Limite du site, transfert d'énergie et type d'utilisation d'énergie incluse dans le bilan

DEFINITION UTILISEE IN SITU

Subséquemment, on définit le territoire-quasi-zéro-énergie autonome sur lequel on va travailler dans le cadre de ce travail de fin d'étude par la définition ci-après.

Un **territoire-quasi-zéro-énergie autonome** (TqZEA) est un territoire résilient qui répond conjointement aux critères d'availability, d'accessibility, d'affordability et d'acceptability durant l'entièreté de son cycle d'étude ; pour faire face aux demandes annuelles d'énergie des bâtiments résidentiels et tertiaires. Et pour lequel l'énergie renouvelable produite ne provient que de sources d'énergie se trouvant dans les limites intérieures du territoire.

GLOSSAIRE

Le tableau ci-dessous, servant à expliciter un vocabulaire spécifique à la thématique du TqZEA, est constitué de définitions directement sorties de la littérature et de formulations adaptées à ce travail de fin d'études.

Tableau 4: Glossaire spécifique au TqZEA

Autonome	: Se dit d'un territoire qui se fournit en énergie par ses propres ressources dans les limites de son site.
Durabilité	: La durabilité appliquée à un territoire est la qualité de pérennité des ressources en incluant comme objectifs de développement durable les trois piliers que sont l'économie, l'environnement et l'équité sociale. La durabilité implique de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins (WCED, 1987).
Energie exportée	: Energie renouvelable produite sur le territoire et consommée en dehors des limites du site.
Energie finale	: Energie quantifiée au stade du consommateur final, après transformation et transport depuis son lieu de production/stockage vers le réseau de distribution.
Energie livrée	: Energie renouvelable ou non, achetée en dehors des limites du territoire (Peterson et al., 2015). Ex: les copeaux de bois ou les biocarburants récoltés hors site.
Energie nette	: Energie utile quantifiée après la consommation des auxiliaires des installations de production, mais avant la mise sur réseau
Energie sur-site	: Energie recueillie et produite à partir de sources d'énergie renouvelable, dans les limites du site. NB : l'énergie renouvelable sur-Site peut être exportée par des moyens de transmission autres que le réseau électrique, tels que la recharge des véhicules électriques utilisés à l'extérieur du territoire. Cependant ce transfert ne sera pas comptabilisé dans le bilan énergétique de ce travail.(Peterson et al., 2015)
Territoire	: Zone géographique relativement étendue, dotée d'une personnalité juridique et d'une liberté d'administration, sur laquelle s'exerce l'autorité d'un état. Cet espace d'identité collective permet d'abriter des personnes et d'offrir des services. (Merlin & Choay, 2015) NB : La notion de territoire implique celle de délimitation précise (frontières avec les territoires limitrophes).

3.3| SCENARIOS DE REHABILITATION DU PARC IMMOBILIER

Ce chapitre s'applique à développer un modèle d'évolution de la consommation en énergie finale du bâtiment qui permet d'arriver à différents scénarios de réhabilitation du parc immobilier du territoire.

Le modèle de consommation énergétique est analysé comme un système dynamique dont l'état évolue au cours du temps sous l'influence de pressions exercées par l'extérieur et l'intérieur. Le panel de ces contraintes étant large, 4 effets mis en avant grâce à l'état de l'art sont étudiés dans le cadre de cette stratégie vers un TqZEA. Les performances énergétiques des bâtiments neufs et à rénover, le renouvellement du parc immobilier, le climat, et la démographie du territoire. Ces 4 effets s'astreignent à l'évolution de référence de la consommation d'énergie des bâtiments⁵, et vont servir de base à l'élaboration du bilan énergétique de consommation ($Q_{b,i}$) associé à chaque scénario de réhabilitation. Ces scénarios sont au nombre de 5, et sont dénommés : *PEB*, *BE*, *PEB+ZE*, *PASSIF*, et *qZE*.

Après le développement des 4 contraintes de calcul, décrites par la suite, on traduit l'équation globale de consommation en énergie finale du bâtiment comme suit :

$$Q_{b,i_{0 \rightarrow c}} = \underbrace{Q_{b,i}^{nr,v}}_{\boxed{7}} + \underbrace{Q_{b,i}^{nr,\rho}}_{\boxed{8}} + \underbrace{Q_{b,i}^{r,v}}_{\boxed{11}} + \underbrace{Q_{b,i}^{r,\rho}}_{\boxed{12}} + \underbrace{Q_{b,el,i}^{\varepsilon}}_{\boxed{14}} + \underbrace{Q_{b,ch,i}^{\varepsilon}}_{\boxed{13}} \quad \boxed{1}$$

$Q_{b,i}$	= consommation en énergie finale des bâtiments du territoire	[GWh/an]
$Q_{b,i}^{r,v}$	= consommation en énergie finale des logements résidentiels neufs à l'an i	[GWh/an]
$Q_{b,i}^{r,\rho}$	= consommation en énergie finale des logements résidentiels rénovés à l'an i	[GWh/an]
$Q_{b,i}^{nr,v}$	= consommation en énergie finale des bâtiments tertiaires neufs à l'an i	[GWh/an]
$Q_{b,i}^{nr,\rho}$	= consommation en énergie finale des bâtiments tertiaires rénovés à l'an i	[GWh/an]
$Q_{b,ch,i}^{\varepsilon}$	= consommation d'énergie finale pour le chauffage des bâtiments non rénovés, à l'an i	[GWh/an]
$Q_{b,el,i}^{\varepsilon}$	= consommation d'énergie finale pour l'électricité des bâtiments non rénovés, à l'an i	[GWh/an]

Les 6 besoins bruts (=consommation en énergie finale), détaillés par la suite, varient chacun de manières différentes suivant les effets extérieurs et intérieurs indiqués au-dessus (démographie, performances, renouvellement et climat).

3.3.1| PERFORMANCES ENERGETIQUES DES BATIMENTS

Le 1^{er} effet développé touche à l'efficacité énergétique des bâtiments via l'évaluation de la consommation spécifique en énergie finale ($E_{sc,b}$) qui prend en compte la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage des locaux, la ventilation, les auxiliaires électriques,

⁵ L'évolution de référence de la consommation correspond à la tendance de consommation d'énergie des bâtiments sans actions de réhabilitation du parc immobilier. Elle reste inchangée donc au cours du temps.

l'eau chaude sanitaire et la climatisation. Cette estimation, associée au 2^{ème} effet qu'est le renouvellement du parc immobilier ou au 4^{ème} qui se rapporte à la démographie, va servir de base à la détermination des consommations énergétiques des bâtiments tertiaires ou résidentiels, neufs et rénovés.

CONSUMMATION SPÉCIFIQUE EN ÉNERGIE DES BATIMENTS NEUFS ET RÉNOVÉS

En Belgique, il existe différents niveaux de performance énergétique du bâtiment qui portent, à échelles distinctes, une attention particulière à l'isolation, à l'étanchéité à l'air, à la ventilation et à la valorisation des apports internes.⁶ Ces réglementations sont notamment les critères PEB, Passif et Zéro-énergie.

En se basant sur l'étude présentée dans l'état de l'art, "Toward low energy cities" (Reiter & Marique, 2012), on élabore des scénarios prospectifs de consommation d'énergie du territoire fonction des performances énergétiques des bâtiments neufs et rénovés. Le Tableau 5, affiche une proposition d'exigences plausibles de réduction de la consommation en énergie finale pour le pôle bâtiment par scénario de réhabilitation.

Tableau 5 :Récapitulatif des performances énergétiques attendues par type de bâtiment et par scénario ($E_{sc,b}$)

Scénarios	RENOVATION		NEUF	
	RESIDENTIEL	TERTIAIRE	RESIDENTIEL	TERTIAIRE
	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an
PEB	115	130	85	115
BE	85	115	45	90
PEB+ZE	115	130	0	0
PASSIF	45	90	45	90
qZE	45	90	0	0

Le type de rénovation employé dans ce travail se calque sur la rénovation dite lourde pour arriver aux exigences d'un territoire-quasi-zéro-énergie autonome. Les rénovations sont considérées comme lourdes lorsque des transformations sont apportées à plus de 25% de la surface de déperdition (en addition de rénovations légères telles que l'installation d'un thermostat ou d'un système de chauffage plus performants). (DGO4, 2016)

- | | |
|-------|--|
| *PEB* | <ul style="list-style-type: none"> ■ Rénovation des bâtiments existants suivant les performances PEB : <ul style="list-style-type: none"> I ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,\rho} \leq 115$ [kWh/m².an] II ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,\rho} \leq 130$ [kWh/m².an] ■ Nouveaux bâtiments suivant la réglementation PEB : <ul style="list-style-type: none"> III ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,v} \leq 85$ [kWh/m².an] IV ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,v} \leq 115$ [kWh/m².an] |
| *BE* | <ul style="list-style-type: none"> ■ Rénovation des bâtiments existants suivant les performances PEB : <ul style="list-style-type: none"> V ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,\rho} \leq 85$ [kWh/m².an] VI ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,\rho} \leq 115$ [kWh/m².an] ■ Nouveaux bâtiments passif : <ul style="list-style-type: none"> VII ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,v} \leq 45$ [kWh/m².an] VIII ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,v} \leq 90$ [kWh/m².an] |

⁶ Les incertitudes liées au comportement des occupants se traduisent indirectement dans les performances énergétiques du bâtiment

PEB+ZE	■ Rénovation des bâtiments existants suivant les performances PEB : - I ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,\rho} \leq 115$ [kWh/m².an] - II ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,\rho} \leq 130$ [kWh/m².an] ■ Nouveaux bâtiments zéro énergie : - VIII ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,v} \leq 0$ [kWh/m².an] - VIII ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,v} \leq 0$ [kWh/m².an]
PASSIF	■ Rénovation des bâtiments existants suivant le critère passif : - VI ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,\rho} \leq 45$ [kWh/m².an] - VII ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,\rho} \leq 90$ [kWh/m².an] ■ Nouveaux bâtiments passif : - VI ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,v} \leq 45$ [kWh/m².an] - VII ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,v} \leq 90$ [kWh/m².an]
qZE	■ Rénovation des bâtiments existants suivant le critère passif : - VI ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,\rho} \leq 45$ [kWh/m².an] - VII ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,\rho} \leq 90$ [kWh/m².an] ■ Nouveaux bâtiments zéro-énergie : - VIII ⇒ Bâtiments résidentiels : $E_{sc,b}^{r,v} \leq 0$ [kWh/m².an] - VIII ⇒ Bâtiments tertiaires : $E_{sc,b}^{nr,v} \leq 0$ [kWh/m².an]

Développement des critères

- I : Dans le cadre d'une rénovation, la réglementation PEB en région Wallonne préconise le respect des exigences vis à vis du coefficient de transmission thermique U [W/m²K] d'une paroi, mais n'impose pas de contraintes quant à la consommation spécifique d'un bâtiment. (DGO4, 2017).
La valeur de 115 [kWh/m².an] est choisie pour coller au plus à la réalité des rénovations lourdes. Cette valeur équivaut à une réduction de $\pm 30\%$ de la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel calculé comme référence dans ce travail (cf. §4.1.2|B| page 58). Réduction qui s'appliquera en théorie prioritairement sur 95% du parc immobilier wallon.
- II : D'après la réglementation PEB, le niveau de consommation d'énergie (E_w) d'un bâtiment tertiaire doit être au plus inférieur à 90 et au moins inférieur à 65, pour un niveau d'isolation thermique globale (K) inférieur à 35. (DGO4, 2018)
Pour faciliter les calculs et la comparaison des scénarios de consommation, on ramène l'exigence à respecter en terme de consommation spécifique en énergie exprimée en [kWh/m².an] par analogie avec un logement neuf résidentiel de K35 et E_{w80} . En gardant en tête que la fonction et donc la consommation finale ne soit pas la même, une valeur de 130 [kWh/m².an] semble vraisemblable au vu des performances actuelles des bâtiments tertiaires rénovés en Belgique.
- III : A partir du 1er janvier 2021, les exigences PEB relatives aux bâtiments résidentiels neufs vont augmenter, passant de 115 à 85 [kWh/m².an]. C'est donc cette dernière valeur que l'on impose de respecter dans ce travail prospectif pour les nouveaux bâtiments résidentiels. (DGO4, 2018)

- IV : Encore selon la réglementation PEB de 2021, le niveau de consommation d'énergie (E_w) d'un bâtiment tertiaire doit être au plus inférieur à 90 et au moins inférieur à 45, pour un niveau d'isolation thermique globale (K) inférieur à 35. (DGO4, 2018)
- Pour faciliter les calculs et la comparaison des scénarios de consommation, on ramène l'exigence à respecter en terme de consommation spécifique en énergie exprimée en $[kWh/m^2.an]$ par analogie avec un logement neuf résidentiel de K35 et E_w65 . En gardant en tête que la fonction et donc la consommation finale ne soit pas la même, une valeur de 115 $[kWh/m^2.an]$ semble vraisemblable au vu des performances actuelles des bâtiments tertiaires rénovés en Belgique.
- V : Les principes appliqués en I et II se répètent ici, excepté que les performances énergétiques prescrites sont plus strictes. On passe donc de 115 à 85 $[kWh/m^2.an]$ pour le secteur résidentiel et 130 à 115 $[kWh/m^2.an]$ pour le secteur tertiaire.
- VI : Ces valeurs correspondent au critère de prime à respecter pour la construction (neuve et de rénovation) de bâtiments résidentiels en région Bruxelles-capitale, car les critères passifs appliqués en région Wallonne ne prennent en compte que le besoin d'énergie pour le chauffage. (Vandenberghe et al., 2013)
- VII : Cette valeur provient de la formule : $E_p \leq 90 - 2,5 * \text{compacité}$ $[kWh/m^2.an]$, où la compacité tend vers 0 pour obtenir la perte d'énergie par m^3 chauffé la plus défavorable. Les critères de certification sont définis pour tous les bâtiments tertiaires passifs en construction neuve ou en rénovation. (PMP asbl, 2017)
- VIII : La définition des critères du standard zéro-énergie est assez ambiguë. Cependant, le standard définit en Région Wallonne préconise que l'unité zéro-énergie réponde aux critères du standard passif, en faisant obligatoirement en sorte que la demande résiduelle d'énergie soit totalement compensée par l'énergie renouvelable produite localement.
- La consommation en énergie finale pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et les auxiliaires électriques, soustrait de la production sur site doit donc être inférieure ou égale à 0 $[kWh/m^2.an]$.
- NB : L'application de cette valeur nulle aura des répercussions sur le bilan de production d'énergie qui seront présentées dans le chapitre des scénarios prospectifs de production d'énergie (cf. §3.4.1[C]).

3.3.2| RENOUVELLEMENT DU PARC IMMOBILIER

Le 2^{ème} effet concerne le renouvellement du parc immobilier et plus particulièrement les taux de construction, de démolition et de rénovation des bâtiments. Contrairement aux autres effets qui sont invariables durant toute l'étape de réhabilitation du parc immobilier, ces contraintes sont à calibrer suivant le scénario de consommation choisi afin d'arriver à un certain niveau d'exigence du territoire (comme expliqué §4.2.3[A]). Elles vont notamment avoir un impact sur l'évolution des surfaces dédiés au secteur tertiaire du territoire. L'introduction de ces pourcentages, ajoutés à l'effet de performance énergétique des bâtiments va permettre la détermination des consommations en énergie finale des bâtiments tertiaires neufs et rénovés.

EVOLUTION DES SURFACES DE BATIMENTS TERTIAIRES

Les phases de construction, de démolition, et de rénovation prennent part à l'évolution au cours du temps des surfaces des unités tertiaires. On estime donc un taux de construction, de démolition, et de rénovation à implémenter à chaque scénario de consommation d'énergie.

Dans la suite des calculs, les variables inconnues sont représentées en orange, tandis que les variables calculées à partir des inconnues sont représentées en bleu. On impose ainsi une valeur initiale (en orange) pour évaluer les différentes surfaces suivantes (en bleu) :

$$\left. \begin{array}{l} S_0 \text{ équation } \boxed{2} \\ S_0^v \text{ équation } \boxed{3} \\ S_0^\delta \text{ équation } \boxed{4} \\ S_0^p \text{ équation } \boxed{5} \\ S_0^\varepsilon \text{ équation } \boxed{6} \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} S_i^v \text{ éq. } \boxed{3} \\ S_i^\delta \text{ éq. } \boxed{4} \\ S_i^p \text{ éq. } \boxed{5} \\ S_i^\varepsilon \text{ éq. } \boxed{6} \end{array} \right\} \rightarrow S_i \text{ éq. } \boxed{2}$$

Les équations qui déterminent l'évolution des surfaces des bâtiments tertiaires s'opèrent de manière à ce que :

- la superficie totale se base sur la superficie de référence, et prenne en compte récurremment les nouvelles surfaces construites et démolies.

$$S_{i \rightarrow c} = S_{i-1} + S_i^v - S_i^\delta \quad \& \quad S_0 = (1 + \tau_v - \tau_\delta) * S_{ref} \quad \boxed{2}$$

S_i	= superficie totale de bâtiments tertiaires à l'année i	[m ²]
S_i^v	= superficie de bâtiments tertiaires neufs à l'année i	[m ²]
S_i^δ	= superficie de bâtiments tertiaires démolis à l'année i	[m ²]
S_{ref}	= superficie de bâtiments tertiaires à l'année de référence	[m ²]
τ_v	= taux de construction	-
τ_δ	= taux de démolition	-

- les nouvelles surfaces de bâtiments neufs dépendent de la superficie totale calculée l'année précédente ;

$$S_{i \rightarrow c}^v = \tau_v * S_{i-1} \quad \& \quad S_0^v = \tau_v * S_{ref} \quad \boxed{3}$$

S_i^v	= superficie de bâtiments tertiaires neufs à l'année i	[m ²]
S_{i-1}	= superficie totale de bâtiments tertiaires à l'année i	[m ²]
S_{ref}	= superficie de bâtiments tertiaires de l'année de référence	[m ²]
τ_v	= taux de construction	-

- le stock de bâtiments tertiaires non rénovés soit rénové avant d'être démolé. On soustrait donc au préalable du stock "non rénové", les bâtiments rénovés sur l'année, avant d'appliquer le taux de démolition au stock "non rénové".

$$S_{i \rightarrow c}^\delta = \tau_\delta * (S_{i-1}^\varepsilon - S_i^p) \quad \& \quad S_0^\delta = \tau_\delta * (1 - \tau_\rho) * S_{ref} \quad \boxed{4}$$

$$S_{i \rightarrow c}^p = \tau_\rho * S_{i-1}^\varepsilon \quad \& \quad S_0^p = \tau_\rho * S_{ref} \quad \boxed{5}$$

S_i^δ	= superficie de bâtiments tertiaires démolis à l'année i	[m ²]
S_{i-1}^ε	= superficie de bâtiments tertiaires non rénovés à l'an i-1	[m ²]
S_i^p	= superficie de bâtiments tertiaires rénovés à l'année i	[m ²]
S_{ref}	= superficie de bâtiments tertiaires de l'année de référence	[m ²]
τ_δ	= taux de démolition	-
τ_ρ	= taux de rénovation	-

A noté que la surface des bâtiments tertiaires non rénovés (dit existants) est une valeur cumulée.

$$S_{i \rightarrow c}^\varepsilon = S_{i-1}^\varepsilon - S_i^\delta - S_i^p \quad \& \quad S_0^\varepsilon = (1 - \tau_\delta - \tau_\rho + \tau_\delta * \tau_\rho) * S_{ref} \quad \boxed{6}$$

Il est également supposé que la gestion de l'énergie est efficace. Les bâtiments les plus anciens et les plus énergivores sont dès lors les premiers à être rénovés. (Reiter & Marique, 2012)

CONSOMMATION EN ENERGIE DES BATIMENTS TERTIAIRES NEUFS ET RENOVES

Après la caractérisation de l'évolution des surfaces tertiaires, il est possible de déterminer la consommation en énergie finale des bâtiments tertiaires. Ces calculs se font par itération en fonction des performances énergétiques et des surfaces de ces derniers.

Consommation en énergie des bâtiments tertiaires neufs

La consommation en énergie finale des bâtiments tertiaires neufs s'exprime comme suit :

$$Q_{b,i0 \rightarrow c}^{nr,v} = E_{sc,b}^{nr,v} * S_i^v \quad [7]$$

$Q_{b,i}^{nr,v}$	= consommation en énergie finale des bâtiments tertiaires neufs à l'an i	[GWh/an]
$E_{sc,b}^{nr,v}$	= consommation spécifique en énergie finale des bâtiments tertiaires neufs, suivant le scenario (cf. §3.3.1)	[kWh/m².an]
S_i^v	= superficie de bâtiments tertiaires neufs à l'année i	[m²]

Consommation en énergie des bâtiments tertiaires rénovés

L'équation de consommation en énergie finale des bâtiments tertiaires rénovés se décline quant à elle comme suit :

$$Q_{b,i0 \rightarrow c}^{nr,\rho} = E_{sc,b}^{nr,\rho} * S_i^\rho \quad [8]$$

$Q_{b,i}^{nr,\rho}$	= consommation en énergie finale des bâtiments tertiaires rénovés à l'an i	[GWh/an]
$E_{sc,b}^{nr,\rho}$	= consommation spécifique en énergie finale des bâtiments tertiaires rénovés, suivant le scenario (cf. §3.3.1)	[kWh/m².an]
S_i^ρ	= superficie de bâtiments tertiaires rénovés à l'année i	[m²]

3.3.3 | CLIMAT

Le 3^{ème} effet développé concerne l'évolution climatique du territoire qui va permettre d'estimer les besoins bruts de chaleur des bâtiments pour une année, sans aucune rénovation du bati existant et sans aucunes nouvelles constructions, sur base d'un nombre de degrés-jours (DJ). Cette consommation fonction des DJ sert de base au calcul de la consommation d'énergie des bâtiments fonction des conditions climatiques et démographiques.

Comme expliqué dans le paragraphe des Résultats liés à la consommation finale d'énergie de l'étude du Bureau Fédéral du plan (page 18), la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiel et tertiaire est particulièrement sensible aux températures extérieures. La planification d'une stratégie en tenant compte des changements climatiques futurs contribue donc à renforcer la résilience dans les nouvelles infrastructures énergétiques. (Devogelaer & Gusbin, 2017)

Le principe de degrés-jours est une caractéristique importante pour déterminer la quantité de chaleur consommée par les bâtiments sur une période donnée. Cette notion est liée à l'écart de température entre l'ambiance intérieure et l'extérieur du bâtiment pour un lieu donné. Le nombre de degrés-jours d'une période de chauffage est égal au produit du nombre de jours chauffés multiplié par la différence entre la température intérieure moyenne du local considéré et la température extérieure moyenne mesurées pendant la période de chauffe. Plus les températures extérieures sont basses, plus la valeur des degrés-jours est élevée et plus les besoins en chaleur sont grands. (Énergie+, 2016)

Cependant, seuls 70% des besoins de chaleur varient proportionnellement à l'évolution du nombre de degrés-jours (DJ), les 30% des besoins restant étant invariable afin de prendre en compte l'inertie thermique du bâtiment. (ICEDD, 2014a)

Les consommations d'énergie des bâtiments résidentiels et tertiaires fonction des degrés-jours s'expriment comme suit :

$$Q_{b,ch,i_{0 \rightarrow c}}^{DJ,r} = \left(0,7 * \frac{DJ_i}{DJ_{réf}} + 0,3 \right) * (m_{ref} * E_{b,ch,ref}^r) \quad [9]$$

$$Q_{b,ch,i_{0 \rightarrow c}}^{DJ,nr} = \left(0,7 * \frac{DJ_i}{DJ_{réf}} + 0,3 \right) * (S_{ref} * E_{b,ch,ref}^{nr})$$

$Q_{b,ch,i}^{DJ}$	= consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments $\left\{ \begin{array}{l} r = \text{résidentiels} \\ nr = \text{tertiaires} \end{array} \right\}$, en fonction des degrés-jours, à l'an i	[GWh/an]
DJ_i	= nombre de degrés-jours de l'année i	[°C.jours]
$DJ_{réf}$	= nombre de degrés-jours à l'année de référence	[°C.jours]
m_{ref}	= effectif de logements de l'année de référence	[log]
S_{ref}	= superficie de bâtiments tertiaires de l'année de référence	[m ²]
$E_{b,ch,ref}^r$	= consommation spécifique de chaleur d'un bâtiment résidentiel, suivant le scénario de référence (cf. §4.1.2 B)	[kWh/m ² .an]
$E_{b,ch,ref}^{nr}$	= consommation spécifique de chaleur d'un bâtiment tertiaire, suivant le scénario de référence (cf. §4.1.2 B)	[kWh/log.an]

3.3.4 | DEMOGRAPHIE

Le 4^{ème} et dernier effet astreint aux scénarios de réhabilitation du parc immobilier se rapporte à la démographie et plus spécifiquement à l'évolution du nombre de logements du territoire. Cette contrainte associée à l'effet de performance énergétique des bâtiments va permettre la détermination des consommations en énergie finale des bâtiments résidentiels neufs et rénovés. Alliée à l'évolution climatique et à l'effet de renouvellement du parc immobilier, elle va aider aux calculs des consommations en énergie finale des bâtiments non rénovés.

EVOLUTION DU NOMBRE DE LOGEMENTS

Selon l'étude du bureau fédéral du plan (BFP), introduite lors de l'état de l'art, on constate que l'évolution de la démographie influence le stock de logements du territoire et par conséquent la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel. La détermination d'une stratégie en tenant compte du nombre de logements (ou ménages) contribue également à renforcer la résilience des infrastructures énergétiques. (Devogelaer & Gusbin, 2017)

Le BFP a aussi élaboré un scénario prospectif d'évolution démographique à l'horizon 2060 en accord avec les données récoltées par la direction générale statistique (DGS). Ce scénario traite des perspectives de population et de ménages par régions belges (Wallonne, Flamande, Bruxelles-Capitale), en se basant sur la définition nationale du chiffre officiel de la population, et en établissant des hypothèses sur l'évolution future de la migration internationale (immigration et émigration), de la migration interne, de la fécondité et de la mortalité. Les perspectives de population et de ménages 2016-2060 partent de la population par arrondissement, âge, sexe, position au sein du ménage et nationalité observée au 1er janvier 2016. À long terme, la projection s'inscrit dans un scénario qui suppose la poursuite des tendances qui marquent le contexte politique et sociétal actuel. (Vandresse, 2017)

Les ménages sont habituellement distingués selon leur caractère collectif ou privé. Les ménages collectifs peuvent être caractérisés par une organisation professionnelle du logement. Ainsi ils incluent les communautés religieuses, les maisons de repos et de soins, les orphelinats, les résidences pour étudiants et ouvriers, les hôpitaux ou établissements hospitaliers et les prisons. (Deboosere et al., 2009)

Dans l'étude du BFP, ce sont les ménages privés belges qui sont pris en compte car ils représentent la majorité des ménages de la population. Ils se composent soit d'une seule personne vivant seule et occupant habituellement un seul logement, soit de deux personnes ou plus (unies ou non par des liens familiaux) et vivant ensemble dans un même logement. (Monitoring des Quartiers, 2016)

En gardant à l'esprit que ces valeurs ne représentent pas la totalité des habitants, on suppose que l'effectif de ménages privés calculé dans cette étude équivaut à l'effectif de logements occupés au sein du territoire.

Les taux de construction et démolition ne s'appliquent pas aux logements résidentiels étant donné que les valeurs démographiques proposées concernent uniquement les logements privés occupés. On prend donc en compte la différence de logements d'une année à une autre comme étant la quantité de nouveaux logements.

Ici encore, les variables inconnues sont représentées en orange, tandis que les variables calculées à partir des inconnues sont représentées en bleu.

En considérant connu l'effectif de logements à l'année i (m_i), les équations qui déterminent l'évolution des logements résidentiels s'obtiennent comme suit :

$$m_{i \rightarrow c}^v = m_i - m_{i-1} \quad \& \quad m_0^v = \bar{m} \quad \boxed{10}$$

$$m_{i \rightarrow c}^p = N\{\tau_p * (m_0 - m_{i-1}^p)\} \quad \& \quad m_0^p = N\{\tau_p * m_0\}$$

$$m_{i \rightarrow c}^e = m_i - m_i^v - m_i^p$$

m_i^v	= effectif de logements neufs à l'an i	[log]
m_i	= effectif total de logements à l'année i	[log]
$\bar{m}$	= croissance moyenne de logements par an	[log]
m_i^p	= effectif de logements rénovés à l'année i	[log]
τ_p	= taux de rénovation	-
m_i^e	= effectif de logements non rénovés à l'année i	[log]

CONSOMMATION EN ENERGIE DES BATIMENTS RESIDENTIELS NEUFS ET RENOVES

Après la caractérisation de l'évolution des logements du territoire, il est possible de déterminer la consommation en énergie finale des bâtiments résidentiels. Ces calculs se font par itération en fonction des performances énergétiques de ces derniers, et de l'évolution démographique du territoire.

Notons que pour chaque scénario, en estimant une superficie moyenne de logement (égale à 123,21[m²/log] en Région Wallonne, cf. Tableau 12 p.59), on peut convertir les consommations spécifiques des bâtiments résidentiels du [kWh/m².an] au [kWh/log.an], et inversement.

Consommation en énergie des logements neufs

La consommation en énergie finale des unités résidentielles neuves s'exprime donc comme suit :

$$Q_{b,i_0 \rightarrow c}^{r,v} = E_{sc,b}^{r,v} * S_m * m_i^v \quad [11]$$

$Q_{b,i}^{r,v}$	= consommation en énergie finale des logements résidentiels neufs à l'an i	[GWh/an]
$E_{sc,b}^{r,v}$	= consommation spécifique en énergie finale des logements résidentiels neufs, suivant le scenario (cf. §3.3.1)	[kWh/m ² .an]
S_m	= superficie moyenne de logements (cf. 4.1.2[B])	[m ² /log]
m_i^v	= effectif de logements neufs à l'année i	[log]

Consommation en énergie des logements rénovés

L'équation de consommation en énergie finale des logements rénovés s'exprime donc en fonction des données de l'effectif de logements occupés.

$$Q_{b,i_0 \rightarrow c}^{r,\rho} = E_{sc,b}^{r,\rho} * S_m * m_i^\rho \quad [12]$$

$Q_{b,i}^{r,\rho}$	= consommation en énergie finale des logements résidentiels rénovés à l'an i	[GWh/an]
$E_{sc,b}^{r,\rho}$	= consommation spécifique en énergie finale des logements résidentiels rénovés, suivant le scenario (cf. §3.3.1)	[kWh/m ² .an]
S_m	= superficie moyenne de logements (cf. 4.1.2[B])	[m ² /log]
m_i^ρ	= effectif de logements rénovés à l'année i	[log]

CONSOMMATION EN ENERGIE DES BATIMENTS NON RENOVES

A la suite de l'établissement de l'évolution des logements du territoire, il est également possible de déterminer la consommation en énergie finale des bâtiments résidentiels et tertiaires non rénovés. Ces calculs se font par itération en fonction des conditions climatiques et démographiques du territoire.

Les équations de consommation d'énergie de l'ensemble des bâtiments non rénovés deviennent donc :

$$Q_{b,ch,i}^\varepsilon = \frac{m_i^\varepsilon}{m_{ref}} * Q_{b,ch,i}^{DJ,r} + \frac{S_i^\varepsilon}{S_{ref}} * Q_{b,ch,i}^{DJ,nr} \quad [13]$$

$Q_{b,ch,i}^\varepsilon$	= consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments non rénovés, en fonction de la démographie, à l'année i	[GWh/an]
$Q_{b,ch,i}^{DJ}$	= consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments {r = résidentiels}, en fonction des degrés-jours, à l'an i {nr = tertiaires}	[GWh/an]
m_i^ε	= effectif de logements non rénovés à l'année i	[log]
m_{ref}	= effectif de logements de l'année de référence	[log]
S_i^ε	= superficie de bâtiments tertiaires non rénovés à l'année i	[m ²]
S_{ref}	= superficie de bâtiments tertiaires de référence	[m ²]

$$Q_{b,el,i}^{\varepsilon} = m_i^{\varepsilon} * E_{b,el,ref}^r + (S_i^{\varepsilon} * E_{b,el,ref}^{nr})$$

14

$Q_{b,el,i}^{\varepsilon}$	= consommation d'énergie pour l'électricité des bâtiments non rénovés, en fonction de la démographie, à l'année i	[kWh/an]
$E_{b,el,ref}^r$	= consommation spécifique d'électricité d'un bâtiment résidentiel, suivant le scénario de référence (cf. §4.1.2 B)	[kWh/log.an]
$E_{b,el,ref}^{nr}$	= consommation spécifique d'électricité d'un bâtiment tertiaire, suivant le scénario de référence (cf. §4.1.2 B)	[kWh/m².an]
m_i^{ε}	= effectif de logements non rénovés à l'année i	[log]
S_i^{ε}	= superficie de bâtiments tertiaires non rénovés à l'année i	[m²]

Notons, qu'en remplaçant l'effectif de logements non rénovés (m_i^{ε}) par l'effectif total de logements (m_i), la somme des deux équations de consommation d'énergie des bâtiments résidentiels et tertiaires non rénovés sous l'effet du climat et de la démographie correspond à la tendance de consommation d'énergie des bâtiments sans l'impact des effets intérieurs (performance et renouvellement).

3.3.5| STRATEGIE DE REHABILITATION DU PARC IMMOBILIER DU TQZEA

En résumé, la stratégie de réhabilitation du parc immobilier consiste en l'application de 4 effets extérieurs et intérieurs sur de la consommation de référence du territoire afin de former 5 scénarios prospectifs de consommation d'énergie des bâtiments du territoire-quasi-zéro-énergie autonome.

Comme présenté Tableau 6 ,les cinq scénarios évoluent d'une situation de performances élevées (*PEB*) à un optimum de performance (*qZE*), et sont développés afin de couvrir le plus vraisemblablement possible l'évolution des consommations énergétiques des bâtiments. Ils impliquent la réduction de la consommation finale d'énergie du bâtiment, et donc le bouleversement du tissu économique du territoire en altérant le moins possible les habitudes des consommateurs.

Tableau 6 : Récapitulatif des scénarios de réhabilitation du parc immobilier du TqZEA

Scénarios	Taux de rénovation %	Rénovation		Neuf		Référence	
		Résidentiel kWh/m².an	Tertiaire kWh/m².an	Résidentiel kWh/m².an	Tertiaire kWh/m².an	Résidentiel kWh/m².an	Tertiaire kWh/m².an
PEB		115	130	85	115	$E_{b,ch,ref}^r$ $E_{b,el,ref}^r$	$E_{b,ch,ref}^{nr}$ $E_{b,el,ref}^{nr}$
BE		85	115	45	90		
PEB+ZE		115	130	0	0		
PASSIF		45	90	45	90		
qZE		45	90	0	0		
+démographie +climat +taux de construction +taux de démolition		$E_{sc,b}^{r,\rho}$	$E_{sc,b}^{nr,\rho}$	$E_{sc,b}^{r,v}$	$E_{sc,b}^{nr,v}$		
		$Q_{b,i}^{r,\rho}$	$Q_{b,i}^{nr,\rho}$	$Q_{b,i}^{r,v}$	$Q_{b,i}^{nr,v}$	$Q_{b,el,i}^{\varepsilon}$	$Q_{b,i}^{\varepsilon}$

Les taux de rénovation sont à implémenter grâce à l'outil de calcul Excel. Tandis que les données d'évolution démographique et climatique, et les performances énergétiques des bâtiments de "référence" sont à trouver dans la littérature. Il est alors possible de calculer le bilan de consommation d'énergie du territoire-quasi-zéro-énergie autonome ($Q_{b,i}$) grâce à l'intégration des 4 variables que sont le renouvellement du parc immobilier, la démographie, le climat, et les performances énergétiques des bâtiments du territoire.

3.4 | SCENARIOS DE TRANSFORMATION DU PARC ÉNERGETIQUE

Ce chapitre s'emploie à développer un modèle d'évolution de la production en énergie renouvelable qui permet d'arriver à différents scénarios de transformation du parc énergétique du territoire.

Le modèle de production d'énergie est ici analysé comme un système dont l'état progresse, au fil du temps, sous l'effet de pressions extérieures et intérieures. Grâce à la revue de la littérature, 3 effets ont pu être mis en avant dans le cadre de cette stratégie vers un TqZEA. Les types et les performances des infrastructures de production, le taux de renouvellement de ces installations, et le degré d'urbanisation du territoire.

L'élaboration des scénarios prospectifs de production d'énergie, qui induisent la transformation du parc énergétique, s'est effectuée sur base de contraintes liées au réseau de distribution d'énergie sur un large territoire, au type d'infrastructures de production réellement réalisables, et au mode d'approvisionnement en énergie. Ces scénarios sont au nombre de 2, et sont dénommés : *HYD* et *EOL*.

Le réseau de distribution

L'intégration d'une infrastructure énergétique à l'échelle urbaine nécessite la création d'un réseau de distribution capable de combiner les demandes en énergie des consommateurs. Les réseaux de distribution d'électricité et de chaleur sont des réseaux urbains dont les conditions de raccordement (puissance installée, saturation du réseau, besoins de réglage des postes de transformation ou de renforcement du réseau, etc.) influencent fortement la viabilité des installations de production d'énergie renouvelable et l'étendue du territoire sur lequel les placées.

Dans le cas de systèmes de production d'énergie renouvelable, on fait l'hypothèse de ne considérer que le réseau de distribution électrique à l'échelle urbaine, étant donné que les pertes thermiques induites par un réseau de chaleur contribuent à atténuer les bénéfices de la centralisation de la production de chaleur. (Penders, 2013)

Le mode d'approvisionnement en énergie

Les discussions sur le mode d'approvisionnement en énergie via des productions centralisées ou décentralisées font débat depuis un certain temps. Chaque mode d'organisation ayant ses atouts et ses inconvénients.

Pour n'en citer que quelques-uns :

Avantages à la centralisation

- + la concentration des sites de production d'électricité (et de chaleur) a un impact géographique moindre et nécessite de plus faibles aménagements d'infrastructure pour acheminer la nouvelle production vers les zones de consommation ;
- + les éoliennes, les centrales hydrauliques, les cultures destinées à la production de biocarburant et les lignes électriques sont autant d'intrusions dans la nature. La centralisation de celles-ci réduit leur impact environnemental ;

Avantages à la décentralisation

- + l'utilisation d'une multitude de stations (petites et moyennes) permet d'adapter plus facilement la production aux besoins. Cela permet d'alimenter des sites isolés du réseau existant pour lesquels les consommations ne justifient pas l'installation de centrales de production de forte puissance ;
- + la production décentralisée est raccordée au réseau électrique à des niveaux de tension peu élevée : basse ou moyenne tension. La décentralisation des stations de production permet dès lors de décharger les réseaux de lignes à haute tension.

Chaque modèle a indiscutablement démontré son efficacité au cours du temps, au regard des bénéfices cités ci-avant.

On gardera toutefois à l'esprit que sur le plan organisationnel, l'intégration commune de ces deux modes d'approvisionnement implique un rôle central des gestionnaires de réseaux de distribution avec, notamment, la mise en place de dispositifs intelligents et communicants, capables d'intégrer une part importante de production et de réagir efficacement selon les besoins et les capacités de production en énergie des consommateurs/producteurs. (Roger-Machart et al., 2013)

Les infrastructures de production d'électricité

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des systèmes de production considérés dans cette étude comme fournisseur d'énergie à petite et grande échelle suivant le milieu urbain dans lequel ils se développent le mieux. (Penders, 2013)

Les systèmes encadrés en couleur sont ceux utilisés dans le cadre de ce travail, les autres sont les systèmes potentiellement utilisables à l'échelle d'un TqZEA.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des SER, basé sur (Penders, 2013)

	Production d'électricité	Production de chaleur
Energie hydraulique	Centrale hydroélectrique	
	Usine houlomotrice	
	Centrale marémotrice	
Energie éolienne	Petite éolienne (<100kW)	
	Grand éolien	
	Hydroliennes	
Energie solaire	Panneau photovoltaïque	
	Ferme solaire photovoltaïque	
		Capteur solaire thermique
		Centrale solaire thermodynamique
Biomasse		Combustion du bois
	Incinération des déchets organiques	
	Combustion des sous-produits végétaux et animaux	
Géothermie		Géothermie "basse énergie"
		Géothermie profonde
Pompes à chaleur		Chaleur du sol
		Chaleur de l'air
		Hydrothermie marine

Milieu périurbain
Production centralisée

Milieu urbain & périurbain
Production centralisée

Milieu périurbain
Production décentralisée

Milieu urbain & périurbain
Production décentralisée

Le but de ce travail n'est pas d'expérimenter de nouvelles techniques de production d'énergie, mais de voir dans quelle proportion les SER interviennent dans le bilan énergétique final. Ainsi, le choix est fait d'exploiter des procédés de production réalistes et fiables. Les 3 infrastructures de production mises en évidence font parties de celles qui sont le plus couramment utilisées en Europe, et en Belgique. En se basant sur ce diagnostic, on élabore 2 scénarios qui combinent la production centralisée et la décentralisée.

Conclusion

Dans le cadre de ce travail, il est important de rattacher les résultats obtenus à une représentation simplifiée du monde réel. C'est dans cette optique que l'on inclura les deux systèmes d'approvisionnement en énergie, qui sera distribuée sur le réseau via l'électricité. Le mix énergétique se composera ainsi d'énergie hydroélectrique, photovoltaïque, et de sources d'énergie renouvelables préexistantes pour le scénario de transformation *HYD*, et d'énergie éolienne, photovoltaïque, et de SER préexistantes pour le scénario *EOL*.⁷

Les trois effets contraints aux scénarios de transformation du parc énergétique vont servir de base à l'élaboration du bilan de production d'énergie ($Q_{p,i}$) associé à chaque scénario.

Après le développement des variables de calcul, on traduit l'équation globale de production en énergie finale comme suit :

$$Q_{p,i \rightarrow c} = \underbrace{Q_{p,i}^{y,hyd}}_{\substack{\text{performances} \\ \text{renouvellement}}} \underbrace{Q_{p,i}^{\delta,eol}}_{\substack{\text{performances} \\ \text{renouvellement}}} + \underbrace{Q_{p,i}^{\delta,pv}}_{\substack{\text{démographie} \\ \text{climat} \\ \text{degré urbanisation}}} + \underbrace{\widehat{Q}_p^{\varepsilon}}_{\text{performances}} \quad [15]$$

$Q_{p,i}$	= production en énergie finale du territoire-quasi-zéro-énergie-autonome à l'année i	[GWh/an]
$Q_{p,i}^{y,hyd}$	= énergie de production des grandes infrastructures hydrauliques à l'année i	[GWh/an]
$Q_{p,i}^{\delta,eol}$	= énergie de production des grandes infrastructures éoliennes à l'année i	[GWh/an]
$Q_{p,i}^{\delta,pv}$	= énergie de production des infrastructures photovoltaïques à l'année i	[GWh/an]
$\widehat{Q}_p^{\varepsilon}$	= énergie finale de production des infrastructures préexistantes	[GWh/an]

Les énergies de production centralisée et décentralisée vont être développées ci-après. L'énergie de production des infrastructures préexistantes est développée §4.1.3|A|.

3.4.1| PERFORMANCES ENERGETIQUES DES SYSTEMES DE PRODUCTION

A| L'ENERGIE HYDRAULIQUE – LA CENTRALE HYDROELECTRIQUE

La production d'énergie dite centralisée est réalisée au moyen de grosses centrales hydrauliques connectées à un réseau électrique de transport et de grande ampleur.

⁷ La biomasse est écartée du mix énergétique car bien que sa valorisation énergétique puisse permettre de réduire la dépendance aux énergies fossiles, elle n'est pas considérée comme une source d'énergie renouvelable durable et permettant l'autonomie énergétique en Europe, ni comme une source d'énergie propre. (Greenpeace et al., 2015)

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur. (CDE, 2011)

La production d'énergie hydroélectrique se calcule comme suit :

$$Q_{p,i_0 \rightarrow c}^{y,hyd} = (1 - f_t) * P_{hyd} * d_{hyd} * \underbrace{\mathbb{N}\{\tau_{prod}^{hyd} + n_{i-1}^{hyd}\}}_{n_i^{hyd}} \quad [16]$$

$Q_{p,i}^{y,hyd}$	= énergie de production des grandes infrastructures hydrauliques	[kWh/an]
f_t	= facteur de perte d'électricité due au réseau de transport et à la conversion d'énergie ->intégré afin de pouvoir transformer les données d'énergie nette en énergie finale (cf. 4.1.1 A page 56)	-
P_{hyd}	= puissance nominale hydroélectrique	[kW/site]
d_{hyd}	= durée de fonctionnement moyenne annuelle d'un site hydroélectriques	[h/an]
τ_{prod}^{hyd}	= taux de production d'énergie issue des centrales hydroélectriques	[site]
n_i^{hyd}	= nombre de site hydroélectrique à l'année i ($n_{i=0}^{hyd} = \mathbb{N}\{\tau_{prod}^{hyd}\}$)	[site]

PUISSANCE NOMINALE & DUREE DE FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE - DISPONIBILITE

On distingue plusieurs types de centrales en fonction de la hauteur et du débit de chute d'eau. Cependant, dans le cadre de ce travail, les centrales paraissant les plus intéressantes à utiliser sont les centrales hydrauliques dites au fil de l'eau. Ces centrales hydrauliques basses chutes sont caractérisées par un débit très important et une faible hauteur de chute. Elles se trouvent habituellement sur de grands fleuves et produisent de l'énergie sans interruption.

Pour le cas de base, on considère un site hydroélectrique de classe de puissance moyenne pouvant produire **$P_{hyd}=5000[kW/site]$** d'électricité.

En plus de la puissance physique, les performances d'une installation de production dépendent de variables telles que le climat et l'hydrologie du territoire. Ces variables vont engendrer un rendement des installations qui peut être exprimé par un équivalent d'heures de fonctionnement à puissance nominale (d_{hyd}). Cet équivalent représente la productivité de l'infrastructure sur toute l'année et est strictement dépendant du territoire étudié. Sa valeur sera présentée §4.1.3|A| page61.

TAUX DE PRODUCTION ET NOMBRE DE SITE DES GRANDES INSTALLATIONS

Les productions sont détaillées par nombre de centrales ou d'installations appelées sites. Le nombre de site représente donc le nombre d'établissements où se trouvent les installations contenant un ou plusieurs moteurs ou turbines. Le taux de production est implémentable dans l'outil de calcul Excel et dépend du territoire étudié. Il correspond au nombre de site à rajouter par an pour faire évoluer la production d'énergie du territoire.

B| L'ENERGIE EOLIENNE – LE GRAND EOLIEN

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. Une éolienne est une machine tournante qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. (CDE, 2011)

L'énergie cinétique du vent récupérée par seconde au travers de la surface des pales d'une éolienne lui fournit sa puissance. La production d'énergie éolienne se calcule comme suit :

$$Q_{p,i}^{\delta,eol} = (1 - f_t) * P_{eol} * d_{eol} * \underbrace{N\{\tau_{prod}^{eol} + n_{i-1}^{eol}\}}_{n_i^{eol}} \quad [17]$$

$Q_{p,i}^{\delta,eol}$	= énergie de production décentralisée des grandes infrastructures éoliennes	[kWh/an]
f_t	= facteur de perte d'électricité due au réseau de transport et à la conversion d'énergie ->intégré afin de pouvoir transformer les données d'énergie nette en énergie finale (cf. 4.1.1 A page 56)	-
P_{eol}	= puissance nominale éolienne	[kW/unité]
d_{eol}	= durée de fonctionnement moyenne annuelle d'une unité éolienne	[h/an]
τ_{prod}^{eol}	= taux de production d'énergie issue des parcs éoliens	[unité]
n_i^{eol}	= nombre d'unité éolienne à l'année i ($n_{i=0}^{eol} = N\{\tau_{prod}^{hyd}\}$)	[unité]

PUISSANCE NOMINALE & DUREE DE FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE

Il existe plusieurs types d'éoliennes qui diffèrent selon la plage de vitesse du vent ou la section de l'éolienne. En général, on ne parle de grandes éoliennes qu'à partir d'une puissance nominale unitaire de 500 kW. Entre 100 kW et 500 kW, on parle de moyennes éoliennes (Penders, 2013).

La classe de production moyenne considérée comme cas de base dans ce travail permet une puissance nominale éolienne de **$P_{eol}=2000$ [kW/unité]**.

L'équivalent d'heures de fonctionnement à puissance nominale (d_{eol}) est ici encore dépendant du territoire étudié. Sa valeur est présentée §4.1.3|A| page 61.

TAUX DE PRODUCTION ET NOMBRE D'UNITES DES GRANDES INSTALLATIONS

Le nombre d'unités représente le nombre de moteurs ou de mâts d'éoliennes installés. Le taux de production est implémentable dans l'outil de calcul Excel et dépend du territoire étudié. Il correspond au nombre d'unité à rajouter par an pour faire évoluer la production d'énergie du territoire.

C| L'ENERGIE SOLAIRE – LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Le solaire photovoltaïque exploite le phénomène de transmission de l'énergie issue des photons de la lumière solaire aux électrons liés à la matière constituante du panneau photovoltaïque. Le résultat de cette conversion lumineuse est un courant électrique directement exploitable. (CDE, 2011)

La productivité d'énergie locale photovoltaïque est fonction des scénarios prospectifs de consommation d'énergie dans la mesure où l'exigence zéro-énergie des bâtiments (que l'on retrouve dans les scénarios *PEB+ZE* et *qZE*) impose qu'une partie de la demande d'énergie soit totalement compensée par l'énergie renouvelable produite par le bâtiment.

L'évaluation de la production d'électricité photovoltaïque, fonction de l'exigence zéro énergie se calcul comme donc comme suit :

$$Q_{p,i}^{\delta,PV} = f_M * (P_{PV}^{r,\rho} * S_{PV}^{r,\rho} + P_{PV}^{r,v} * S_{PV}^{r,v} + P_{PV}^{nr,\rho} * S_{PV}^{nr,\rho} + P_{PV}^{nr,v} * S_{PV}^{nr,v}) \quad [18]$$

$Q_{p,i}^{\delta}$	= énergie de production des installations photovoltaïques	[kWh/an]
f_M	= facteur de réduction tenant compte de l'impact de la forme urbaine sur le rayonnement incident de la toiture, en moyenne sur l'année	-
P_{PV}	= puissance photovoltaïque de la surface considérée	[kWh/ m²an]
	▪ si les bâtiments ne sont pas contraints à l'exigence ZE :	
	$P_{PV}^{r,\rho} = P_{PV}^{r,v} = P_{PV}^{nr,\rho} = P_{PV}^{nr,v} = \eta_{PV} * \eta_{ond} * (1 - \lambda) * E_{sol}$	
	▪ si les bâtiments sont contraints à l'exigence ZE sur les :	
	logements rénovés / batiments tertiaires rénovés	
	→ $P_{PV}^{r,\rho} = P_{PV}^{nr,\rho} = 45$	
	logements neufs / batiments tertiaires neufs	
	→ $P_{PV}^{r,v} = P_{PV}^{nr,v} = 90$	
η_{PV}	= rendement du panneau photovoltaïque	-
η_{ond}	= rendement de l'onduleur	-
λ	= coefficient de pertes électriques	-
E_{sol}	= énergie solaire reçue de la surface considérée	[kWh/m²an]
S_{PV}	= surface de toit considérée	[m²]
	▪ si les bâtiments ne sont pas contraints à l'exigence ZE :	
	$S_{PV}^{r,\rho} = m_i^{\rho} * S_m * \tau_{prod}^{PV} * C$ $S_{PV}^{r,v} = m_i^v * S_m * \tau_{prod}^{PV} * C$	
	$S_{PV}^{nr,\rho} = S_i^{\rho} * \tau_{prod}^{PV} * C$ $S_{PV}^{nr,v} = S_i^v * \tau_{prod}^{PV} * C$	
	▪ si les bâtiments sont contraints à l'exigence ZE sur les :	
	logements rénovés → $S_{PV}^{r,\rho} = m_i^{\rho} * S_m$	
	logements neufs → $S_{PV}^{r,v} = m_i^v * S_m$	
	batiments tertiaires rénovés → $S_{PV}^{nr,\rho} = S_i^{\rho}$	
	batiments tertiaires neufs → $S_{PV}^{nr,v} = S_i^v$	
τ_{prod}^{PV}	= taux de production des panneaux photovoltaïques	[%]
C	= pourcentage de couverture de toit en PV	[%]
m_i^{ρ}	= effectif de logements rénovés à l'an i (cf. 3.3.4)	[log]
m_i^v	= effectif de logements neufs à l'an i (cf. 3.3.4)	[log]
S_m	= superficie moyenne de logements (cf. 4.1.2 B)	[m²/log]
S_i^{ρ}	= superficie de bâtiments tertiaires rénovés à l'an i (cf. 3.3.2)	[m²]
S_i^v	= superficie de bâtiments tertiaires neufs à l'an i (cf. 3.3.2)	[m²]

RENDEMENTS DU PV ET DE L'ONDULEUR, COEFFICIENT DE PERTES ELECTRIQUES & ENERGIE SOLAIRE RECUE (E_{sol})

Comme présenté dans l'étude de rénovation énergétique des ilots (Penders, 2013), on admet que les pans de toiture les mieux exposés de chaque habitation seront étudiés pour la pose de panneaux photovoltaïques. Dans le cas d'un rendement "classique", on suppose l'utilisation de panneaux monocristallin BlueSolar de type SPM280-24 ($\eta_{pv}=14,43\%$), et l'onduleur Sunny Boy 3000TL de la marque SMA ($\eta_{ond}=96\%$). La valeur moyenne des pertes électriques est estimée à 20% ($\lambda=0,2$).

L'énergie solaire reçue par une surface dépend de facteurs tels que 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 prise comme donnée d'énergie solaire.

FACTEUR DE REDUCTION LIE A LA FORME URBAINE – DEGRE D'URBANISATION

La production énergétique est proportionnelle au degré d'urbanisation d'un lieu. C'est donc un facteur qui va rentrer en considération dans le calcul du potentiel photovoltaïque étant donné le choix d'un mode d'approvisionnement décentralisé pour cette SER.

La quantité d'énergie solaire reçue est affectée d'un facteur réducteur relatif à la forme urbaine (f_M). Ce facteur tient compte des masques solaires engendrés par le milieu bâti environnant (lié au degré d'urbanisation). S'il est de 0,9, cela signifie que la surface reçoit 90 % de l'énergie solaire qu'elle recevrait en site dégagé. Plus le facteur M est proche de 1, moins les bâtiments environnants ont un impact sur l'énergie solaire reçue par la surface considérée. Sur base de l'analyse de l'étude de "Rénovation énergétique des ilots" (Penders, 2013), on estime une valeur associée à ce facteur suivant le degré d'urbanisation du territoire:

$f_M=1$ si territoire rural	$f_M=0,97$ si territoire périurbain	$f_M=0,85$ si territoire urbain
-----------------------------	-------------------------------------	---------------------------------

TAUX DE PRODUCTION & POURCENTAGE DE COUVERTURE DE TOIT

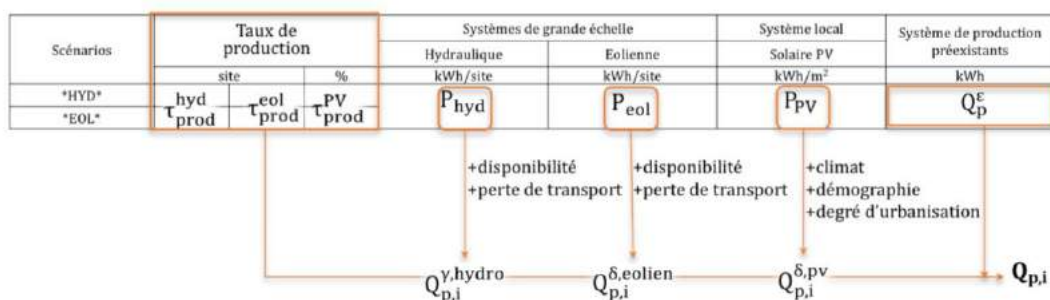
Le taux de production est détaillé en surface de panneaux solaire à installer en plus de l'existant afin de permettre la progression de la capacité de production de ce type de ressource renouvelable. On fera en sorte de prendre au maximum 50% de surface de toit afin de ne considérer de manière générale que le pan de toiture le mieux exposé pour chaque habitation.

Le taux de production et le pourcentage de couverture sont à implémenter dans l'outil de calcul Excel car ils dépendent du territoire étudié.

3.4.2| STRATEGIE DE TRANSFORMATION DU PARC ENERGETIQUE DU TQZEA

Les deux scénarios impliquent la réduction des émissions de gaz à effet de serre par l'intégration d'une plus grande part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique. Ces scénarios sont établis afin de prévoir le plus vraisemblablement possible les mix énergétiques qui composeront un parc de production d'énergie. Le Tableau 8 présente le mix énergétique de ces différents scénarios.

Tableau 8 : Récapitulatif des scénarios de transformation du parc énergétique du TqZEA



Les taux de production sont à implémenter grâce à l'outil de calcul Excel. Tandis que les temps de fonctionnement des installations (=disponibilité), le rendement du réseau de transport, les données d'évolution démographique et climatique, le facteur de forme urbaine (=degré d'urbanisation) et les performances énergétiques des systèmes de production préexistants sont à trouver dans la littérature. Il est alors possible de calculer le bilan de production d'énergie du territoire-quasi-zéro-énergie autonome ($Q_{p,i}$) grâce à l'intégration des 3 variables que sont les performances des infrastructures de production, le taux de renouvellement de ces installations, et le degré d'urbanisation du territoire.

3.5| LA REGLE DES 4A

Sur base de l'étude de résilience urbaine décrite dans l'état de l'art (cf. § 2.1.1|A| page 9), il est possible de transposer les quatre critères de résilience énergétique à l'échelle d'un territoire-quasi-zéro-énergie autonome (Sharifi & Yamagata, 2016).

Cette section s'applique à adapter leurs définitions à celle du TqZEA, et à établir des indicateurs de mesure quantitatifs pour ces quatre attributs, sur une période prospective d'environ 30 ans. Les indicateurs, créés pour ce cas d'étude, sont fixés de manière à ce que chaque défaillance décrite dans l'étude de prospective de transition énergétique (cf. §2.1.2|D|) soit considérée, et à ce que les progrès en matière d'énergie et de développement durable puissent être mesurés au niveau territorial. Pour chaque critère, deux indicateurs sont imaginés. Un pour évaluer les scénarios de consommation d'énergie du stock bâti, un autre pour les scénarios de production d'énergie.

3.5.1| INDICATEURS D'UN TERRITOIRE-QUASI-ZERO-ENERGIE AUTONOME

Les acteurs de la construction et de l'énergie ont besoin de moyens de mesure et d'évaluation des effets actuels et futurs de la consommation d'énergie sur la société, l'environnement et l'économie. Pris ensemble les indicateurs donnent une image globale du système énergétique, y compris les liens et les compromis entre les différentes dimensions du développement durable, ainsi que les implications à plus long terme des décisions prises. Les changements dans les valeurs des indicateurs dans le temps marquent les progrès ou l'absence de progrès vers le développement durable. (Vera & Langlois, 2007)

A| AVAILABILITY

On définit l'availability comme la qualité nécessaire d'efficacité énergétique du territoire lorsqu'il vise le zéro-énergie et qu'il est exploité dans des conditions définies dans un environnement durable.

INDICATEURS DE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE – REDUCTION DE LA CONSOMMATION

L'indicateur d'availability se doit de mesurer la capacité d'un système énergétique à fonctionner à un intervalle de temps spécifié, tout en assurant la durabilité du système par la reconnaissance des incertitudes futures, et des risques potentiels qui peuvent constituer une menace pour la disponibilité des sources d'énergie. (Sharifi & Yamagata, 2016)

Un danger potentiel pouvant mettre à mal cette disponibilité des services est le manque d'efficacité du système énergétique. L'efficacité énergétique d'utilisation finale est une matière importante qui affecte les systèmes énergétiques et définit les tendances en matière de durabilité. En réduisant les quantités d'énergie consommées, les améliorations de l'efficacité énergétique se traduisent par des progrès vers le développement durable. Ces améliorations de l'efficacité s'obtiennent grâce à des évolutions dans les processus liés à l'énergie et au changement du comportement des acteurs de terrain (Vera & Langlois, 2007).

En d'autres termes, si le système énergétique mis en place sur le territoire est efficace, il favorisera la disponibilité. L'efficacité de la production est dès lors impossible sans une réduction de la consommation d'énergie.

On introduit donc un indicateur ($\Gamma_{avail}^{rédu}$) de réduction de la consommation énergétique. Il correspond à un taux de réduction dit "calculé" associé à chaque scénario de réhabilitation du parc bâti. On le fixe non pas sur l'entièreté de la période de transition mais comme le

rapport entre la consommation en énergie finale du bâtiment relatif à un scénario de réhabilitation en fin de cycle (ici 2050) et la consommation en énergie finale du bâtiment à l'année initiale d'étude (ici 2018). Cela permet d'examiner la réduction prévisionnelle de demande énergétique suivant l'objectif fixé à la fin de la période de transition énergétique de la stratégie.

Notons que l'allure de la consommation en énergie finale du bâtiment sur l'entièreté de la période de transition est intégrée à un des indicateurs d'acceptability (pente moyenne).

$$\Gamma_{avail}^{redu} = 1 - \frac{\overbrace{Q_{b,c}}^{[1]}}{\left(\frac{m_0}{m_{ref}} * \underbrace{Q_{b,ch,0}^{DJ,r}}_{[9]} + \underbrace{Q_{b,ch,0}^{DJ,nr}}_{[9]} + m_0 * S_m * E_{b,el,ref}^r + S_{ref} * E_{b,el,ref}^{nr} \right)} \quad [19]$$

Γ_{avail}^{redu}	= taux de réduction de la consommation énergétique calculé	[%]
$Q_{b,c}$	= consommation en énergie finale du bâtiment, à l'année c (2050)	[kWh/an]
m_0	= effectif de logements à l'année initiale	[log]
m_{ref}	= effectif de logements de l'année de référence (cf. 4.1.2 B)	[log]
$Q_{b,ch,0}^{DJ}$	= consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments $\begin{cases} r = \text{résidentiels} \\ nr = \text{tertiaires} \end{cases}$, en fonction des degrés-jours, à l'année initiale	[kWh/an]
$E_{b,el,ref}$	= consommation spécifique d'électricité des bâtiments $\begin{cases} r = \text{résidentiels} \\ nr = \text{tertiaires} \end{cases}$, suivant le scénario de référence (cf. §4.1.2 B)	[kWh/m ² .an]
S_m	= superficie moyenne de logements (cf. 4.1.2 B)	[m ² /log]
S_{ref}	= superficie de bâtiments tertiaires de l'année de référence (cf. 4.1.2 B)	[m ²]

INDICATEURS DE PRODUCTION ENERGETIQUE – FACTEUR DE DISPONIBILITE

En plus de l'efficacité énergétique, un indicateur énergétique dit disponible doit prendre en compte le thème de la sécurité d'approvisionnement.

Aborder la sécurité d'approvisionnement en énergie est l'un des principaux objectifs de développement durable de nombreux pays car les interruptions de l'approvisionnement énergétique peuvent entraîner de sérieux dommages financiers et sociaux. Pour soutenir les objectifs du développement durable, l'approvisionnement en énergie doit être suffisant et abordable. La suffisance se traite dans le critère d'availability (l'abordabilité dans celui d'affordability). La disponibilité de stock d'énergie produite est un indicateur utile pour évaluer la sécurité énergétique. (Vera and Langlois, 2007)

Ainsi, on introduit un taux de disponibilité de la production (Γ_{avail}^{dispo}) qui atteste de la proportion de temps par an pendant lequel un système de production d'énergie est en état de fonctionnement. Mathématiquement, ce taux de disponibilité est exprimé comme le rapport entre l'énergie effectivement produite pendant un intervalle donné (1 an) et celle qui aurait été produite sur la même période si l'outil de production analysé avait fonctionné continuellement.

$$\Gamma_{avail}^{dispo} = \frac{1}{8760 * c} \sum_{i=1}^c \frac{\overbrace{Q_{p,i}}^{[15]}}{\underbrace{\frac{Q_{p,i}^{hydro}}{d_{hyd}}}_{[16]} + \underbrace{\frac{Q_{p,i}^{\delta,eolien}}{d_{eol}}}_{[17]} + \underbrace{\frac{Q_{p,i}^{\delta,pv}}{d_{pv}}}_{[18]} + \frac{Q_p^{\varepsilon}}{d_{\varepsilon}}} \quad \text{pour} \quad \begin{cases} \tau_{prod}^{hyd} \rightarrow 10^9 \\ \tau_{prod}^{eol} \rightarrow 10^9 \\ \tau_{prod}^{PV} = 100\% \\ C = 100\% \end{cases} \quad [20]$$

Γ_{avail}^{dispo}	= taux de disponibilité de la production	[%/an]
c	= cycle d'équilibre (ici 32 ans) 8760 = nombre d'heures dans une année [h/an]	[an]
$Q_{p,i}$	= production d'énergie finale renouvelable sur-site, à l'année i	[GWh/an]
$Q_{p,i}^{hydro}$	= énergie de production des grandes infrastructures hydroélectriques	[GWh/an]
$Q_{p,i}^{\delta,eolien}$	= énergie de production des grandes infrastructures éoliennes	[GWh/an]
$Q_{p,i}^{\delta,pv}$	= énergie de production des infrastructures photovoltaïques	[GWh/an]
Q_p^{ε}	= énergie finale de production des infrastructures préexistantes	[GWh/an]
d	= nombre d'heures de disponibilité des services énergétiques $\begin{cases} hyd = \text{hydroélectriques} \\ eol = \text{éoliens} \\ pv = \text{photovoltaïques} \\ \varepsilon = \text{préexistants} \end{cases}$ par an	[h/an]
τ_{prod}^{hyd}	= taux de production d'énergie issue des centrales hydroélectriques	[site]
τ_{prod}^{eol}	= taux de production d'énergie issue des parcs éoliens	[unité]
τ_{prod}^{PV}	= taux de production des panneaux photovoltaïques	[%]
C	= pourcentage de couverture de la surface étudiée en panneaux photovoltaïques	[%]

Imposer de grandes valeurs aux taux de production et au pourcentage de couverture permet de décrire la grandeur vers laquelle va tendre le taux de disponibilité à très long terme. On se place dans un cas où la puissance de production est au minimum un milliard de fois supérieure à la puissance de production réelle. Cette théorie correspondant à un territoire hypothétique d'efficacité optimal, autorisant ainsi l'omission des diverses erreurs de calcul qui surviennent lors des approximations, ou par l'intégration simultanée de courbes d'allures quasi linéaires (Q_p^{ε} , $Q_{p,i}^{\delta,eolien}$, $Q_{p,i}^{hydro}$) et logarithmiques ($Q_{p,i}^{\delta,pv}$).

B| ACCESSIBILITY

L'accessibility caractérise le niveau de desserte en énergie et renvoie à l'importance de la proximité entre l'offre et la demande énergétique. Elle implique la distribution équitable des services énergétiques en terme de quantité et de qualité. (Sharifi & Yamagata, 2016)

Le critère d'accessibility transpose l'importance de la relation qui existe entre un type de système de production et un scénario de consommation d'énergie.

En effet, au vu des scénarios prospectifs proposés dans cette stratégie de transition vers un TqZEA, on réalise que l'offre des services de production d'énergie dépend de ressources collectives et individuelles.

On appelle énergie du collectif, l'énergie finale et renouvelable produite par les infrastructures énergétiques de grande échelle, dans les limites du territoire, pouvant être consommée pour l'ensemble des bâtiments du territoire.

L'énergie individuelle est quant à elle définie comme l'énergie finale et renouvelable produite par un particulier, et ne pouvant être consommée que par le bâtiment qui la produit. Cette dernière source de production d'énergie est fonction des scénarios prospectifs de consommation d'énergie dans la mesure où l'exigence ZE des bâtiments (que l'on retrouve dans les scénarios *PEB+ZE* et *qZE*) impose qu'une partie de la demande d'énergie soit totalement compensée par l'énergie renouvelable produite par le bâtiment.

INDICATEURS DE CONSOMMATION/PRODUCTION ENERGETIQUE – ALLOCATION DES RESSOURCES

On introduit donc un indicateur qui témoigne de la proportion d'énergie consommée par l'ensemble du stock bâti par rapport à celle qui peut être produite sur le territoire durant la période d'équilibre. L'indicateur atteste de la part d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique.

$$\Gamma_{access}^{pc} = \frac{\overbrace{Q_{p,c}}^{[15]}}{\underbrace{Q_{b,c}}_{[1]}} \quad [21]$$

Γ_{access}^{pc}	= part moyenne d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique	[%]
$Q_{p,c}$	= production d'énergie finale renouvelable sur-site, à l'année c (ici 2050)	[GWh/an]
$Q_{b,c}$	= consommation en énergie finale du bâtiment à l'année c	[GWh/an]

Cet indicateur permet également d'établir la quantité d'énergie qui devra être produite de manière complémentaire au niveau du collectif, par l'installation d'infrastructures énergétiques de grande échelle. Cette valeur se calcule grâce à la formule suivante :

$$(100 - \Gamma_{access}^{pc}) = [\%]$$

Une valeur nulle ou négative exprime que d'un point de vue énergétique, au stade du consommateur final, le critère zéro-énergie du TqZEA est respecté. L'énergie finale consommée pour les bâtiments résidentiels et tertiaires est au plus égale à l'énergie renouvelable produite sur-site transportée annuellement vers le réseau du territoire.

C| AFFORDABILITY

L'affordability est une composante d'équité économique et sociale qui engage la distribution abordable des services énergétiques pour l'ensemble des utilisateurs du territoire. (Sharifi & Yamagata, 2016)

La dimension sociale du développement énergétique durable reflète la nécessité pour la population d'avoir accès à des services énergétiques de base à des prix abordables puisque les prix de l'énergie finale ont une importance économique évidente.

INDICATEURS DE CONSOMMATION ENERGETIQUE – RENTABILITE DE LA RENOVATION

Les impacts de la consommation d'énergie peuvent survenir à tous les niveaux (environnementaux, sociétaux et économiques) et à toutes les échelles (ménage, lieu de travail, communauté et ville, territoire, etc.). Ces impacts varient considérablement en fonction de l'utilisation de l'énergie, des mesures de régulation énergétique et des structures de tarification connexes. (Vera & Langlois, 2007)

Un enjeu majeur attaché à la transition vers un territoire-zéro-énergie autonome s'articule autour de la rénovation du parc immobilier. On suppose dès lors qu'une lourde part de l'investissement financier disparaît à ce dessein.

L'indicateur de rentabilité que l'on introduit est dépendant du taux de rénovation, ainsi que du prix relatif nécessaire à la rénovation d'un bâtiment suivant l'exigence de performance énergétique imposée.

Etablir un montant fixe nécessaire à la rénovation d'un bâtiment est une étape complexe. Il est plus simple d'établir une valeur moyenne de base et d'évaluer le reste en terme de proportions.

Ex : on estime que rénover une maison suivant les normes passives coûte environ 15 % de plus que pour une maison suivant la réglementation PEB. Le prix relatif nécessaire à la rénovation lourde de la maison suivant la réglementation PEB (valeur de référence) sera fixé à 100% tandis que celui équivalent à la maison passive vaudra 115%. On multipliera cette proportion par le coût moyen d'une rénovation lourde pour obtenir le coût total suivant le scénario de réhabilitation.

$$\Gamma_{\text{afford}}^{\text{renov}} = \left(\underbrace{m_c^\rho}_{10} * S_m * \Pi_{sc,b}^r + \underbrace{S_c^\rho}_{5} * \Pi_{sc,b}^{nr} \right) * \Pi_m^\rho \quad 22$$

$\Gamma_{\text{afford}}^{\text{renov}}$	= financement relatif nécessaire à la rénovation du parc bati	[€]
$m_{i=c}^\rho$	= effectif de logements rénovés à l'an c (ici 32 ^{ème} année)	[log]
S_m	= superficie moyenne de logement (=123,21 cf. §4.1.2 B)	[m ² /log]
$S_{i=c}^\rho$	= superficie de bâtiments tertiaires rénovés à l'an c (ici 32 ^{ème} année)	[m ²]
$\Pi_{sc,b}^r$	= coût relatif nécessaire à la rénovation d'un bâtiment résidentiel suivant le scénario de consommation (cf. §4.1.2 C)	[%]
$\Pi_{sc,b}^{nr}$	= coût relatif nécessaire à la rénovation d'un bâtiment tertiaire suivant le scénario de consommation (cf. §4.1.2 C)	[%]
Π_m^ρ	= coût moyen nécessaire à la rénovation lourde d'un bâtiment résidentiel suivant le scénario de référence	[€/m ²]

INDICATEURS DE PRODUCTION ENERGETIQUE - RENTABILITE DE LA PRODUCTION

Comme dit plus tôt, l'approvisionnement en énergie doit être abordable pour soutenir les objectifs du développement durable. Un approvisionnement autonome et efficace de l'énergie est la clé d'une utilisation efficace de celle-ci. (Vera & Langlois, 2007)

L'autonomie du territoire s'acquiert principalement par la production suffisante et abordable d'énergie renouvelable (ER) sur-site.

L'indicateur de rentabilité introduit se concentre sur la production d'énergie à la fin du cycle de transition. Il dépend de la part d'énergie renouvelable envisagée à la fin du cycle de transition, du nombre final d'infrastructure nécessaires pour respecter cette part d'ER dans la consommation en énergie du bâtiment, ainsi que du prix relatif nécessaire à la construction d'une infrastructure de production d'énergie à grande et à petite échelle.

$$\Gamma_{afford}^{prod} = \Pi_{m,hyd}^{prod} * \frac{\overbrace{Q_{p,c}^{y,hydro}}^{16}}{d_{hyd}} + \Pi_{m,eol}^{prod} * \frac{\overbrace{Q_{p,c}^{\delta,eolien}}^{17}}{d_{eol}} + \Pi_{m,pv}^{prod} * \frac{\overbrace{Q_{p,c}^{\delta,pv}}^{18}}{d_{pv}} \quad [23]$$

Γ_{afford}^{prod}	= investissement de construction des infrastructures de production d'énergie renouvelable du territoire	[€]
$\Pi_{m,hyd}^{prod}$	= prix nécessaire à la construction d'une infrastructure de production, suivant la source de production d'électricité $\left\{ \begin{array}{l} hyd = \text{hydroélectriques} \\ eol = \text{éoliens} \quad (\text{cf. §4.1.3 D }) \\ pv = \text{photovoltaïques} \end{array} \right.$	[€/kW]
$Q_{p,c}^{y,hydro}$	= énergie de production des grandes infrastructures hydroélectriques, à l'année c (ici 2050)	[kWh/an]
$Q_{p,c}^{\delta,eolien}$	= énergie de production des grandes infrastructures éoliennes, à l'année c (ici 2050)	[kWh/an]
$Q_{p,c}^{\delta,pv}$	= énergie de production des infrastructures photovoltaïques, à l'année c (ici 2050)	[kWh/an]
d	= nombre d'heures de disponibilité des services énergétiques $\left\{ \begin{array}{l} hyd = \text{hydroélectriques} \\ eol = \text{éoliens} \quad \text{par an (cf. §4.1.3 B)} \\ pv = \text{photovoltaïques} \end{array} \right.$	[h/an]

D| ACCEPTABILITY

Dans le contexte des systèmes énergétiques, le concept d'acceptabilité implique la mobilisation collective des parties prenantes pour surmonter les obstacles sociaux et environnementaux.

INDICATEURS DE CONSOMMATION ENERGETIQUE – PENTE MOYENNE

D'après plusieurs études, l'accès limité aux services énergétiques marginalise généralement les populations les plus pauvres et limite sérieusement leur capacité à améliorer leurs conditions de vie. Or, la justice sociale est l'une des valeurs fondamentales du développement durable qui implique le degré d'équité avec lequel les systèmes énergétiques sont rendus acceptables (Vera & Langlois, 2007).

Après avoir assuré l'efficacité et la rentabilité du service énergétique, on peut se poser la question de savoir s'il est aisément réalisable ou pas. L'acceptabilité se comprend donc comme la facilité avec laquelle on atteint l'objectif de consommation annuelle d'énergie en sous-entendant que plus un service énergétique est facilement réalisable, meilleur est son acceptation au sein des usagers.

En conséquence, on introduit un indicateur (Γ_{access}^{pente}) qui décrira l'allure de la courbe de consommation d'énergie finale du territoire. Cet indice dépend de la pente de la courbe de consommation, et subit une sanction de sa valeur suivant le signe de cette dernière. Le fait qu'il y ait une augmentation de la consommation finale d'une année à une autre est vigoureusement sanctionné, de même qu'un différentiel de la consommation trop important. La volonté principale étant de se concentrer sur la manière dont on arrive au but, plutôt que de se concentrer strictement sur l'objectif en lui-même.

$$\Gamma_{accept}^{pente} = \sum_{i=1}^c y_i \quad avec \quad y_i = \begin{cases} 10|Q_{b,i-1} - Q_{b,i}| & si \quad Q_{b,i-1} - Q_{b,i} \leq 0 \\ 2|Q_{b,i-1} - Q_{b,i}| & si \quad Q_{b,i-1} - Q_{b,i} > 0 \end{cases} \quad [24]$$

Γ_{accept}^{pente}	= indice de "pente moyenne" de la consommation en énergie finale du bâtiment	-
c	= cycle d'équilibre (ici 32 ans)	[an]
$Q_{b,i}$	= Consommation finale en énergie du bâtiment	[100GWh/an]

Pour chaque scénario de consommation va être attribuer un indice de "pente moyenne". On considère que la plus petite valeur de Γ_{accept}^{pente} traduit le scénario le plus acceptable, étant donné que c'est celui qui admet la transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome la plus douce.

INDICATEURS DE PRODUCTION ENERGETIQUE

On définit l'acceptability comme le caractère de suffisance du territoire lorsqu'il est exploité dans des conditions permettant la justice environnementale et sociétale. (Sharifi & Yamagata, 2016)

De manière à prendre en compte la justice environnementale, l'analyse d'acceptability porte sur des critères paysagers de rapports d'échelles entre les dispositifs envisagés et les composantes naturelles du paysage, de portée identitaire du paysage (valeur patrimoniale, touristique, etc.), et d'urbanisation préexistante ou non (routes, usines, etc.). Globalement, on distingue les zones non destinées à l'urbanisation telles que les zones d'intérêt paysager, les zones d'espaces verts, les zones naturelles et de parc des zones vouées à l'urbanisation. (DGO4, 2015)

Ainsi on concentre la construction des parcs énergétiques sur :

- Les zones d'habitat : principalement destinées à la résidence ;
- Les zones de services publics et d'équipements communautaires (excepté les centres d'enfouissement technique =CET)
- Les zones d'activités économiques mixtes ou industrielles : destinées aux activités d'artisanat, de service, de distribution, de recherche ou de petite industrie ; et aux activités liées à un processus de transformation de matières premières ou semi-finies, de conditionnement, de stockage, de logistique ou de distribution ;

Cette justice environnementale porte aussi sur les conséquences sur l'environnement suite à l'intégration d'infrastructure de production d'énergie.

La notion de durabilité sociale est quant à elle complexe à définir car elle comprend de nombreux critères tels que la cohésion communautaire, le bien-être humain, l'éducation ou le dialogue entre les citoyens et les acteurs qui prennent les décisions. (Vera & Langlois, 2007). Néanmoins, ces derniers ont une finalité en commun : réduire les contestations de la part de la société face aux projets de développement grâce à l'acceptation.

L'indicateur d'acceptability que l'on introduit témoigne ainsi de la proportion d'énergie produite de manière acceptable durant la période d'équilibre choisie. L'énergie acceptable désignant la quantité d'énergie renouvelable produite sur-site qui répond aux critères d'affectation du territoire (le dispositif de production est localisé sur une des 3 affectations présentée ci-dessus), d'impact environnemental (le système de production n'affecte pas son environnement proche) et d'acceptation sociale (la plus grande part des usagers du territoire est favorable à l'utilisation du dispositif de production).

Dans ce cas d'étude, l'acceptation indique la validation des systèmes de production d'énergie par la collectivité. On l'évalue de façon direct par la méthode du « tout ou rien ». De cette manière, un système de production est acceptable (ou ne l'est pas) vis-à-vis d'une des 2 exigences.

- Si le système est acceptable socialement et environnementalement, l'énergie acceptable équivaut à l'énergie produite.
- Si le système est acceptable environnementalement, l'énergie acceptable équivaut à 75% de l'énergie produite.
- Si le système est acceptable socialement, l'énergie acceptable équivaut à 50% de l'énergie produite.
- Si le système n'est ni acceptable socialement ni environnementalement, l'énergie acceptable produite est nulle.

On considère qu'il est plus acceptable de répondre à l'exigence de justice environnementale que sociale car, à ce jour, il est plus aisé de faire changer les opinions que les techniques de production, notamment grâce à la participation sociale, l'information ou l'éducation.

$$\Gamma_{accept}^{prod} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \frac{Q_{p,i}^{acc}}{\underbrace{Q_{p,i}}_{15}}$$

25

Γ_{access}^{prod}	= part moyenne d'énergie renouvelable dans la production énergétique	[%/an]
c	= cycle d'équilibre (ici 32 ans)	[an]
$Q_{p,i}^{acc}$	= Quantité d'énergie produite sur-site qui est acceptable au regard des deux critères à l'année i	[GWh/an]
$Q_{p,i}$	= production d'énergie finale renouvelable sur-site, à l'année i	[GWh/an]

3.5.2| CRITERES DE COMPARAISON

La mesure et l'analyse des indicateurs permettent de connaître les performances du territoire-quasi-zéro-énergie autonome, et pouvoir anticiper ses besoins futurs.

On résume ces indicateurs Tableau 9 suivant les 4 critères de résilience du territoire. Chaque critère répondant à une catégorie d'indicateur, pour chaque scénario de consommation et de production, vont être associés 7 indicateurs.

Tableau 9 : Indicateurs de résilience du territoire-quasi-zéro-énergie autonome

	Availability	Accessibility	Affordability	Acceptability
	Indicateurs d'efficacité	Indicateurs de proximité	Indicateurs de rentabilité	Indicateurs d'équité sociale et environnementale
Consommation	Taux de réduction de la consommation calculé $\Gamma_{avail}^{rédu}$ [%]	Facteur d'allocation des ressources Γ_{access}^{pc} [%]	Cout moyen de rénovation du parc bâti Γ_{afford}^{renov} [€]	Indice de pente moyenne Γ_{accept}^{pente} [-]
Production	Facteur de disponibilité Γ_{avail}^{dispo} [%/an]		Cout moyen de production Γ_{afford}^{prod} [€]	Taux d'énergie acceptable Γ_{accept}^{prod} [%/an]

Le suivi des performances du territoire-quasi-zéro-énergie autonome par des données chiffrées des indicateurs est essentiel pour valider les hypothèses établies, mettre en évidence les échecs et déterminer les actions pertinentes. Cependant, à ce stade de l'étude, il n'existe aucun historique de données pour comparer les valeurs calculées dans ce travail de recherche. La qualité d'efficacité des indicateurs en terme de robustesse, et de pertinence est évaluée de manière subjective. La valeur de chaque indicateur présenté n'a dès lors d'intérêt que lorsqu'elle est utilisée en comparaison d'une autre.

Au sortir de cette analyse comparative personnelle, on détermine une valeur résultante associée à un scénario prospectif de consommation/production d'énergie.,

Ce résultat se traduit par une somme pondérée (fonction exponentielle de base 2) du résultat de chaque indicateur dépendant d'un critère. Comme indiqué Tableau 10.

En attribuant une cote de 2 au scénario qui ressort du lot, -2 à celui qui ne répond pas au critère, et 1 aux autres, on arrive à les comparer en mettant en évidence les scores les plus élevés. Il est également possible d'imputer en plus une cote bonus de 0 à un scénario qui se démarquerait vraiment dans un indicateur.

Tableau 10: Exemple de bilan des scénarios vis à vis des 4A

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Indicateur 1	2	1	-2
Indicateur 2	2+0	1	1
Indicateur 3	1	1	2
Indicateur 4	1	2	1
TOTAL	$\sum 2^x = 13$	$\sum 2^x = 10$	$\sum 2^x = 8,25$

Dans cette première phase de méthodologie de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome, on fait l'hypothèse que chaque critère à une importance égale. Bien que selon l'étude de résilience énergétique urbaine (Sharifi & Yamagata, 2016), le critère d'availability prenne une importante majeure dans la caractérisation de la résilience urbaine, et qu'il existe une corrélation très forte entre l'availability et l'accessibility. (ces liens sont représentées Fig. 9. Plus la ligne en trait continu est épaisse, plus la corrélation est forte).

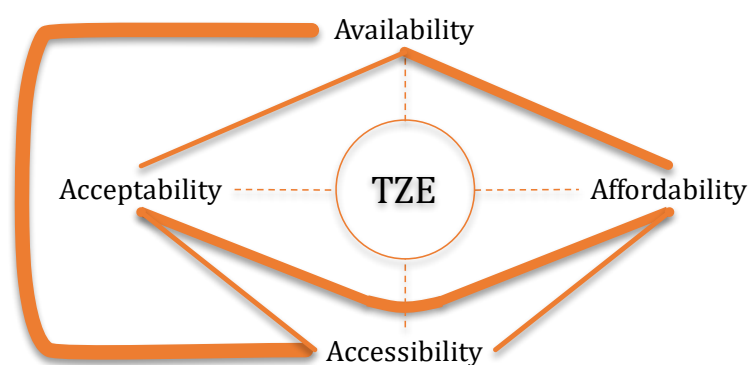


Fig. 9: Représentation schématique des relations entre les 4A

Toutefois, comme défini lors de l'établissement des critères des 4A, l'availability est une condition nécessaire (mais pas suffisante) à la résilience d'un TqZEA. Par conséquent, on impose une valeur minimum à l'indicateur d'efficacité qui correspond au taux de réduction de la consommation d'énergie calculé ($\Gamma_{\text{avail}}^{\text{rédu}}$). On dénomme cette valeur comme étant le taux de réduction de la consommation d'énergie envisagé ($\tau_{\text{rédu}}^{\text{envisage}}$). Si un scénario n'y répond pas, il sera considéré comme non réalisé pour les autres critères.

CHAPITRE 4| APPLICATION



4.1| PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

Une simulation sur cas réel est réalisée grâce à la création d'un outil de calcul interactif, afin d'identifier l'efficacité des critères et des indicateurs développés plus tôt, et valider la méthodologie de transition vers un TqZEA. La limite du territoire choisie est celle de la Région Wallonne. Tandis que le bilan énergétique considéré inclut la consommation des bâtiments résidentiels et tertiaires, ainsi que la production d'énergie renouvelable sur-site.

Les paragraphes qui suivent s'attèlent à présenter brièvement le cas d'étude et les performances énergétiques de celui-ci, l'interface de l'outil de calcul Excel, et les résultats associés à cette stratégie de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome.

4.1.1| LE TERRITOIRE WALLON

La Région Wallonne (RW) est une région francophone du sud de la Belgique, constituée des provinces du Brabant wallon, de Hainaut, de Liège, de Luxembourg et de Namur.

En 2018, la Région Wallonne couvrait une superficie de 16844 km², et avait une population de 3624377 habitants pour 215,2 habitants au km². (Statbel, 2018)

La Belgique est un état fédéral composé de trois régions (Bruxelles-Capitale, la Région Flamande et la Région Wallonne), et de trois communautés linguistiques (flamande, française et germanophone).



Fig. 10: Géolocalisation de la Région Wallonne, source [Wikipédia]

Les principales institutions fédérales sont le gouvernement fédéral et le Parlement fédéral. Les communautés et les régions ont également leurs propres organes législatifs et exécutifs.

Dans la politique énergétique, les compétences sont partagées entre le gouvernement fédéral et les régions.

Au niveau fédéral, les questions d'énergie (sécurité d'approvisionnement, plans d'investissement nationaux pour l'électricité ; tarifs de transport, énergie éolienne offshore, biocarburants, etc.) sont traitées par la Direction générale de l'énergie, les PME, les travailleurs indépendants et l'énergie. Le ministère de la santé publique, de la sécurité de la chaîne alimentaire et de l'environnement est responsable des questions environnementales.

Les trois régions ont des pouvoirs pour les questions territoriales, telles que les travaux publics, l'agriculture, l'emploi, la planification urbaine et rurale et l'environnement.

Responsabilités régionales

- réglementation des marchés de détail du gaz et de l'électricité ;
- distribution et transport d'électricité (réseau électrique <70 kV) ;
- équipements et réseaux de chauffage urbain ;
- sources d'énergie renouvelables (sauf énergie éolienne offshore) ;
- récupération de l'énergie résiduelle de l'industrie ou d'autres utilisations ;
- promotion de l'utilisation efficace de l'énergie ;
- questions de recherche et de développement énergétique.

En Région Wallonne, la direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire du logement, du patrimoine et de l'énergie (DGO4) gère la politique énergétique.

Politique énergétique

Bon nombre des objectifs de la politique énergétique belge proviennent de l'Union Européenne (UE). Par exemple, la législation de l'UE en matière de réduction des gaz à effet de serre, d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique pour 2020 façonnent la politique énergétique de la Belgique.

Depuis 2009, les gouvernements fédéraux et régionaux ont lancé une série d'initiatives pour atteindre leurs objectifs politiques et respecter leurs obligations envers l'UE. Néanmoins, avec les seules mesures existantes, la Belgique n'est pas en voie d'atteindre son objectif de 2020 sans que le gouvernement ne prenne des mesures supplémentaires.

La politique wallonne de développement territoriale oriente la viabilité environnementale des systèmes d'énergie renouvelables. L'application de ces directives dans cette stratégie de transition permettra d'éliminer certains scénarios inacceptables.

Les investissements se concentrent sur les mises à niveau du réseau nécessaire pour connecter la production renouvelable, et pour faire face au vieillissement du réseau de distribution.

A | RESEAU DE DISTRIBUTION D'ENERGIE

De manière générale, contrairement aux réseaux de chaleur, les réseaux de distribution électriques présentent des déperditions relativement faibles à l'échelle d'un territoire. Le réseau de distribution d'électricité belge est efficace par rapport à la moyenne mondiale de pertes de transmission et de distribution d'énergie électrique qui est de 9,24%.

On suppose pour le territoire wallon des pertes d'énergie moyennes de 4,98% dues à sa transmission et sa distribution. (The World Bank Group, 2018)

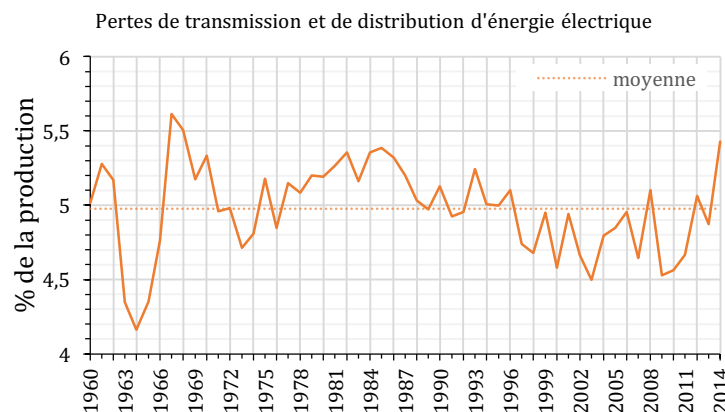


Fig. 11: Pertes de transmission et de distribution d'énergie électrique [The World Bank Group, 22/02/2018]

Etant donné que le vecteur énergétique est de même type que l'énergie primaire produite, il n'y a pas de conversion d'énergie à considérer. On peut dès lors garder la valeur de $f_t=4,98\%$ pour le facteur de pertes et conversion du système.

B | DEGRE D'URBANISATION DU TERRITOIRE QZEA

L'étalement urbain est un phénomène particulièrement développé en Wallonie. On constate que $\approx 50\%$ des quartiers wallons peuvent être caractérisés de périurbains sur base d'une analyse cartographique. (Reiter et al., 2014)

Selon une étude de la Commission Européenne, une méthodologie a été réalisée afin de mettre en évidence la distribution de la population à l'intérieur d'une unité administrative

locale en découpant le territoire en carreaux de 1 kilomètre de côté, et de classer les communes d'un territoire en trois zones de différents niveaux de densité en utilisant un critère de contiguïté géographique et des valeurs minimales de population. Cette méthode est appelée par l'Europe "nouveau degré d'urbanisation". (IWEPS, 2016)

Sur base de l'étude de l'Eurostat (2018), les 3 catégories peuvent se classer comme suit⁸ :

- territoire urbain :
 - au moins 50% de la population vit dans des communes à haute densité ;
 - au moins 75% de la population vit dans des communes densément peuplées.
- territoire périurbain :
 - moins de 50% de la population vit dans des communes à haute densité ;
 - moins de 50% de la population vit dans des communes faiblement peuplées.
- territoire rural :
 - plus de 50% de la population vit dans des communes faiblement peuplées.

Comme on l'observe Fig. 12, le degré d'urbanisation wallon est divisé en 3 catégories, le périurbain équivalent à une zone densément peuplée, l'urbain égal à une zone de densité intermédiaire et la rurale à une zone faiblement peuplée.

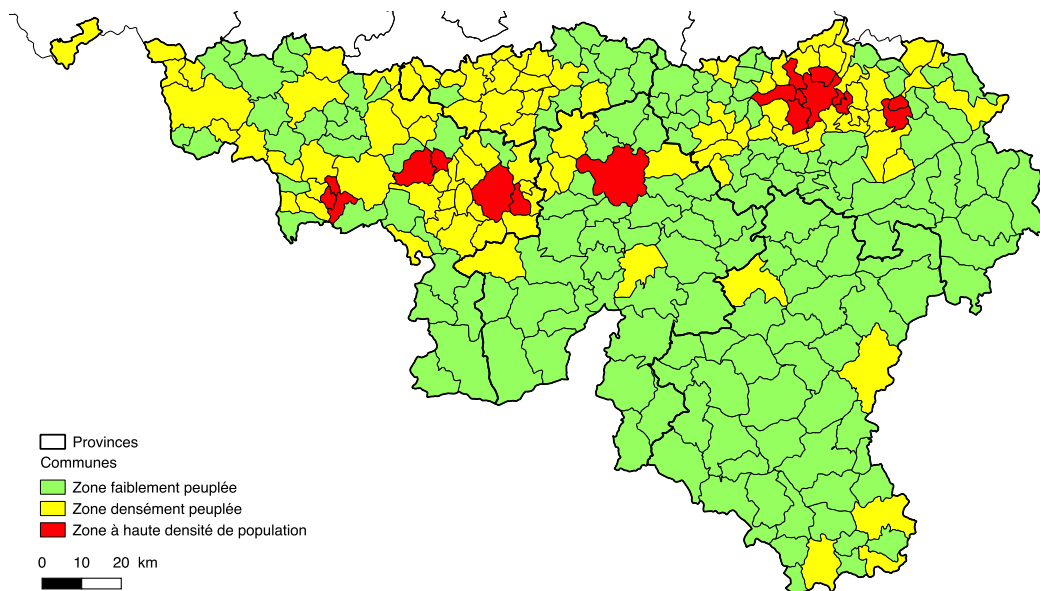


Fig. 12 : Degré de densité de population des communes wallonnes au 01/01/11, sources [(IWEPS, 2016)]

Sur base des statistiques de population par commune selon la nationalité et le sexe au 01/01/2018 (Statbel, 2018), on calcul qu'en Région Wallonne, 27,9% de la population vit dans des communes à haute densité; 44,5% vit dans des communes densément peuplées ; et 27,6% vit dans des communes faiblement peuplées. Le territoire est donc considéré comme périurbain.

Grace au degré d'urbanisation moyen, il est possible de discuter certains choix au niveau de la production d'énergie photovoltaïque. Le territoire Wallon étant globalement périurbain, on établit notamment que le facteur de réduction lié à la forme urbaine (**f_m**) équivalait donc à **0,97**.

⁸ En Annexe D, on retrouve deux cartes belges représentant le degré de classification de l'urbanisation par carreau et par commune, et un exemple du type de cluster et du degré d'urbanisation du territoire.

4.1.2 | STRUCTURE DU PARC IMMOBILIER

A | TAUX DE RENOUVELLEMENT DU PARC BATI

En Belgique, le taux de rénovation lourde (τ_ρ) du parc existant tourne autour de 0,5% par an (0,8% pour les rénovations légères). Les taux de construction (τ_v) et de démolition (τ_δ) évoluent quant à eux aux alentours de 1% et 0,075% respectivement. Mais ces taux ne sont pas suffisant pour réduire de manière conséquente les performances du stock bâti existant, même en imposant l'application des principes passifs.

Pour arriver aux exigences d'un territoire-quasi-zéro-énergie autonome, il faut donc agir sur les taux de renouvellement du parc immobilier belge. L'action se développe ainsi autour de l'augmentation du taux de rénovation. Les bâtiments à rénover jouant une grande importance dans la réduction des besoins énergétiques d'un territoire. Le taux de rénovation dépend du scénario préalable et est au minimum doublé. Ce facteur d'augmentation peut paraître excessif, mais il n'atteint pas les exigences que l'on devrait imposer pour répondre aux contraintes établies dans le plan climat (accroître l'efficacité énergétique de 27% d'ici à 2030). (Ruellan, 2016)

B | DEMANDE ENERGETIQUE DU STOCK BATI

On estimait en 2012 les consommations totales finales à 31,1[TWh/an] pour le secteur résidentiel, et 13,6[TWh/an] pour le secteur tertiaire. Elles représentaient environ 35% de l'approvisionnement total en énergie en RW, le reste étant utilisé pour l'industrie, le transport l'agriculture ou la production d'électricité. (ICEDD, 2014b)

La demande énergétique des bâtiments que l'on prend comme référence de calcul est résumée Tableau 11.

Chaque valeur est développée dans les sections qui suivent, suivant le type de besoin demandé (chaleur ou électricité). Les consommations d'énergie finale de chauffage et d'électricité du territoire sont aussi déterminées suivant un scénario de référence.

Tableau 11: Consommation spécifique d'énergie d'un bâtiment de référence par secteur

	Résidentiel		Tertiaire
	[kWh/m ² .an]	[kWh/log.an]	[kWh/m ² .an]
Consommation spécifique de chaleur de référence	$E_{b,ch,ref}^r$		$E_{b,ch,ref}^{nr}$
	142,80	17671,04	133,02
Consommation spécifique d'électricité de référence	$E_{b,el,ref}^r$		$E_{b,el,ref}^{nr}$
	25,57	3150,77	68,85
TOTAL	168,37	20982,19	191,68

En 2012, en Wallonie, on estime le nombre total de logements occupés à **1523000 log** (m_{ref}) et à **55,9 km²** (S_{ref}) la surface de bâtiments tertiaires (ICEDD, 2014c).

BESOINS DE CHALEUR

Sur base des données du bilan énergétique de la Région Wallonne, les besoins de chaleur peuvent être présentés par type d'affectation (secteur domestique et tertiaire). Plus spécifiquement, on prend en compte les consommations (=besoins bruts) et non les besoins nets car les besoins nets en énergie sont uniquement liés aux caractéristiques constructives et à la fonction du bâtiment et ne dépendent pas des caractéristiques des installations techniques.

Bâtiments résidentiels

La consommation énergétique présentée Tableau 12 inclut le chauffage principal, l'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage d'appoint pour le secteur résidentiel.

Tableau 12: Consommation standardisée par type de logement en Région Wallonne en 2012 (Vanon, 2017) & (Reiter, 2017) sur base des données de (ICEDD, 2014c)

	Nombre de logements occupés (*10 ³)	Superficie moyenne [m ² /log]	Consommation moyenne de combustible	
			[kWh /log]	[kWh /m ²]
Appartements	302	90,4	10991,61	-
Maison 2 façades	401	116,1	17849,22	-
Maison 3 façades	345	128	20448,32	-
Maison 4 façades	475	146,6	19750,16	-
MOYENNE		123,21	17671,04	143,42

Bâtiments tertiaires

La consommation énergétique présentée Tableau 13 inclut seulement les besoins de chauffage pour le secteur tertiaire. De manière à comparer des éléments à même échelle, il faut quantifier la consommation de combustible pour l'ECS du secteur tertiaire.

Tableau 13: Consommation standardisée par secteur d'activité en Région Wallonne en 2012 (Vanon, 2017) & (Reiter, 2017) sur base des données de (ICEDD, 2014c)

	Surface de plancher [10 ⁶ m ²]	Consommation moyenne de combustible [kWh/m ²]	
		Chauffage	ECS
Commerce	14,5	195,862	+10,98
Enseignement	10,3	116,505	
Culture, sport et autres services	5,6	155,357	
Administration	5,3	141,509	
Soins de santé	7,7	83,117	
Banques, assurances, services aux entreprises	9,5	20	
Transport, communication	2,3	73,913	
Energie et eau	0,6	250	
MOYENNE		122,04	10,98
		133,02	

Eau chaude sanitaire dans les bâtiments tertiaires

On note, sur base des données du bilan énergétique de la Région Wallonne, que la consommation d'eau chaude sanitaire compte pour près de 9% de la consommation de combustibles du secteur tertiaire. (ICEDD, 2014c)

Pour ce travail, la consommation moyenne de combustible est estimée à 122,04 kWh/m².an pour le secteur tertiaire (cf. Tableau 13). De manière simplifiée, on évalue ainsi une valeur de 0,09*122,04 soit **10,98 [kWh/m².an]** pour la consommation de chaleur pour l'ECS du secteur tertiaire.

Les degrés-jours de référence

En Région Wallonne (RW), l'année 2012 est une année prise comme référence en terme de données climatiques. En effet, son nombre de degrés-jours de **1914,7[°C.jours]** est quasi équivalent à la valeur normale des degrés-jours en RW entre 1981 et 2010 soit 1913 degrés-jours, et c'est l'année la plus récente pour laquelle les bilans énergétiques de l'ICEDD sont disponibles. Les consommations d'énergie calculées Tableau 13 se basent donc sur la valeur de degrés-jours de 2012. (Reiter, 2017)

BESOINS D'ELECTRICITE

Bâtiments résidentiels

Selon le bilan énergétique du secteur résidentiel, la consommation électrique moyenne des appareils électroménagers (réfrigérateurs, congélateurs, combiné R+C, lave-Linge, sèche-linge, lave-vaisselle, micro-ondes, télévisions, ordinateurs, éclairage, petit électro, circulateurs, veille) est de 2750 kWh/ménage.an.(ICEDD, 2014c)

La consommation moyenne totale d'électricité par logement tous usages confondus se monte à 4453 kWh/ménage.an. La part des appareils électriques de cuisson correspond à 9% et du bilan total, soit 400,77 kWh/ménage.an (ICEDD, 2014c)

La consommation électrique dans le secteur résidentiel provient de l'éclairage, des appareils électroménagers et des auxiliaires. La consommation électrique d'un auxiliaire est donnée par la part de la consommation liée à l'ensemble des appareils électriques et ventilateurs qui assurent le fonctionnement des installations énergétiques.

On considère donc une valeur de 2750+400,77 soit 3150,77 kWh/ménage.an pour la consommation électrique du secteur résidentiel.

Pour pouvoir comparer des éléments comparables, il est intéressant de ramener la valeur de consommation par ménage, à une consommation spécifique par mètre carré. Comme il sera expliqué par après, on fait l'hypothèse que l'effectif de ménages équivaut à l'effectif de logements occupés au sein du territoire Wallon. On obtient donc un besoin brut en électricité pour un logement de : $3150,77[\text{kWh}/\text{log.an}] \div 123,21[\text{m}^2/\text{log}]$ soit **25,57 kWh/m².an.**

Bâtiments tertiaires

A partir des surfaces de plancher estimées du parc immobilier wallon, de l'emploi (emploi intérieur ICN) et des consommations, il est établi pour les principales branches d'activité du secteur tertiaire, les ratios de consommation d'électricité. La moyenne des consommations spécifiques des principales branches d'activités tertiaires par unité de surface en 2012 est estimée à 104 kWh/m².an. Cette moyenne inclut les consommations spécifiques à l'éclairage (40%), le conditionnement d'air (9%), les pompes et ventilateurs de circulation (7,4%), la climatisation (6,8%), le chauffage et l'eau chaude (3%), et 30% de tout ce qui ne rentre pas dans ces catégories. (ICEDD, 2014c)

Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, la consommation électrique dans le secteur tertiaire provient de l'éclairage, du froid et des auxiliaires.

On considère donc une valeur de $(0,4+0,09+0,074+0,068+0,03)*104$ soit **68,85 kWh/m².an** pour la consommation électrique du secteur tertiaire.

C| COUT DE RENOVATION DU BATI

Une idée répandue actuellement pour une grande majorité de la population est qu'en région Wallonne, la rénovation lourde est souvent plus complexe et moins abordable que la construction de neuf, car il faut tenir compte de l'existant (éléments structurels, morphologie du bati, réseau électrique, voisinage, etc.). Pour beaucoup, rénover son bâtiment à l'état d'un bâtiment neuf coûtera plus cher que de le construire directement. (Leonardi & Attout, 2015)

On estime à environ 800 €/m² le cout moyen de rénovation d'une maison classique, et 600€/m² celle d'un bâtiment tertiaire. Ces rénovations lourdes comprennent l'isolation des parois, le remplacement des menuiseries extérieures, des systèmes de ventilation, de chauffage, de l'électricité, etc. (Travaux.com, 2018)

Il en ressort que l'investissement nécessaire à la rénovation de bâtiments tertiaires équivaut à environ 75% du cout nécessaire à la rénovation de bâtiments résidentiels.

On note en outre que rénover une maison passive est plus cher que rénover une maison classique. Une maison passive coûte plus initialement, mais ces investissements peuvent être rentabilisés à terme grâce aux coûts d'énergie bien plus bas (les factures d'énergie pouvant être réduites de 80-90% dans une maison passive au bout de 10 ans, en comparaison avec des maisons plus traditionnelles). Il faut cependant pouvoir avancer les fonds nécessaires dès le départ.

Le prix d'une rénovation énergétique varie en fonction de la complexité des travaux à réaliser. Il est fortement déterminé par le niveau de performance énergétique à atteindre. Le coût des travaux de rénovation énergétique d'une maison reste en moyenne compris entre 200 et 450 €/m². Une rénovation énergétique lourde comprend l'isolation des parois, la mise en place des portes et de fenêtres à double ou triple vitrage, l'éventuelle installation d'un système de chauffage performant, etc. Pour un habitat ancien très économe passant de la classe énergétique C (170-255 kWh/m²) à la classe B (85-170 kWh/m²), le prix de la rénovation sera au minimum de 200 €/m². Le passage de la classe énergétique C (170-255 kWh/m²) à la classe A (45-85 kWh/m²) coûtera entre 400 et 450 €/m². (Travaux.com, 2018)

De manière générale, on observe que le passage d'une classe de performance double le coût de rénovation du bâtiment.

Dans le cadre de ce travail, on considérera dès lors un coût de **200€/m²** comme prix de référence pour la rénovation d'un bâtiment résidentiel. **25%** du prix seront retirés afin d'obtenir le coût de rénovation d'un bâtiment tertiaire.

4.1.3| SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

A| INSTALLATIONS DE PRODUCTION PREEXISTANTES

La production nette d'électricité renouvelable des vecteurs énergétiques hydraulique, éolien, et solaire photovoltaïque est estimée en 2014 à 2335,8[GWh/an], soit 8,4% de la production nette d'électricité totale. La production nette électrique représente l'électricité utile, avant mise sur réseau, après consommation des auxiliaires des installations. La progression de la puissance des centrales électriques wallonnes est essentiellement due au fait des augmentations de l'efficacité des installations, des éoliennes, mais surtout des panneaux photovoltaïques. (ICEDD, 2016)

Le bilan global de 2014 des sources d'énergie renouvelable exploitées dans ce travail est présenté Tableau 14. Les productions d'électricité hydroélectrique et éolienne sont détaillées par classe de puissance installée. La production d'énergie photovoltaïque est détaillée par secteur d'activité.

En plus de ces 3 sources d'énergie, l'électricité peut également être produite grâce à l'incinération des déchets ménagers organiques. En 2014, la production électrique nette en énergie renouvelable est de **200,3 GWh** et le nombre d'heures de fonctionnement des installations est de **6917** heures à puissance nominale. 4 sites de production sont répartis sur le territoire wallon. (ICEDD, 2016)

Pour ce qui concerne les ressources préexistantes, les valeurs de production électrique nette sont prises de manière globale. On prend en compte la valeur pour toutes les classes de production nette d'électricité ($Q_p^E = 286,5 + 1326,5 + 722,8 + 200,3 = 2536,1$ [GWh/an]), et la durée moyenne d'utilisation qui se réfère à chaque source d'énergie.

Tableau 14: Bilan de valorisation des sources d'énergie renouvelable en Wallonie en 2014 (ICEDD, 2016)

		Nombre de sites	Nombre d'unités	Production électrique nette	Durée moyenne d'utilisation
		-	-	[GWh]	[h]
Hydroélectrique		96	123	286,5	2579
A	Puissance >10MW	3	/	98,2	1964
B	Puissance 1-10MW	11	/	167,2	3195
C	Puissance <1MW	82	/	21,1	2593
Eolien		110	327	1326,5	2074
A	Puissance >3MW	5	24	191	1686
B	Puissance 2-3MW	22	96	490,1	2154
C	Puissance 1-2MW	34	158	639,6	2176
D	Puissance 0,1-1MW	7	7	5,5	1218
E	Puissance <0,1MW	42	42	0,2	538
Photovoltaïque		123776	123776	722,8	897
A	Logement	80,9	/	585,1	910
B	Tertiaire	15	/	108,7	863
C	Industrie	3,8	/	27,3	790
D	Agriculture	0,2	/	1,7	923

B| NOUVELLES INFRASTRUCTURES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

En ce qui concerne les valeurs de disponibilité des nouvelles infrastructures de production, une classe de puissance a été choisie comme référence en terme de durée moyenne d'utilisation du système de production pour chaque vecteur énergétique. Ces classes sont introduites Tableau 14. La classe B a été choisie pour l'hydroélectrique ($d_{hyd}=3195[h]$), et la C pour l'éolien($d_{eol}=2176[h]$), une moyenne pondérée des classes A et B pour le photovoltaïque ($d_{pv}=902,6[h]$).

Pour rappel, le facteur de mix énergétique du territoire se compose d'énergie hydroélectrique, photovoltaïque, et de sources d'énergie renouvelable préexistantes pour le scénario de transformation *HYD*, et d'énergie éolienne, photovoltaïque, et de SER préexistantes pour le scénario *EOL*. Le Tableau 15 récapitule les performances énergétiques des systèmes de production exploités.

Tableau 15:Récapitulatif des performances des nouveaux systèmes de production d'énergie

	Hydroélectrique	Eolien	Photovoltaïque
Puissance nominale	5000[kW/site]	2000[kW/unité]	-
Disponibilité	3195[h/an]	2176[h/an]	902,6[h/an]
Production finale	= 15.179[MWh/an]	=4.135[MWh/unité]	107,50[kWh/m².an]

C| TAUX DE PRODUCTION

L'analyse de l'évolution historique de la production nette de l'électricité des différentes sources d'énergie renouvelable se fait sur base du rapport de l'institut de conseil et d'études en développement durable (ICEDD, 2016). Ces données permettent d'établir un taux de production prospectif moyen qui sera implémenter dans l'outil de simulation.

LA CENTRALE HYDROELECTRIQUE

L'évolution de la production nette de l'électricité se mesure en regard de l'évolution de la quantité des précipitations (à Uccle). De nombreux projets disséminés sur l'ensemble des voies hydrauliques wallonnes vont voir le jour à l'horizon 2020. Théoriquement, les installations existantes et les projets estimés pourraient produire environ 480[GWh]. (ICEDD, 2016).

Soit environ $\frac{\frac{\text{en 2020}}{480} - \frac{\text{en 2014}}{286,5}}{(2020-2014)*\frac{2579}{\text{disponibilité moyenne}}} * 10^6 = 12504,85 \text{ [kW/an]}$ en plus par an. Cela

représente la production d'énergie de $\tau_{\text{prod}}^{\text{hyd}} = 2,5[\text{site}]$ qu'il faudrait édifier chaque année, si on considère une puissance nominale hydraulique de 5000[kW/site]. Le parc énergétique se composerait alors de 82 sites hydroélectriques en 2050 qui fourniraient $\pm 1244,7[\text{GWh}]$ d'électricité.

L'imposition de ce taux de production peut paraître irréalisable, dans la mesure où la majorité des sites propices à la construction de centrales d'hydroélectricité ont été installés. Le potentiel restant permettant le développement de plus de centrales au fil de l'eau est faible en Belgique, et le coût d'investissement est apparemment bien plus élevé que celui des grands ouvrages en service. (Nihart, 2015)

Cependant l'énergie hydraulique est aussi mise en œuvre dans d'autres projets. On ressort notamment le projet d'extension de la station de transfert d'énergie par pompage (STEP) à Coo-Trois-Ponts, lié non pas à la production d'énergie renouvelable mais à la gestion des flux électriques, où un troisième bassin d'une capacité totale de 600[MW] pourrait être construit. Ce projet représente un investissement estimé à 600 millions d'euros. (Huart & D'hernoncourt, 2016)

Il serait dès lors possible d'envisager un scénario plus réaliste qui inclurait le 3^{ème} bassin de la STEP de Coo-Trois-Ponts, fournissant l'équivalent de ± 55 sites hydroélectriques, les 32 sites hydroélectriques restant nécessaire à l'atteinte de l'exigence de part d'ER dans la consommation finale, ainsi qu'une quantité suffisante de site de centrales basses chute afin de produire de l'électricité en continu à partir d'une source renouvelable pour le pompage de l'eau du réservoir.

NB: On retrouve en Annexe E, la fiche technique d'une centrale hydroélectrique wallonne de 5MW de puissance nominale, ainsi qu'une fiche technique de la centrale de Coo-Trois-Pont.

L'ENERGIE EOLIENNE

La production d'électricité éolienne est en croissance constante depuis l'an 2000, malgré un ralentissement notable ces dernières années. La moyenne d'augmentation de la construction d'éolien de puissance nominale supérieure à 1[MW] entre 2000 et 2014 se situe à $\pm 28[\text{unités}]$. Avec un maximum de 60[unités] ajoutées en 2008. (ICEDD, 2016)

On peut donc fixer le taux de production d'éolien à $\tau_{\text{prod}}^{\text{eol}} = 25[\text{unités}]$ en plus chaque année dans le scénario *EOL* (et 0 pour l'*HYD*). Cela représente une production nette de 3411,6 [GWh] en 2050, pour un effectif final de 825 unités de puissance nominale à 2[MW/unité]. On quadruple donc la production d'électricité à partir d'éoliennes en 32 ans.

L'ENERGIE SOLAIRE

En 2014, le territoire wallon a permis la production de 789,9GWh d'électricité solaire. Cela représente une surface de panneaux de l'ordre de $\pm 6[\text{km}^2]$, soit l'équivalent de la superficie de près de 830 terrains de football. Entre 2010 et 2014, environ 160[GWh] ont été produits en supplément chaque année. Cela équivaut à une augmentation de production moyenne de **78,2%**. (ICEDD, 2016).

Cependant, depuis 2014, la tendance à la hausse s'est fortement adoucie puisque le taux de production moyen est estimé à **4,1%**. (APERe, 2018)

Dans tous les scénarios d'énergie renouvelable, les panneaux solaires photovoltaïques sont étalés sur tous les toits résidentiels et tertiaires des bâtiments neufs et rénovés bien orientés, représentant une part de la surface utile globale comprise entre 148,81 et 306,31[km²] suivant le scénario de consommation. On rappelle que dans les scénario

PEB+ZE et *qZE*, de la surface supplémentaire est mobilisée pour répondre à l'exigence zéro-énergie du bâtiment.

Le pourcentage classique de couverture de toit des panneaux photovoltaïques ne dépasse en général pas **C=30[%]** dans le secteur résidentiel. C'est celui qui sera fixé dans ce travail. Cela laisse la place à d'éventuels éléments architecturaux ou le placement de panneaux solaires thermiques. Ce faible pourcentage de couverture est néanmoins compensé par un grand taux de production d'énergie photovoltaïque. Ainsi, les surfaces tertiaires qui autorisent de plus grandes zones de pose sont considérées dans le calcul de production d'énergie photovoltaïque. On détermine ce taux de production comme valant $\tau_{\text{prod}}^{\text{PV}} = 70\%$.

D | COUT DE PRODUCTION

La détermination du coût actualisé propre à chaque système de production d'énergie dépend entre autre du coût d'investissement. Il se réfère au prix de revient propre à la construction des unités de production, plus le prix nécessaire à l'implantation du site vis-à-vis des routes, du réseau d'égouttage, etc.

LA CENTRALE HYDROELECTRIQUE

L'énergie hydraulique est une des énergies renouvelables les moins chères malgré que les centrales de production nécessitent des investissements importants. Les avantages économiques liés à la capacité de modulation de la production d'électricité permettent de rentabiliser les investissements car la ressource hydraulique est gratuite et les frais d'entretien sont réduits. L'investissement des installations de basse chute de puissance allant de 50 [kW] à 7 500 [kW] varie entre 2000 et 4000 [€/kW]. Ces coûts comprennent les études et frais de dossier, le génie civil et les équipements hydromécaniques et électriques. Le cout d'investissement d'un dispositif de production d'énergie provenant de l'hydroélectrique est donc estimé à $\Pi_{\text{m,hyd}}^{\text{prod}} = 3330[\text{€/kW}]$ (ADEME, 2018)

L'ENERGIE EOLIENNE

Le cout d'investissement de l'électricité produite par des éoliennes terrestres varie fortement en fonction du rotor installé, du type de fondation à réaliser, des conditions météorologiques, mais aussi de l'accessibilité du terrain. Depuis les 10 dernières années, la capacité éolienne terrestre a été très développée en Belgique. Dans le contexte européen, elle semble être l'une des technologies renouvelables les plus rentables. Alors que les coûts d'investissement ont diminué de 20% au cours des 5 dernières années, ils devraient encore baisser d'ici 2050. (Devogelaer et al., 2013)

Le coût d'investissement pour le grand éolien représente de 1300 à 1500 €/kW, en prenant en compte le coût du matériel, du raccordement, de l'installation, les études préalables et le prix du démantèlement en fin de vie. (ADEME, 2018)

Notons cependant que ces coûts sont plus faibles qu'en réalité étant donné que le prix de l'électricité éolienne devrait inclure les moyens de stockage nécessaires pour compenser ses fluctuations.

En prenant en compte un montant futur de construction (et donc une réduction de 20% du tarif présenté), le cout d'investissement d'une infrastructure de production d'électricité provenant de l'éolien est de $\Pi_{\text{m,eol}}^{\text{prod}} = 1120[\text{€/kW}]$.

L'ENERGIE SOLAIRE

Le coût total pour la construction et l'installation de panneaux solaires photovoltaïques varie suivant les équipements mis en œuvre (les panneaux comptent pour 60% de la facture, l'onduleur pour 15%, et le montage pour 25%) et la facilité de raccordement au réseau électrique. Bien que, grâce à la fabrication de masse, les couts de construction se réduisent constamment, on évalue le cout d'investissement d'une infrastructure de

production d'électricité provenant du photovoltaïque à de $\Pi_{m,pv}^{prod} = 2700[\text{€/kW}]$ pour des systèmes de puissance nominale inférieure à 10 kW. (ADEME, 2018)

On note cependant que l'avantage des panneaux en toiture est plus prononcé pour le secteur tertiaire que résidentiel, et qu'ici encore le cout d'investissement devrait tenir compte des systèmes de stockage nécessaires pour pallier à l'intermittence de production d'électricité des panneaux solaires photovoltaïques.

E| ACCEPTATION SOCIALE ET ENVIRONNEMENTALE

LA CENTRALE HYDROELECTRIQUE

L'exploitation de l'énergie potentielle des cours d'eau n'est pas sans conséquences sur l'environnement. Celles-ci varient avec le type et la taille de l'infrastructure. Ces effets influent sur la qualité de l'eau, les écosystèmes du cours d'eau, les altérations possibles du site, les migrations de poissons, etc. À cause de ces problèmes, les centrales hydroélectriques sont ponctuelles et centralisées de manière à avoir le moins d'incidence sur leur environnement. (Penders, 2013).

Cependant, les expériences passées ont permis de tirer les leçons des erreurs commises. De nos jours, les études de conception de centrales hydroélectriques intègrent l'analyse environnementale du site. Les installations hydroélectriques doivent considérer des critères tels que le respect de la continuité du cours d'eau pour la faune (garantir la libre circulation des poissons) et la flore (circulation du sable, des graviers, des débris végétaux, etc.), ou la réserve d'un débit minimum pour le cours d'eau (le débit ne peut pas être dédié uniquement à la production d'énergie).

Dans la mesure où les critères impactant l'environnement sont respectés, on estime que la production d'électricité provenant de l'hydroélectrique est acceptable socialement et environnementalement.

L'ENERGIE EOLIENNE

L'aménagement d'une éolienne nécessite un règlement de façon à être compatible avec toutes les autres affectations de l'espace environnant, et de manière à bénéficier d'un potentiel venteux favorable. Cette réglementation, dont une partie est présentée Tableau 16, reprend les zones où l'éolienne est exclue, et les distances maximales à respecter entre le parc éolien et les différents identifiants du paysage. (Ouammi et al., 2012)

L'impact d'une centrale éolienne sur l'environnement fait actuellement débat. Plus spécifiquement, son esthétique, son inconfort visuel, son impact sur le paysage, ses conséquences sur le confort acoustique (notamment avec le bruit généré par la rotation des pales et le bruit produit par le passage de l'air dans l'hélice), et ses dangers pour les oiseaux. En effet, pour ce qui est de l'impact sur le paysage, les turbines sont une présence verticale frappante, en particulier dans les zones rurales. L'évaluation de l'impact qui concerne la biodiversité est quant à elle souvent difficile car il s'agit d'une opinion subjective. L'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS) souligne que le taux de collisions d'oiseaux observé au cours des études reste relativement faible par rapport à celui observé dans d'autres structures métalliques telles que les pylônes électriques, les lignes électriques et les tours de communication. Enfin, en ce qui concerne le bruit émis par les éoliennes, l'expérience montre que le bruit n'est pas excessif lorsque les habitations sont situées à moins de 300m de la turbine la plus proche. (Ouammi et al., 2012)

Ces critiques limitent d'une manière ou d'une autre l'exploitation effective des parcs éoliens en terme d'acceptation sociale plus qu'environnementale lorsque les systèmes éoliens sont correctement placés. L'inconfort visuel et l'impact paysager ayant une importance notable pour une grande majorité de la population.

Malgré un sondage réalisé par Ipsos Belgique, à la demande du service public de Wallonie, déclarant que près de 81% des riverains directs et des non riverains de parcs éoliens wallons étaient favorables à l'éolien que ce soit en milieu urbain ou périurbain (Ipsos Belgium, 2010), le taux de production de l'éolien wallon a connu une baisse de croissance entre 2015 et 2016, de 10% à 6% , en raison notamment de nombreux recours effectués au Conseil d'Etat. En 2016, on établissait à 392[MW] la quantité d'énergie des projets éoliens qui faisaient face à un recours, contre 1103[MW] pour les projets en étude d'incidences ou en demande de permis. (APERe, 2017)

On estime donc dans le cadre de ce travail que la production d'électricité provenant de l'éolien est seulement acceptable environnementalement.

Tableau 16: Règlementation liées à l'aménagement d'éoliennes sur un territoire (Ouammi et al., 2012)

Zones d'exclusion		OK si
Les zones de trop forte pente	:	< 10%
car elles empêchent l'accessibilité aux véhicules transportant les composants des centrales éoliennes		
Zones d'interdistance		OK si
Parc éolien ⇔ Le réseau électrique	:	< 1 km
Parc éolien ⇔ Le réseau routier principal	:	< 1,5 km
Parc éolien ⇔ Les habitations	:	> 1,5 km
Pour prendre en compte les ombres portées par l'éolienne		
Parc éolien ⇔ Les aéroports	:	> 2,5 km
Parc éolien ⇔ Les routes migratoires	:	> 1,5 km
car elles impactent sur la biodiversité et particulièrement sur les oiseaux		

L'ENERGIE SOLAIRE

A l'échelle humaine, l'énergie solaire est inépuisable, disponible gratuitement, et abondamment. La production d'électricité photovoltaïque n'est pas polluante lors de la phase d'exploitation, les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à 30 ans et sont presque intégralement recyclables. Une attention particulière doit néanmoins 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. (Penders, 2013). Globalement, l'énergie solaire électrique est considérée comme acceptable environnementalement.

Grace à l'industrialisation et la production de masse, la diminution du prix d'installation des panneaux photovoltaïque amène en outre à une plus grande acceptation sociale.

On estime ainsi, dans le cadre de cette étude de transition vers un TqZEA, que la production d'électricité provenant du photovoltaïque est acceptable environnementalement et socialement.

4.2| MODELISATION DES SCENARIOS DE CONSOMMATION ET DE PRODUCTION

Ce chapitre de modélisation s'applique à décrire les informations à intégrer à l'outil de calcul Excel, et à présenter l'interface du formulaire lié à la consommation d'énergie du bâtiment. Le fichier créé dans ce travail estime l'allure prévisionnelle des consommations en énergie finale des bâtiments (résidentiels et tertiaires) sur une période de 32 ans afin d'assister les différents acteurs dans leur choix de scénario de transition énergétique vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome.

4.2.1| SIGNIFICATION DES FORMATS DE CELLULES

Dans le fichier Excel, chaque cellule est représentée suivant un format spécial afin de définir si c'est une donnée de saisie ou de calcul, et son importance. La figure Fig. 13 reprend les différents formats créés. Ceux-ci sont répétés dans le 1^{er} onglet du classeur

Notice d'emploi

Exemple	Signification
123	Cellule de saisie informative : inscrire ici la valeur demandée
456,00	Cellule de saisie importante : inscrire ici la valeur demandée
Scénario **	Cellule de saisie importante : choisir ici la valeur demandée
456	Cellule de saisie : normalement ne rien modifier
789,00	Cellule de calcul : ne rien modifier ici svp
789,0	Cellule de calcul en rapport avec une autre cellule (unité différente) : ne rien modifier ici svp
321,00	Cellule de calcul : résultat important
654,00	Cellule de calcul : résultat secondaire
N/A	Cellule d'erreur : résultat manquant ou valeur non conforme

Fig. 13 : Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – Notice d'emploi du formulaire

4.2.2| INSERTION DES DONNEES ENTRANTES

Dans le fichier Excel, toutes les données à insérer se démarquent soit par un format spécial composé d'un fond gris et d'un contour en pointillés soit par une liste déroulante. Ces cases sont à compléter obligatoirement pour obtenir des résultats cohérents.

A| DONNEES ADMINISTRATIVES

La fenêtre d'insertion des données administratives associées au territoire est celle qui apparaît dans l'onglet **Vérification**.

La case de superficie du territoire, visible Fig. 14, est présentée à titre indicatif. Elle n'intervient pas dans les calculs prospectifs. La cellule de l'année de départ est quant à elle obligatoire car c'est sur cette base que l'on détermine le cycle de transition énergétique de manière détaillée afin d'arriver à une année de fin de transition qui correspond à une dizaine entière.

DONNEES ADMINISTRATIVE		
Projet:	TFE : Stratégie de Transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie-autonome	
Pays:	Belgique	
Territoire étudié:	Région wallonne	
Superficie du territoire:	16844,00	km ²
Année de départ:	2018	Cycle de transition: 32 ans



Fig. 14: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données administratives

B | DONNEES DEMOGRAPHIQUES & CLIMATIQUES

Les données entrantes à insérer concernent l'évolution de la démographie et du climat du territoire. La fenêtre d'insertion de ces inputs est celle qui apparaît également dans l'onglet **Vérification**. Les valeurs de ménages et de degrés-jours que l'on note Fig. 15 sont développées sections 3.3.3] et 3.3.4]. Le calcul de l'évolution de ces 2 variables diffère suivant que l'on se trouve avant ou après la première année de la colonne qui s'affiche (2020 dans ce cas d'étude).

DONNEES DEMOGRAPHIQUES & CLIMATIQUES							
Effectifs de logements de référence:	1523,00	x10 ³ .log	Degrés-jours de référence:	1914,70	°C.jour		
Evolution des logements:	2020	1602,00	x10 ³ .log	Evolution des degrés-jours:	2020	2079,51	°C.jour
	2030	1702,00	x10 ³ .log		2030	1977,06	°C.jour
	2040	1788,50	x10 ³ .log		2040	1874,61	°C.jour
	2050	1850,30	x10 ³ .log		2050	1772,16	°C.jour
Croissance moyenne de logements par an:	9,70	x10 ³ .log/an	Croissance moyenne des degrés-jours par an:	-10,25	°C.jour/an		
			Rayonnement solaire reçu:	1000,00	kWh/m ² .an		

Fig. 15: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données démographiques et climatiques

Avant 2020

On demande une croissance moyenne des logements et des degrés-jours par an, afin de déterminer l'effectif de logements et la valeur des degrés-jours des années pour le reste des grandeurs qui ne sont pas déterminées (en l'occurrence avant 2020).

Quand on prend l'exemple de la démographie, on se rend compte que les chiffres donnés par l'étude du bureau fédéral du plan ne se rattachent qu'à 5 années types (Vandresse, 2017). Or pour le calcul des besoins d'énergie, il est nécessaire d'avoir une valeur pour chaque année, y compris 2018 et 2019. Le calcul se fait donc par itération. En considérant i comme l'année pour laquelle on veut obtenir les valeurs de démographie ou de climat, on obtient comme équation : $X_i = X_{i+1} - \bar{X}$ où le résultat est la valeur associée à l'année suivant l'année considérée, soustrait de la croissance moyenne.

Après 2020

Quelle que soit l'année de départ de la stratégie de transition énergétique, l'année de fin sera toujours un multiple de 10, pour une période de minimum 30 ans. Dès lors, l'intervalle de temps entre les années encadrées en orange Fig. 15 équivaut toujours à une décennie. Cela permet de déterminer un différentiel sur une période de 10 ans, plus précis que la croissance moyenne. Le calcul se fait ainsi de la même manière qu'avant 2020 par itération, excepté que l'on additionne le différentiel entre l'année de dizaine supérieure et inférieure: $X_i = X_{i-1} + \frac{\Delta X}{10}$

C| DONNEES ENERGETIQUES ET URBAINES LIEES A LA CONSOMMATION

La fenêtre d'insertion des données entrantes principales liées à la consommation d'énergie (Fig. 16) est celle qui apparaît également dans l'onglet **Vérification**.

Les données entrantes (inputs) à insérer concernent les exigences liées aux bâtiments résidentiels et tertiaires et donc le scénario de réhabilitation du parc immobilier choisi ; les taux de renouvellement du parc immobilier ; la réduction de consommation énergétique que l'on envisage à la fin de la période de transition ; et les performances énergétiques des bâtiments de référence.

Les données entrées Fig. 16 ont toutes été développées précédemment dans les sections 3.3.1|Performances énergétiques des bâtiments, 3.3.2|Renouvellement du parc immobilier, 4.1.2|B|Demande énergétique du stock bati, et 4.1.2|C|Cout de rénovation, excepté le niveau de réduction de la consommation envisagé qui sera présenté par la suite.

DONNEES ENERGETIQUES & URBAINES - liées à la consommation			
Exigences liées aux bâtiments:		Taux de renouvellement du parc immobilier	
Scénario de réhabilitation:	Scénario *PEB*	Taux de construction:	1,000 %/an
Réduction de consommation envisagée:	30,00 %	Taux de démolition:	0,075 %/an
Besoins bruts - Secteur résidentiel - Valeurs de référence		Besoins bruts - Secteur tertiaire - Valeurs de référence	
Besoin brut d'énergie de chauffage:	143,4 kWh/m².an	Besoin brut d'énergie de chauffage:	133,02 kWh/m².an
	17671,04 kWh/log.an	Besoin brut d'électricité:	68,85 kWh/m².an
Besoin brut d'électricité:	25,6 kWh/m².an	Superficie totale de plancher:	55,90 km²
	3150,77 kWh/log.an		
Superficie moyenne d'un logement de réf.:	123,21 m²/log	Cout moyen d'une rénovation lourde:	200,00 €/m²

Fig. 16: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données énergétiques et urbaines

EXIGENCES LIEES AUX BATIMENTS

Le choix d'un scénario de réhabilitation du parc immobilier va avoir un impact sur les résultats de performances énergétiques du territoire puisqu'à chaque scénario sont associées des exigences de performance énergétiques du bâtiment (i.e. la consommation totale d'énergie finale du parc bati) et des variables de renouvellement du parc immobilier (taux de rénovation).

C'est donc sur base du scénario de consommation (et plus tard de production) choisi que l'on pourra comparer les courbes de production et de consommation d'énergie du territoire.

Réduction de la consommation énergétique - envisagée

Il existe une différence entre le taux de réduction de la consommation énergétique dit envisagé (que l'on observe Fig. 16) qui est une valeur que l'on établit, et le taux de réduction de la consommation calculé qui est un indicateur d'efficacité répondant au critère d'availability. Ce paragraphe s'applique à détailler le premier des indices.

Dans une première phase de transition énergétique, les politiques de la Région Wallonne se sont fixés comme objectif de réduire de 30 % la consommation d'énergie sur une période de 30 ans. (DGO4 & AWAC, 2018)

Cet objectif ambitieux est transposé dans ce travail, et va permettre de distinguer les différents scénarios de réduction de la consommation énergétique. Cette stratégie de réduction de la consommation énergétique a pour ambition à la fois de traiter l'ensemble des problématiques de manière cohérente et de répondre aux obligations européennes.

Le taux de réduction de la consommation énergétique **envisagé** ($\tau_{rédu}^{envisagé}$) dans le cadre de ce travail est donc fixé à 0,3.

$$Q_{rédu}^{envisage} = (1 - \tau_{rédu}^{envisage}) * (Q_{b,ch,0}^{ref} + Q_{b,el,0}^{ref}) \quad [26]$$

$Q_{rédu}^{envisage}$	= consommation en énergie finale du bâtiment envisagé à la fin de la période de transition	[GWh/an]
$\tau_{rédu}^{envisage}$	= taux de réduction de la consommation énergétique envisagé à la fin de la période de transition	[%]
$Q_{b,ch,0}^{ref}$	= consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments, suivant le scénario de référence, à l'année initiale $= \frac{m_0}{m_{ref}} * \underbrace{Q_{b,ch,0}^{DJ,r}}_{[9]} + \underbrace{Q_{b,ch,0}^{DJ,nr}}_{[9]}$	[GWh/an]
$Q_{b,el,0}^{ref}$	= consommation d'énergie pour l'électricité des bâtiments, suivant le scénario de référence, à l'année 0 $= m_0 * S_m * E_{b,el,ref}^r + S_{ref} * E_{b,el,ref}^{nr}$	[GWh/an]
m_0	= effectif de logements à l'année initiale	[log]
m_{ref}	= effectif de logements de l'année de référence	[log]
$Q_{b,ch,0}^{DJ}$	= consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments $\left\{ \begin{array}{l} r = \text{résidentiels} \\ nr = \text{tertiaires} \end{array} \right\}$, en fonction des degrés-jours, à l'année initiale	[GWh/an]
$E_{b,el,ref}^r$	= consommation spécifique d'électricité des bâtiments résidentiels, suivant le scénario de référence	[kWh/log.an]
$E_{b,el,ref}^{nr}$	= consommation spécifique d'électricité des bâtiments tertiaires, suivant le scénario de référence	[kWh/m ² .an]
S_m	= superficie moyenne de logements (cf. 4.1.2 B)	[m ² /log]
S_{ref}	= superficie de bâtiments tertiaires de l'année de référence	[m ²]

Le besoin brut d'énergie du bâtiment envisagé correspond à une diminution de 30% de la consommation en énergie finale du bâtiment de l'année initiale d'étude (ici 2018), ne comptant que les variables du climat et de la démographie.

Soit, pour l'année 2018, l'addition du besoin brut de chaleur ($Q_{b,ch,i}^{ref}$) et d'électricité ($Q_{b,el,i}^{ref}$) pour les bâtiments résidentiels et tertiaires. Cette somme permet d'examiner la réduction de demande énergétique du début à la fin de la période énergétique.

La valeur du taux de réduction envisagé doit être insérée dans la partie des données énergétiques et urbaines liés à la consommation, dans l'onglet  (cf. Fig. 16).

TAUX DE RENOUVELLEMENT DU PARC IMMOBILIER

Etant donné que le taux de rénovation du parc immobilier dépend du scénario choisi et de l'efficacité de la consommation en énergie finale du bâtiment à la fin de la période de transition, cette donnée est implémentée (cf. D|)par après dans le 3^{ème} onglet de la fiche

Excel .

Les taux de construction et démolition restent quant à eux les mêmes étant donné que l'on ne considère qu'aucune politique ou stratégie de communication n'est mise en avant pour les faire changer (ex : scénario de démolition d'une part des bâtiments peu performants puis de reconstruction de ces bâtiments répondant aux exigences de bâtiments neufs). On applique les mêmes taux de renouvellement des logements résidentiels aux bâtiments du secteur tertiaire. L'explication de ces valeurs est développée section 4.1.2|A|.

BESOINS BRUTS – SECTEUR RESIDENTIEL ET TERTIAIRE

Les données des besoins bruts d'énergie de chauffage et d'électricité sont des valeurs de saisies importantes qui représentent la demande énergétique des bâtiments que l'on prend comme référence pour le calcul de consommation des bâtiments dits "non rénovés".

COUT DE RENOVATION

La donnée de cout moyen d'une rénovation lourde (200€/m²) correspond au prix moyen de la rénovation d'un bâtiment résidentiel suivant un scénario de référence. Les scénarios de performances énergétique du bâtiment qui se rattachent le mieux à cette rénovation de base sont les scénarios *PEB* et *PEB+ZE*, pour lesquels on passe d'une classe énergétique de niveau C (pour les bâtiments non rénovés) à B. Ce sont ces scénarios qui serviront de référence (100%) pour le calcul du prix relatif nécessaire à la rénovation du stock bati du TqZEA.

Les valeurs de prix relatif sont encodées au préalable dans la fiche Excel, dans l'onglet **Consommation BATIMENT**. Comme expliqué à la section 4.1.2|C| et présenté Fig. 17, le passage d'un niveau de performance double le cout de rénovation du bâtiment. Les prix relatifs nécessaire à la rénovation d'un bâtiment résidentiel suivant les scénarios *BE* (niveau A), *PASSIF* (niveau A+), et *qZE* (niveau A+) vaudront des lors respectivement 200%, 400% et 400%. De plus, la rénovation des bâtiments tertiaires équivaut à environ 75% du cout nécessaire à la rénovation des bâtiments résidentiels.

PRIX		
Prix relatif nécessaire à la rénovation d'un bâtiment		
	résidentiel	tertiaire
	%	%
PEB	100,00%	75,00%
BE	200,00%	150,00%
PEB+ZE	100,00%	75,00%
PASSIF	400,00%	300,00%
qZE	400,00%	300,00%

Fig. 17: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – prix relatif de rénovation

D| DONNEES ENERGETIQUES ET URBAINES LIEES A LA PRODUCTION

La fenêtre d'insertion de données liées à la production d'énergie (Fig. 18) est celle qui apparaît dans l'onglet **Vérification**. Les informations à introduire concernent les exigences liées aux systèmes de production et donc le scénario de transformation du parc énergétique sélectionné ; la part finale d'énergie renouvelable dans la consommation; la disponibilité minimum des services énergétiques; les performances énergétiques des sources d'énergie renouvelable ; la délimitation du territoire et les transfert d'énergie autorisés (territoire autonome ou autre); le degré d'urbanisation du site ; et les pertes de conversion du réseau de distribution.

A l'exception de la part d'énergie renouvelable envisagée et du taux d'approvisionnement minimum qui seront présentés par la suite, les données entrées Fig. 18 ont toutes été développées précédemment dans les sections 4.1.1|A|Réseau de distribution d'énergie, 4.1.1|B|Degré d'urbanisation du territoire qZEA, 4.1.3|A|Installations de production préexistantes, 4.1.3|D|Cout de production, et 4.1.3|E|Acceptation sociale et environnementale.

DONNEES ENERGETIQUES & URBAINES - liées à la production

Exigences liées au système de production

Scénario de production:

Part d'ER envisagée: %

Taux d'approvisionnement minimum: %

Morphologie urbaine

Connexion frontalière du territoire:

Degré d'urbanisation du territoire:

Facteur de perte de transport et conversion: %

Sources d'énergie	Prod. nette en électricité GWh/an	Disponibilité h/an	Nombre de sites -	Coûts d'invest. €/kW	Acceptabilité
Eolien	1326,50	2074,00	110	1120	Environnementale
Hydraulique	286,50	2579,00	96	3330	Sociale et environnementale
Solaire (PV)	722,80	897,00	123484	2700	Sociale et environnementale
Incinération des déchets ménagers	200,30	6917,00	4	3000	Sociale

Fig. 18: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données énergétiques liées à la production

On remarquera que les valeurs liées à la durée de fonctionnement des nouvelles infrastructures de production (d_{hyd} , d_{eol} , d_{pv}) sont à encoder dans le 4^{ème} onglet du formulaire de calcul **Production ELECTRICITE**.

EXIGENCES LIEES AU SYSTEME DE PRODUCTION

Part d'énergie renouvelable - envisagée

Comme dans le cas de la consommation, il existe une différence entre la part d'énergie renouvelable (ER) dans la consommation énergétique dit envisagé (cf. Fig. 18) qui est une valeur fixée, et le facteur d'allocation des ressources (Γ_{access}^{pc}) qui est un indicateur de proximité répondant au critère d'accessibilité.

La valeur de part envisagée, formulée dans le cadre de ce travail, se base sur la directive "20-20-20" qui a fixé comme objectif contraignant qu'une part de 27% de la consommation énergétique au sein de l'Union Européenne provienne de sources d'énergie renouvelables d'ici à 2030. (DGO4 & AWAC, 2018) C'est cette cible compliquée qui sera donc envisagée comme part d'ER dans la consommation énergétique ($\tau_{prod}^{envisage}$) à atteindre à l'horizon 2050.

Taux d'approvisionnement minimum

Par analogie avec la réserve stratégique qui correspond à un stock de ressources énergétiques mis à disposition d'un territoire afin de garantir une certaine marge de manœuvre en cas d'interruption de fourniture vitale en énergie, l'approvisionnement minimum assure que les installations de production d'énergie du territoire permettent une disponibilité des services énergétiques pendant au moins 90 jours par an. (SPF Economie, 2018) Soit un taux d'approvisionnement ($\tau_{avail}^{envisage}$) de minimum **24,6%**;

4.2.3| IMPLEMENTATION DES EQUATIONS

A| TAUX DE RENOVATION DU PARC IMMOBILIER

Les données concernant le climat, la démographie, et le type d'exigences liées aux performances du bâtiment étant fixées, il ne reste plus comme variable dynamique que le taux de rénovation.

Pour pouvoir modifier les valeurs de taux de rénovation et voir instantanément les changements qui en découlent, il faut se diriger dans le 3^{ème} onglet **Consommation BATIMENT** où se trouve, en plus du tableau récapitulatif des exigences de consommation spécifique du bâtiment (Fig. 19), le graphique de comparaison des scénarios de réhabilitation du parc bati résidentiel et tertiaire (Fig. 23) qui montre l'allure prospective de la consommation

totale en énergie finale du bâtiment, et qui permet de voir instantanément la vitesse à laquelle évolue la consommation totale en fonction du taux de rénovation imposé.

Comme expliqué plus tôt, les cases à modifier sont celles représentées en fond gris avec un contour en pointillés.

Le tableau dynamique Fig. 19 est un premier indicateur du comportement énergétique des différents scénarios de réhabilitation du parc immobilier. Il permet d'estimer le taux minimum de rénovation du bâti le plus efficace au vu de toutes les conditions établies pour chaque scénario. En effet, lorsque l'exigence de réduction **envisagée** n'est pas respectée (c.à.d. taux calculé < taux envisagé), un texte apparaît en rouge à gauche du scénario concerné affichant que le taux de rénovation inséré n'est "PAS OK".

Une condition d'approximation est cependant établie en considérant une atteinte du critère de réduction de la consommation de minimum 90%.

En résumé, si :

$$\tau_{rédu}^{calculé} < 0,9 * \tau_{rédu}^{envisagé} \rightarrow PAS OK$$

$$0,9 * \tau_{rédu}^{envisagé} < \tau_{rédu}^{calculé} < \tau_{rédu}^{envisagé} \rightarrow QUASI OK$$

$$\tau_{rédu}^{calculé} \geq \tau_{rédu}^{envisagé} \rightarrow$$

SCÉNARIOS de REHABILITATION DU PARC BATI											
Scénarios	Taux de rénovation	Taux de réduction	RENOVATION			NEUF			REFERENCE		
	%	%	RESIDENTIEL		TERTIAIRE	RESIDENTIEL		TERTIAIRE	RESIDENTIEL		TERTIAIRE
			kWh/m².an	kWh/log.an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/log.an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/log.an	kWh/m².an
PEB	5,000	19,69%	115	14169,2	130	85	10472,9	115	168,99	20821,8	201,87
BE	5,000	35,47%	85	10472,9	115	45	5544,5	90			
PEB+ZE	4,000	28,92%	115	14169,2	130	0	0,0	0			
PASSIF	2,000	30,23%	45	5544,5	90	45	5544,5	90			
qZE	1,300	28,88%	45	5544,5	90	0	0,0	0			

	Scénarios	Taux de rénovation	Taux de réduction
		%	%
PAS OK	*PEB*	5,000	19,69%
	BE	5,000	35,47%
QUASI OK	*PEB+ZE*	4,000	28,92%
	PASSIF	2,000	30,23%
QUASI OK	*qZE*	1,300	28,88%

Fig. 19: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif –scénarios & taux de rénovation

B | TAUX DE PRODUCTION DU PARC ENERGETIQUE

Après avoir implémenté les taux de rénovation de chaque scénario de consommation, il reste à modifier la variable de production. Pour pouvoir changer les valeurs de taux de production et voir instantanément les corrections qui s'ensuivent, il faut se diriger dans le 4ème onglet **Production ELECTRICITE** où se trouve un tableau récapitulatif des performances de production des services énergétiques, et plusieurs graphique montrant l'allure prospective de la production totale en énergie, qui permettent de comparer instantanément les scénarios de transformation du parc énergétique du TqZEA en fonction des taux de production imposés.

Toujours dans une même optique de travail, le tableau dynamique Fig. 20 est un indicateur du comportement énergétique des différents scénarios de transformation du parc énergétique. Il aide à la détermination des différents taux de production du mix d'énergie, en affichant "Part d'ER insuffisante" en rouge à gauche du scénario concerné, lorsque la

part d'énergie renouvelable envisagée est inférieure à l'indicateur d'accessibility. Donc lorsque $\tau_{\text{prod}}^{\text{envisage}} < \Gamma_{\text{access}}^{\text{pc}}$ à la fin du cycle de transition, soit en 2050.

SCÉNARIOS de TRANSFORMATION DU PARC ÉNERGETIQUE								
Scénarios	Taux de production	Puissance hydraulique	Taux de production	Puissance éolienne	Taux de production PV	Pourcentage de couverture PV	Puissance PV	Puissance existant
	site	kWh/an.site	unite	kWh/an.unite	%	%	kWh/m².an	kWh/an
HYD	2,5	15.179.445,00	0,0	4.135.270,40	70,000	30,000	107,50	2536100000,00
EOL	0,0		20,0		70,000	30,000		

Fig. 20: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif –scénarios & taux de production

4.2.4| INDICATEURS DE RESILIENCE LIES AU TQZEA

De retour dans le deuxième onglet de Vérification, on retrouve le choix des scénarios de réhabilitation et de transformation du territoire, ses performances énergétiques, les indicateurs de résilience associés aux critères des 4A, et le graphe de consommation/production d'énergie du territoire (Fig. 21).

SCENARIO DE REHABILITATION ET DE TRANSFORMATION DU TERRITOIRE

Cette section reprend les informations de taux de rénovation du bati, et de production des sources d'énergie, suivant les 2 scénarios de consommation et production fixés plus tôt.

PERFORMANCES ÉNERGETIQUES DU TERRITOIRE

Cette section présente le bilan énergétique du territoire en fin de cycle de transition. On y retrouve la consommation totale en énergie finale, la production finale totale d'électricité, et une estimation d'un stockage éventuel d'électricité.

Cette cellule de stockage si surplus permet de déterminer la quantité d'électricité excédentaire après déduction de la part consacrée à la demande énergétique. Sachant qu'en 2012, le chauffage représentait près des 2/3 de la consommation totale des secteurs résidentiel et tertiaire réunis.(ICEDD, 2014c). On déduit que $\pm 33\%$ de la demande d'énergie est attribuée aux besoins d'électricité des bâtiments. Dès lors s'il y a un surplus tel que :

$$Q_{p,c} > \left(1 - \frac{2}{3}\right) * Q_{b,c} \quad \text{alors de l'électricité peut être stockée et : } Q_{\text{stock}} = Q_{p,c} - \frac{Q_{b,c}}{3}$$

INDICATEURS SPÉCIFIQUES

Comme précisé §3.2.3| lors de la caractérisation d'un territoire-zéro énergie, on définit dans le cadre de cette étude 2 types de territoires, les territoires-zéro-énergie (TZE), et les territoires-quasi-zéro-énergie (TqZE). Les cellules encadrées et ayant un fond vert sont des informations nécessaires, au sortir de cette simulation, afin de pouvoir déterminer si un territoire est zéro-énergie, quasi-zéro-énergie, ou non-zéro-énergie. Une cellule sur fond blanc affichera cependant une valeur "TqZE", "TZE", ou "NON" si les performances énergétiques du territoire et tous les indicateurs spécifiques sont calculés.

Pour rappel, la condition pour que le territoire soit quasi-zéro-énergie est que les indicateurs soient tous calculés et que le territoire réponde au critère d'availability

(soit $\Gamma_{\text{avail}}^{\text{rédu}} \geq \tau_{\text{rédu}}^{\text{envisage}}$). La condition pour que le territoire soit zéro-énergie impose en plus que la consommation totale d'énergie finale soit inférieure ou égal à la production totale d'énergie finale.

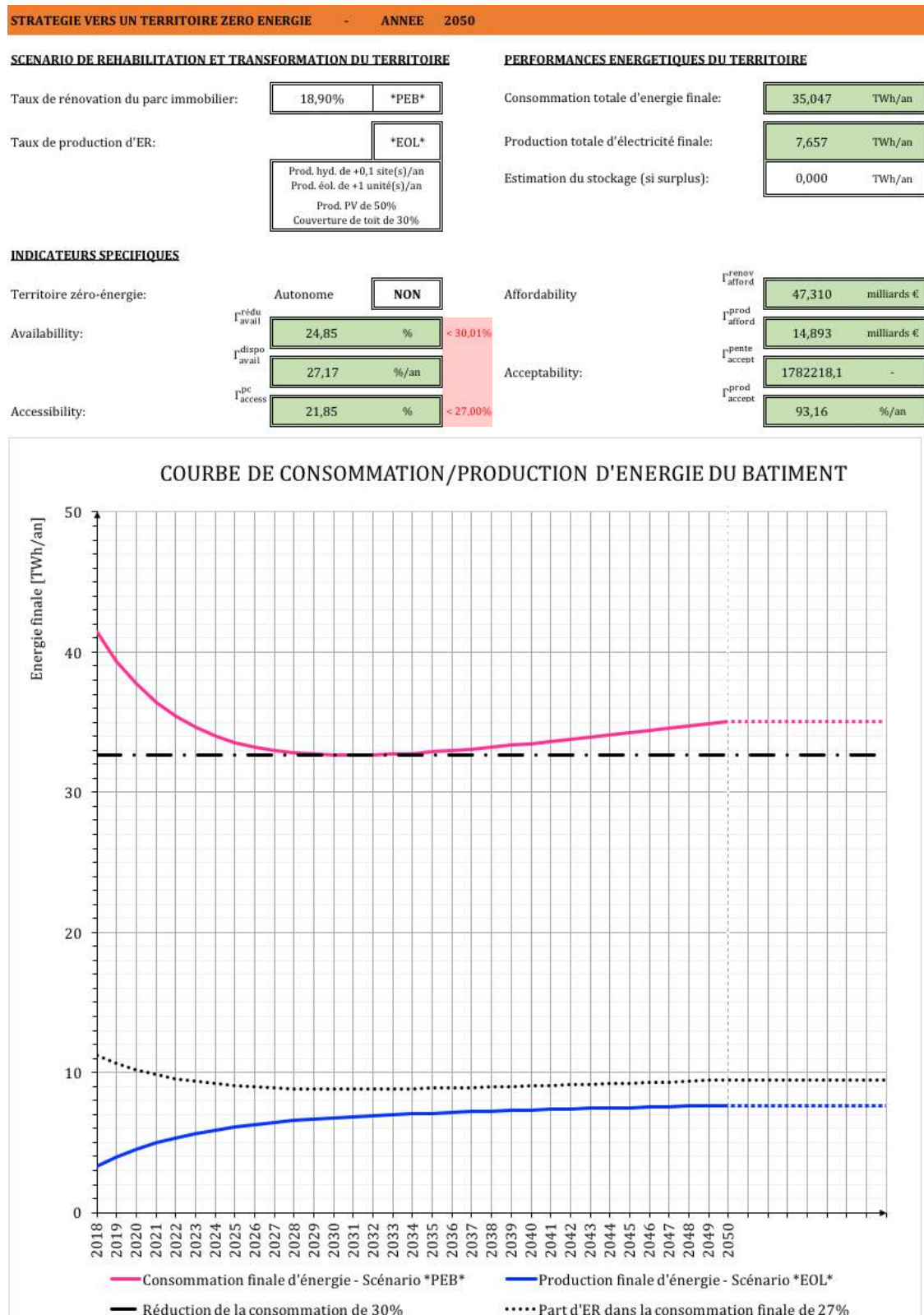


Fig. 21: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – Résultats de stratégie de transition vers un TqZEA

Cellules "d'erreur" dans l'outil de calcul

3 cellules de calcul qui se présentent comme des erreurs sont ajoutées à la section des indicateurs spécifiques afin d'apporter de plus amples informations de performances sur le territoire-zéro-énergie-autonome. Elles se situent dans le carré rouge indiqué Fig. 21.

- En ce qui concerne l'indicateur de consommation de l'availability ($\Gamma_{\text{avail}}^{\text{rédu}}$), un pourcentage s'affiche à droite de la cellule de la valeur, s'il existe au cours de la période de transition énergétique une consommation en énergie finale du bâtiment inférieure à celle calculée à la fin du cycle. La valeur affichée en rouge correspond ainsi au rapport entre le minimum de consommation en énergie finale du bâtiment relatif à un scénario de réhabilitation et la consommation en énergie finale du bâtiment à l'année initiale d'étude (ici 2018). Elle met en évidence le fait qu'il existe un changement de signe de la courbe de consommation d'énergie du bâtiment, et que la consommation en fin de transition n'est pas l'optimum que l'on pourrait obtenir.
- L'indicateur de production de l'availability ($\Gamma_{\text{avail}}^{\text{dispo}}$), est comparé au taux d'approvisionnement minimum ($\tau_{\text{avail}}^{\text{envisagé}}$). Lorsque ce dernier est supérieur au premier, un texte rouge s'inscrit à droite de la cellule de l'indicateur et affiche la valeur du taux d'approvisionnement minimum. Cette comparaison permet d'observer si, dans un scénario 100% énergie renouvelable, le territoire peut réellement être autonome à long terme en cas de crise énergétique.
- L'indicateur d'accessibility est lui comparé à la part d'énergie renouvelable envisagée en fin de cycle de transition. Cette dernière proportion est prise par rapport à l'allure de la consommation énergétique fonction du scénario de réhabilitation du parc immobilier. La comparaison permet de voir si le scénario de transformation du parc énergétique choisi assume une part de production d'ER suffisante.

4.3| RESULTATS DE LA SIMULATION DES SCENARIOS

Cette section tend à analyser les résultats évalués dans l'outil de calcul interactif : le graphique d'évolution de la consommation en énergie finale du bâtiment suivant les scénarios de réhabilitation du parc immobilier, et celui d'évolution de la production finale en électricité suivant les scénarios de transformation du parc énergétique. Ces graphiques cherchent à illustrer l'allure de consommation/production d'énergie du territoire Wallon au cours du temps et suivant les divers scénarios proposés.

4.3.1| INVARIANTS DE CALCUL – CLIMAT ET DÉMOGRAPHIE DU TERRITOIRE WALLON

Les données de besoins bruts fonction du climat et de la démographie sont invariables vis-à-vis des scénarios de consommation d'énergie finale.

Comme énoncé par avant, à l'année de référence, on comptabilise 1523000 logements ($m_{réf}$) de 17831,42[kWh/log.an] et 55,9 km² ($S_{réf}$) de surfaces de bâtiments non résidentiels de 133,02[kWh/m².an]. La moyenne de référence des consommations spécifiques d'énergie de chauffage pour les logements résidentiels est de 17831,42 [kWh/log.an], et de 133,02[kWh/m².an] pour les bâtiments tertiaires. Les données présentées permettent donc de calculer les besoins de chaleur et d'électricité par an en fonction du nombre de degrés-jours évalué dans l'année et de l'évolution des logements privés wallons.

Le Tableau 17 exprime entre-autre la variation des besoins bruts de chaleur sur base des consommation d'énergie des bâtiments suivant le scénario de référence ($Q_{b,ch,i}^{ref} + Q_{b,el,i}^{ref}$) détaillées dans l'équation [26]. Bien que la moyenne des degrés-jours diminue au cours du temps, ces consommations augmentent au vu de l'influence prédominante de la croissance des logements privés wallons.

Tableau 17: Evolution des degrés-jours (Pacot and Reiter, 2012), des ménages (Vandresse, 2017, pp. 34–35) et de la consommation d'énergie du bâtiment en Région Wallonne

	Référence cf. §4.1.2 B	2020	2030	2040	2050
Moyenne des degrés-jours [°C.jours]	1914,7	2079,51	1987,31	1874,61	1772,16
Effectifs de logements privés [*10 ³ .log]	1523	1602	1702	1788,5	1850,3
Besoins bruts d'énergie pour les secteurs résidentiel et tertiaires - fct des DJ et des logements	[TWh/an]	46,795	47,578	47,952	47,720

4.3.2| SCÉNARIOS DE RÉHABILITATION DU PARC IMMOBILIER

Divers scénarios et évolutions de critères liés à la consommation d'énergie des bâtiments sur un territoire sont présentés dans cette section. L'analyse préalable de ces scénarios pris individuellement permet de les mettre en parallèle et ainsi pouvoir choisir ceux qui sont les plus intéressants de garder comme base à la réalisation du bilan global.

Trois des sept indices décrit dans la règle des 4A peuvent être calculés à la fin de cette étape de la méthodologie. En effet, il est possible d'analyser de manière quantitative les divers scénarios présentés ci-après, en fonction de l'availability, de l'affordability et de l'acceptability. Chaque scénario ayant ses avantages et ses inconvénients vis-à-vis des 4A,

ils seront comparés de manière à ce que l'on puisse en faire ressortir un ou plusieurs du lot. Cette analyse est bien entendu prise par rapport au contexte Wallon actuel.

Pour rappel, les performances énergétiques des bâtiments résidentiels et tertiaires se développent en fonction des scénarios de réhabilitation du parc bâti, ou suivant les valeurs de référence. Un récapitulatif de ces exigences est présenté Fig. 22.

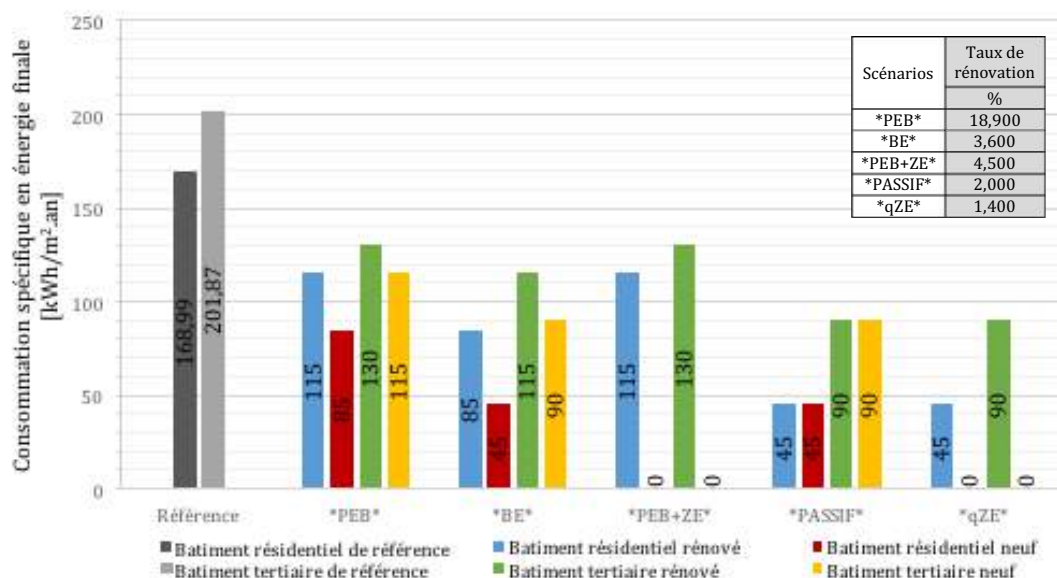


Fig. 22 : Exigences liées à la consommation spécifique des bâtiments suivant le scénario de réhabilitation

Dans le **scénario *PEB***, la part des bâtiments à rénover est considérablement augmentée. Tandis que les tendances récentes de consommation des bâtiments neufs continuent. Ce scénario a l'avantage d'être progressif en terme de performances énergétiques requises sans bouleverser les habitudes des consommateurs. Mais le taux de renouvellement imposé nécessite d'établir des politiques fortes pour accélérer et renforcer les processus de rénovation des bâtiments existants.

Le **scénario *BE*** est la prolongation du scénario *PEB* mais à performances énergétiques plus poussées et à taux de renouvellement du bâti existant plus faible. L'accent étant ainsi mis sur la réduction de la consommation finale d'énergie du bâtiment par l'augmentation des exigences de performances énergétiques.

Le principe dans le **scénario *PEB+ZE*** est de réduire la consommation finale d'énergie en optimisant la production individuelle d'énergie renouvelable des bâtiments neufs et en renouvelant partiellement le parc immobilier existant.

Le **scénario *PASSIF*** vise à évaluer les besoins d'énergie du bâtiment si les bâtiments neufs et une partie des bâtiments existants rencontraient une même performance énergétique élevée, à taux de rénovation relativement bas.

Bien que le **scénario *qZE*** ait une infime chance de se réaliser à l'horizon 2050, il montre la consommation minimale engendrée en effectuant des rénovations très performantes sur les logements et les unités tertiaires, tout en misant sur les technologies de production individuelle des bâtiments neufs.

A | ANALYSE GLOBALE DES SCENARIOS DE REHABILITATION DU PARC IMMOBILIER WALLON

Tout scénarios confondus, on observe Fig. 23 une diminution manifeste de la consommation totale en énergie du bâtiment entre 2018 et 2050. En un peu plus de 30 ans, les besoins bruts d'énergie du bâtiment sont passés de 46[TWh] à $\approx 32,5$ [TWh].

On remarque également que l'évolution des scénarios proposés tend à répondre aux exigences de réduction de la consommation en énergie finale du bâtiment. Mais que malgré un taux de rénovation de 18,9%, la consommation totale du scénario *PEB* (en rouge dans le Tableau 18) n'atteint pas l'exigence de réduction de 30% des besoins à l'horizon 2050. Elle avoisine une diminution de 30% des besoins vers 2030 pour ensuite augmenter.

Le Tableau 18: récapitule les données énergétiques et urbaines calculées par scénario de réhabilitation.

Tableau 18:Données énergétiques et urbaines de réhabilitation du bati du TqZEA par scénario

		PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Q _{b,i} en 2050	TWh	35,05	32,49	32,56	32,54	32,52
Nombre de logements rénovés en 2050	% du total	85,45	60,02	66,82	41,62	31,82
Surface tertiaire rénovées en 2050	% du total	71,93	50,67	56,36	35,21	26,95

Les pourcentages de logements et de surfaces tertiaires neufs sont quant à eux indépendants des scénarios puisque le taux de construction reste inchangé. Ils sont respectivement de $\approx 15\%$ et $\approx 28\%$ du total de logements et de surface non résidentielle.

On note Fig. 23 que la consommation du scénario *PEB* s'est accrue à partir de l'année 2030. A partir de 2030, la consommation finale du secteur tertiaire augmente. En 20 ans, on passe d'une augmentation de 23 [GWh] à 87[GWh] par an. Les besoins du secteur résidentiel n'augmentent que 2 ans plus tard, passant de 7 [GWh] à 70 [GWh] par an.

Ce mouvement est vraisemblablement imputable à la quantité de logements et bâtiments tertiaires neufs toujours en augmentation. Malgré un taux de rénovation élevé, à partir du moment où l'on construit plus que l'on ne démolit, le parc immobilier grandit inévitablement, et les besoins de chauffage et d'électricité s'accroissent.

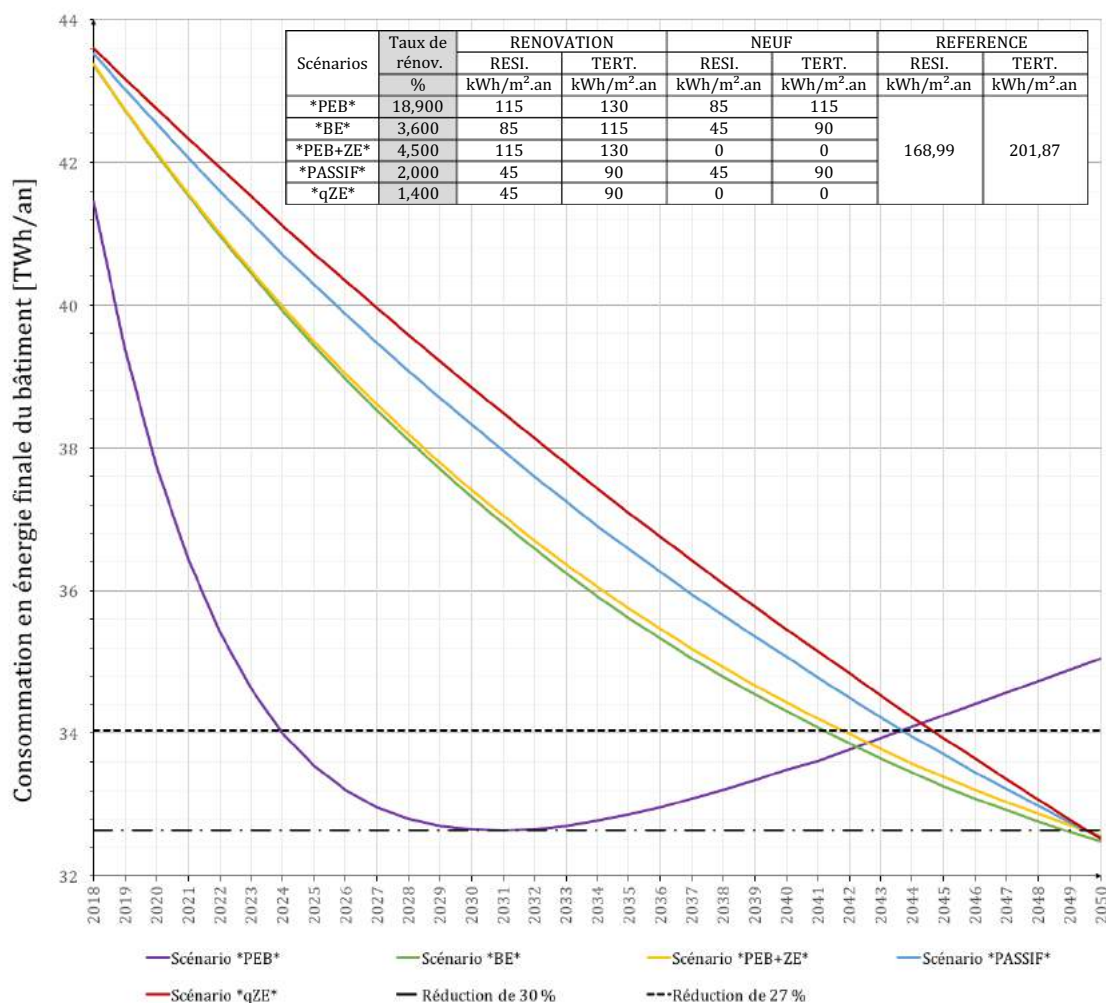
On constate également Fig. 23 que les disparités entre les scénarios *BE* et *PEB+ZE* semblent moins importantes. En effet l'allure des deux courbes est fort semblable au fil du temps. Cependant, la différence se ressent intrinsèquement car le scénario basse énergie exige des performances accrues des constructions autant rénovées que neuves, pour un taux de rénovation de 3,6% par an, tandis que le scénario PEB+ZE requiert des performances accrues principalement des constructions neuves. Le travail du bati existant s'axant plutôt sur l'augmentation de la quantité d'unités à rénover (25% de plus que pour le *BE*).

Le graphique Fig. 23 indique en outre, grâce aux courbes *PASSIF* et *qZE*, qu'il est possible, à partir d'un certain niveau de performances énergétiques du bati, d'arriver à la réduction voulue, en triplant ou quadruplant le taux de rénovation par rapport à la situation actuelle.

Ce graphique montre toute l'importance d'intégrer les taux de renouvellement à la stratégie de transition énergétique dans une optique de sobriété énergétique et non de décroissance énergétique.

A long terme, on observe que ces paramètres ont une influence notable sur les scénarios pour lesquels l'exigence d'efficacité énergétique porte sur la réglementation PEB.

SCENARIOS DE REHABILITATION DU PARC IMMOBILIER

Fig. 23: Comparaison des scénarios de réhabilitation du parc bâti résidentiel et tertiaire⁹**TAUX DE RENOUVELLEMENT EQUIVALENTS POUR TOUS LES SCENARIOS**

A plus long terme, on suppose que les paramètres de renouvellement du parc immobilier auront une influence remarquable sur les scénarios impliquant des performances énergétiques du bâti à rénover plus importantes. On observera une augmentation de la consommation des scénarios *BE* et *PASSIF* pour les mêmes raisons que le scénario *PEB*, mais pas sur les scénarios qui comprennent une contrainte zéro-énergie des bâtiments neufs, soit le *PEB+ZE* et le *qZE*. Dans ces derniers cas, on présume une diminution ou une stabilisation de la consommation. Si on suit la méthodologie de calcul élaborée dans ce travail, il est prévu que lorsque tous les bâtiments initiaux seront rénovés (ou démolis), la seule action à réaliser sera la démolition de ceux-ci. Le parc bâti se composera de plus en plus de bâtiment aux performances passives (pour les rénovés) et zéro-énergie (pour les neufs) jusqu'à ce qu'il ne reste que cela.

Ces hypothèses se constatent Fig. 24 lorsque l'on accélère le processus de renouvellement du parc bâti. Pour cette évolution, le taux de construction équivaut à 1%, le taux de démolition à 0,075% et le taux de rénovation à 20% pour tous les scénarios.

⁹ Les évolutions des consommations en énergie finale du bâtiment suivant les différents scénarios, sont reprises dans l'Annexe A, pour des taux de rénovation variant de 1 à 5%.

SCENARIOS DE REHABILITATION DU PARC IMMOBILIER

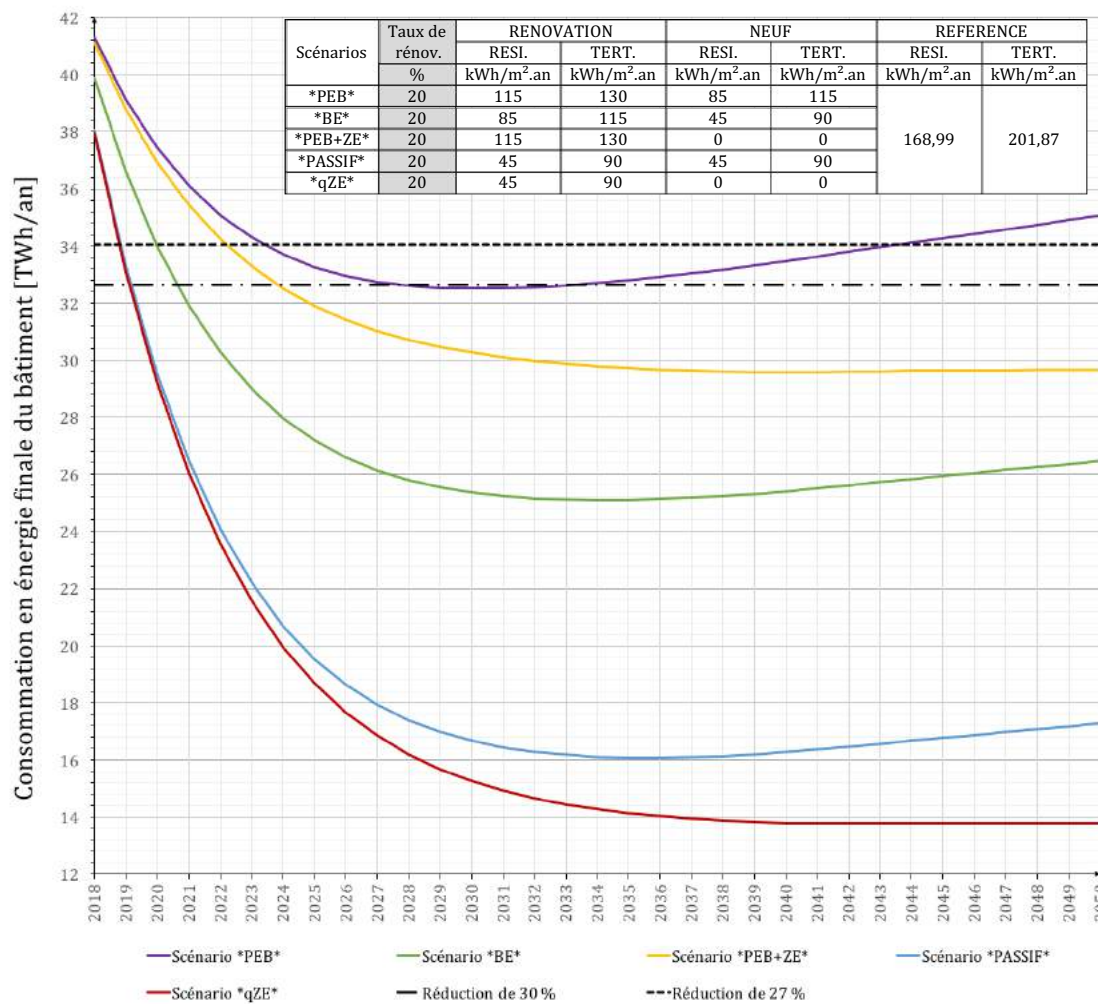


Fig. 24: Estimation à long terme des scénarios de réhabilitation du parc bâti résidentiel et tertiaire

Cela illustre le fait qu'il existe pour chaque scénario un point minimum de la courbe de consommation en énergie finale du bâtiment pour lequel la réduction de consommation totale est maximale, et que ce sommet ne se retrouve pas forcément en fin de cycle.

B| AVAILABILITY – TAUX DE REDUCTION DE LA CONSOMMATION

En mettant de cote l'analyse des variables de réhabilitation du parc immobilier, et en ne prenant en compte que les performances spécifiques du bâti, on constate Fig. 24 que l'évolution répondant au mieux aux exigences de réduction de la consommation est le scénario *qZE*. Toutefois, en prenant en considération tous les paramètres étudiés (taux de renouvellement, climat, démographie et performances spécifiques du bâti), on constate (Tableau 19 et Fig. 23) que la stratégie de réhabilitation répondant au mieux aux exigences de réduction de la consommation finale en énergie du bâtiment ($Q_{b,i}$) est le scénario *BE*. Tous les autres scénarios rénoient à l'exigence d'un taux de réduction de la consommation ($\Gamma_{rédu}^{envisage}$) supérieur à 30%, excepté le *PEB*.

Tableau 19: Données énergétiques de réhabilitation du bâti du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'availability

		PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
$Q_{b,i}$ en 2050	TWh	35,05	32,49	32,56	32,54	32,52
Taux de réduction de la consommation calculé ($\Gamma_{avil}^{rédu}$)	%	24,85	30,34	30,18	30,23	30,27

Scénario *PEB*

Dans les conditions établies par avant dans ce travail de fin d'étude, le scénario *PEB* n'est aucunement viable dans une optique de réduction de la consommation en énergie finale de 30% à l'horizon 2050, étant donné le taux de rénovation du bâti qui dépasse le réalisable sans que la contrainte de diminution ne soit respectée.

Les évolutions de ces consommations en énergie finale du bâtiment sont représentées Fig. 25 par rapport au scénario *PEB* proposé précédemment.

SCENARIOS DE REHABILITATION DU PARC IMMOBILIER

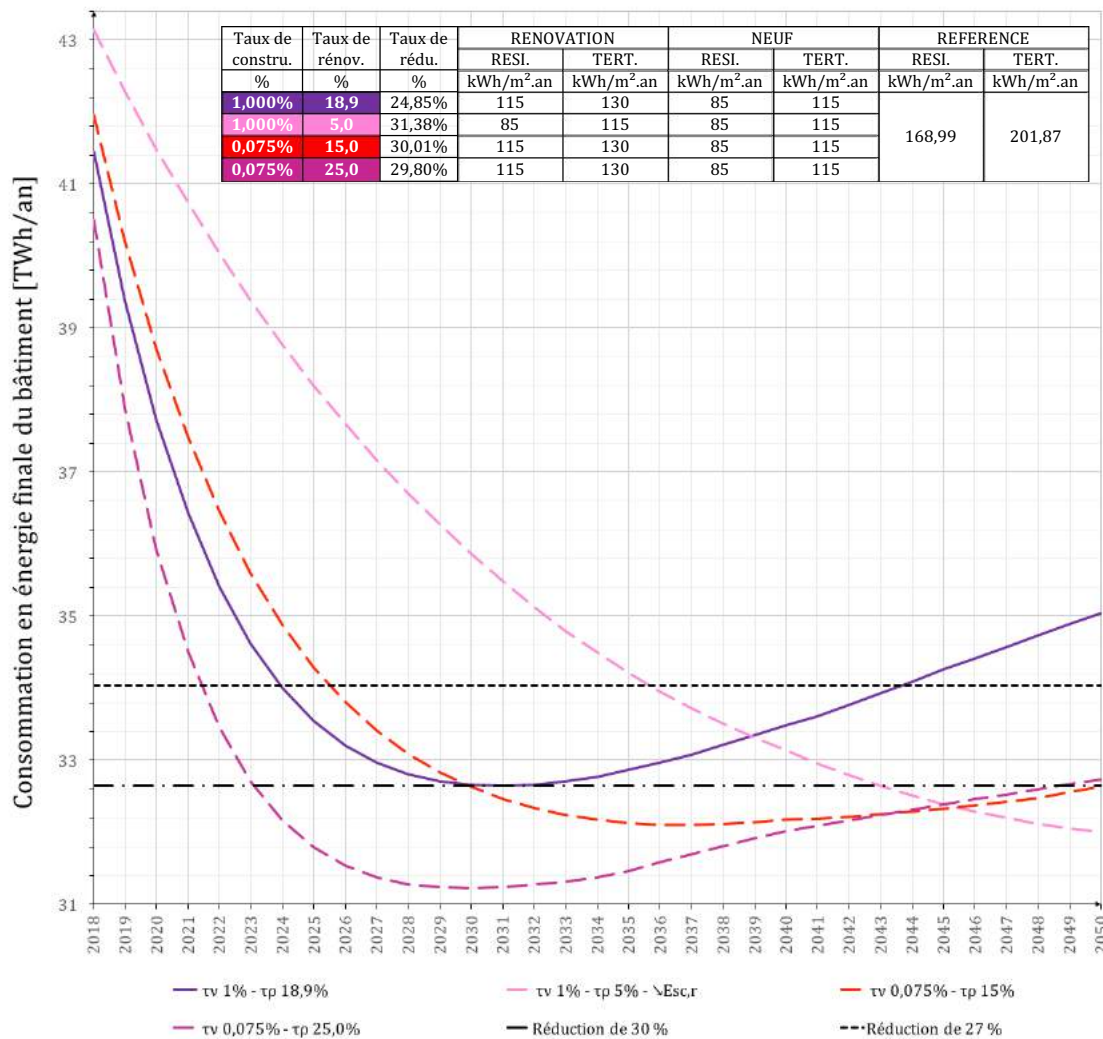


Fig. 25: Modulation des variables du scénario "PEB" de réhabilitation du parc bâti résidentiel et tertiaire

Pour améliorer les performances énergétiques du stock bâti à l'échelle du territoire, trois solutions sont proposées :

- [1] Augmenter les exigences de consommation spécifique des bâtiments rénovés. On remarque que l'exigence de réduction est respectée plus tard dans le temps, à partir de 2043 pour τ_v 1% - τ_p 5%, et qu'elle diminue encore après cela. Le comportement pour ce scénario s'approche du scénario *BE*.
- [2] Réduire le nombre de constructions neuves qui sont trop énergivores. Pour un taux de construction inférieur à 1%, on observe que l'exigence de réduction de la consommation de 30% est respectée à l'horizon 2030 (τ_v 0,075% - τ_p 15% = correspond au taux de rénovation minimum pour atteindre l'exigence de réduction de la consommation calculée.). On constate également une augmentation de

la consommation en énergie environ 8 ans plus tard. En 2050, la consommation avoisine les 30% de la consommation initiale, mais au vu de l'allure de sa courbe, on présume que l'exigence de réduction de 30% sera dérogée ;

- [3] Réduire le nombre de constructions neuves et augmenter le taux de rénovation.

On observe pour $\tau_v 0,075\% - \tau_p 25\%$ (allure similaire $\tau_p > 15\%$) que bien qu'il y ait une forte diminution de la consommation finale en énergie, la courbe se rapproche de la situation précédente à l'horizon 2050. Cela suppose qu'il peut exister un taux de rénovation minimum (ici $\tau_p 15\%$), ayant le plus d'impact sur la consommation d'énergie du bâtiment au terme de la transition énergétique du territoire.

Par rapport à la situation précédente, à part égale, le parc bâti se constitue d'une plus grande quantité de constructions rénovées (i.e. moins de constructions non rénovées) plus tôt, pour une même quantité de constructions neuves. En 2030 plus de 90% du parc bâti existant en 2018 est rénové. Ces constructions sont moins consommatrices d'énergie que celles dites non-rénovées, par conséquent, la consommation finale est plus faibles. Après 2030, la quantité de construction neuves prend le pas sur le reste et engendre une augmentation significative de la consommation en énergie finale du bâtiment ;

CONCLUSION

Malgré les trois solutions proposées, le scénario *PEB* ne sera pas repris dans la suite de ce travail puisqu'il ne correspond pas à un scénario réaliste et durable de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome à l'horizon 2050 et à plus long terme. Le moyen le plus pragmatique d'atteindre la contrainte de réduction de la consommation étant de se rapprocher des conditions du scénario *BE*.

Cette observation démontre l'importance notable d'exiger des performances énergétiques élevées du bâtiment, plutôt que des taux de renouvellement du parc bâti optimaux.

Au vu de ses performances, c'est le scénario *BE* qui sera choisi comme stratégie à mettre en évidence pour répondre au critère d'availability. Comme on peut le voir Tableau 20, on attribue une cote à chaque scénarios, suivant le 1^{er} critère d'availability. 2 au scénario qui ressort du lot, -2 à celui qui ne répond pas au critère, et 1 aux autres. On ajoute également un bonus de 0 aux scénarios *PEB+ZE* et *qZE* qui, comme présenté Fig. 24, auront tendance à se stabiliser à long terme alors que les autres subiront une augmentation de leur consommation en énergie finale.

Tableau 20 : Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis de l'availability

	PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Availability	-2	2	1+0	1	1+0
TOTAL(= $\sum 2^x$)	0,25	4	3	2	3

C| AFFORDABILITÉ – COUT MOYEN DE RENOVATION DU PARC BATI

Les données urbaines et de rentabilité présentées Tableau 21 permettent de mettre en avant les grandes différences de cout entre les scénarios de réhabilitation du stock bâti. En toute logique, l'effectif de logements et la superficie de bâtiments tertiaires rénovés sont proportionnels au taux de rénovation du stock bâti.

Parmi les 5 scénarios proposés, le *PEB+ZE* est celui qui nécessite l'investissement financier le plus bas pour la rénovation du stock bâti du territoire Wallon. Cela est dû à un taux de rénovation élevé mais réalisable, allié à un faible coup de rénovation (200€/m²). Le scénario *PEB* ayant les mêmes valeurs de prix relatif permet d'apprécier la variation du cout moyen de rénovation du parc bâti dans le cas où 85,45% des logements et 71,93% des surfaces tertiaires sont rénovés. Même avec un taux de rénovation si élevé, le cout moyen de rénovation du parc bâti est plus petit que pour les 3 autres scénarios.

Dans le cas du scénario *BE*, on aurait dû fixer le taux de rénovation à 1,5% afin d'atteindre un cout moyen de rénovation équivalent au scénario *PEB+ZE*. Cependant, le critère d'availability n'aurait pas été respecté.

Les scénarios *PASSIF* et *qZE* se trouvent être les moins rentables étant donné que ce sont ceux qui requièrent l'investissement financier le plus lourd pour atteindre les exigences passives du bâtiment. Malgré un faible taux de rénovation, le cout de transformation du bâti reste trop élevé ($400\% \times 200\text{€}/\text{m}^2 = 800\text{€}/\text{m}^2$). Pour parvenir à un cout moyen de rénovation équivalent au scénario *PEB+ZE*, il aurait fallu imposer un taux de rénovation aux alentours de 0,65%. Mais encore cette valeur ne permet pas de répondre au critère d'availability.

Tableau 21: Données urbaine et de rentabilité du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'affordability

		PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Taux de rénovation	%	18,9	3,6	4,5	2	1,4
Effectif de logements rénovés en 2050	10 ³ log	1581,03	1110,64	1236,29	770,10	588,79
Superficie de bâtiments tertiaires rénovés en 2050	km ²	55,67	38,86	43,28	29,91	20,57
Prix relatif de rénovation des bâtiments	Rési.	%	100	100	400	400
	Terti.	%	75	75	300	300
Cout moyen de rénovation du parc bâti ($\Gamma_{\text{afford}}^{\text{renov}}$)	G€	47,310	66,394	36,956	92,055	70,377

CONCLUSION

On déduit des estimations calculées que l'impact du prix relatif de rénovation d'un bâtiment est plus important que la quantité de bâtiments rénovés pour répondre à l'exigence de cout.

Au vu de sa rentabilité, c'est le scénario *PEB+ZE* qui sera choisi comme stratégie à mettre en évidence pour répondre au critère d'affordability. Comme on peut le voir Tableau 22, on lui attribue la cote de 2, et 1 aux autres.

Tableau 22 : Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis de l'affordability

	PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Affordability	(-2)	1	2	1	1
TOTAL(= $\Sigma 2^x$)	0,25	2	4	2	2

D| ACCEPTABILITY – INDICE DE PENTE MOYENNE

La démarche de transition vers un territoire-zéro-énergie autonome se déploie dans des conditions contraignantes pour lesquelles beaucoup de paramètres subjectifs et objectifs entrent en jeu (contexte économique, social et environnemental). Pour que la transition se déroule au mieux, on prendra comme optimum le scénario de réhabilitation qui évolue le plus lentement afin de laisser le temps au territoire et à ses usagers de s'adapter à la transition énergétique.

Le calcul de l'indice de pente moyenne, présenté Tableau 23, vise à déterminer le scénario qui aura un impact prédominant sur la durabilité sociale du territoire. Cette démarche tend implicitement à réduire les contestations de la part de la société face au développement énergétique du territoire, et donc à améliorer l'acceptation sociale par une implication plus étroite des usagers aux processus de transformation du TqZEA.

Tableau 23:Données énergétique du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'acceptability

		PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Q _{b,i} en 2050	TWh	35,05	32,49	32,56	32,54	32,52
Taux de réduction de la consommation calculé ($\Gamma_{\text{avail}}^{\text{rédu}}$)	%	24,85	30,34	30,18	30,23	30,27
Indice de pente moyenne ($\Gamma_{\text{accept}}^{\text{pente}}$)	-	1782218,15	581,78	555,80	406,92	370,96

L'indice de vitesse d'évolution de la consommation finale du scénario *PEB* est largement plus élevé que celui des 4 autres scénarios. Cela illustre bien l'allure de la courbe de consommation d'énergie de ce scénario qui, comme on l'observe Fig. 23 (p.80), change de signe à un moment donné, et commence croître.

On remarque également Fig. 23 que les scénarios *BE* et *PEB+ZE* ont des courbures plus importantes que celles du *PASSIF* et du *qZE*. Cette observation se ressent aussi dans les valeurs de l'indicateur de "pente moyenne".

Dans les conditions de réhabilitation proposées, le scénario *qZE* possède la courbure la plus petite. Il permet la transition énergétique la plus douce tout en respectant le critère d'availability.

Taux de renouvellement équivalents pour tous les scénarios

Dans la situation présentée Fig. 24 (p.81), les taux de renouvellement du parc immobilier sont équivalents pour tous les scénarios. Le taux de rénovation y est fixé à 20%/an.

Lorsque l'on s'attarde sur l'indice de vitesse d'évolution de la consommation finale en énergie du bâtiment (cf. Tableau 24), l'analyse de l'indicateur est tout autre. En effet, le scénario *qZE* devient le moins acceptable, tandis que les scénarios *PEB* et *PEB+ZE* répondent de manière plus optimale au critère d'acceptability.

Tableau 24:Données énergétique du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'acceptability – taux de renouvellement équivalent

		PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Q _{b,i} en 2050	TWh	35,06	26,46	29,66	17,28	13,79
Taux de réduction de la consommation calculé ($\Gamma_{\text{avail}}^{\text{rédu}}$)	%	24,83	43,25	36,41	62,95	70,43
Indice de pente moyenne ($\Gamma_{\text{accept}}^{\text{pente}}$)	x10 ⁹	0,003	8,534	0,011	227526,072	469680,075

CONCLUSION

La sanction fixée dans le calcul de l'indicateur d'acceptability est dès lors bien visible, et se fait ressentir dans sa quantification. Aussi bien lorsqu'il s'agit d'une augmentation de la consommation d'énergie du parc bâti, que lorsque la progression de celle-ci est trop rapide.

Compte tenu de l'évolution de sa courbe de consommation d'énergie, le scénario *qZE* s'impose comme choix de processus de transition vers un territoire équitable socialement.

Tableau 25 : Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis de l'acceptability

	PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Acceptability	(-2)	1	1	1	2
TOTAL(= $\Sigma 2^*$)	0,25	2	2	2	4

E | RESULTATS DE LA SIMULATION LIES A LA CONSOMMATION

Le Tableau 26 résume les diverses cotes des scénarios relatives aux critères des 4A pour la consommation d'énergie des bâtiments afin que l'on puisse évaluer de manière globale si un scénario ressort du lot.

Le scénario *PEB* est mis hors-jeu pour la suite de la simulation de production puisque l'exigence d'availability n'est pas respectée. Le scénario *PASSIF* est également exclu car il se classe dernier de la liste. Les 3 scénarios restant, *BE*, *PEB+ZE*, *qZE* sont quant à eux à égalité.

Le scénario *BE* est considéré comme le plus efficace, le *PEB+ZE* comme le plus rentable, et le *qZE* comme le plus acceptable.

L'avantage du scénario *BE* s'appuie sur le fait que les contraintes en terme de performances énergétiques du bati neuf et rénové sont relativement faibles pour un taux de rénovation plus bas que pour le scénario *PEB+ZE*.

L'atout du scénario *PEB+ZE* se situe aussi sur la contrainte de performance énergétique du bati mais seulement celui qui est rénové. Cette faible exigence engendre un cout moyen de rénovation qui permet un investissement financier initial moindre.

L'intérêt du scénario *qZE* réside quant à lui sur les hautes performances énergétiques des bâtiments neufs et rénovés combinées à un faible taux de rénovation, qui rendent possible la transition douce et acceptable vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome.

On ressort de cette simulation des scénarios de consommation d'énergie que l'exigence de performance énergétique des bâtiments rénovés (et neufs dans une moindre mesure), qui impacte sur l'efficacité, la rentabilité et l'acceptation de la stratégie énergétique de transition, est le facteur d'importance qui se dégage singulièrement. La variation du taux de rénovation ayant une influence moins perceptible.

Tableau 26 : Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis des 4A

	PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Availability	-2	2	1+0	1	1+0
Accessibility	/	/	/	/	/
Affordability	(-2)	1	2	1	1
Acceptability	(-2)	1	1	1	2
TOTAL(= $\Sigma 2^*$)	0,75	8	9	6	9

Dans cette stratégie de transition énergétique vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome résilient et durable, le choix d'un scénario de réhabilitation du parc immobilier Wallon ne peut pas se faire de façon unanime. Les 3 scénarios ayant répondu de manière optimal à un seul des critères.

A ce stade de l'étude, il faut dès lors procéder à la simulation des scénarios de production, afin de les comparer de manière plus détaillée, et ainsi peut être pouvoir mettre en évidence les scénarios de consommation/production ayant obtenus des scores plus élevés. La suite de ce chapitre aspire à l'analyse des graphiques d'évolution des courbes de consommation/production en énergie évalués dans l'outil de calcul interactif, ainsi que les valeurs des indicateurs de résilience associés à chaque scénario de réhabilitation et transformation du territoire.

4.3.3| SCENARIOS DE TRANSFORMATION DU PARC ENERGETIQUE

A| ANALYSE GLOBALE DES SCENARIOS DE TRANSFORMATION DU PARC ENERGETIQUE WALLON

La détermination des différentes solutions énergétiques de production à favoriser se base sur 3 des 5 scénarios de réhabilitation du parc immobilier, les scénarios *BE*, *PEB+ZE*, et *qZE*. Pour chaque scénario de consommation sont attribués les 2 scénarios de production d'énergie, soit les scénarios *HYD* et *EOL*. L'évolution des courbes de production d'énergie finale de ces différentes situations est présentée Fig. 26. Les exigences de performances des scénarios de production sont retranscrites Tableau 27.

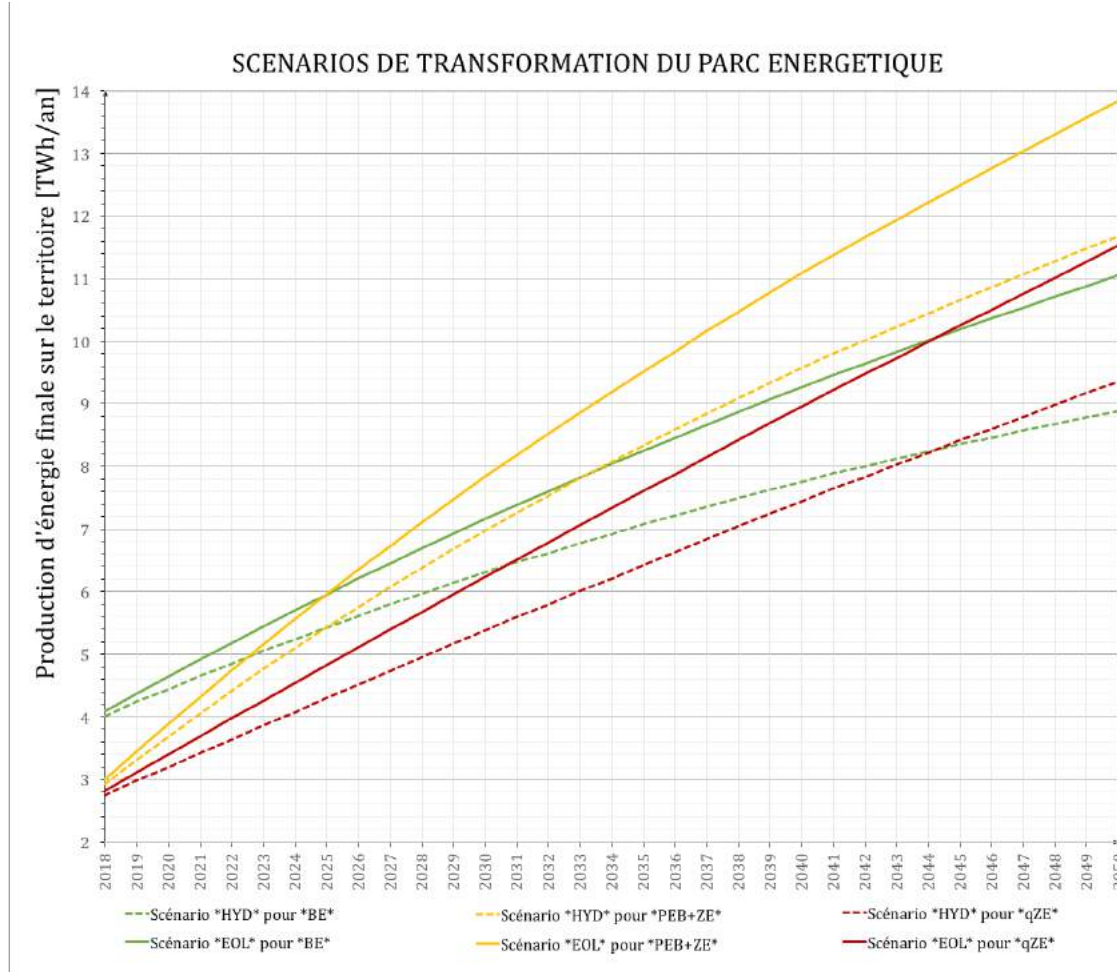


Fig. 26: Comparaison des scénarios de réhabilitation du parc immobilier et de transformation du parc énergétique du territoire Wallon

Tableau 27: Exigences liées à la production d'énergie suivant le scénario de transformation

Scénarios	Taux de production			Pourcentage de couv. de toit PV	Puissance finale de production			
	hydro.	éol.	PV		hydro.	éol.	PV	préexistant
	site	unité	%		GWh/an.site	GWh/an.unité	kWh/m ² .an	GWh/an
HYD	2,5	0	70	30	15,179	4,135	107,50	2536,1
EOL	0	25	70	30				

Il apparaît Fig. 26 que les scénarios de consommation *PEB+ZE* sont ceux qui engendrent la production d'énergie finale la plus élevée. S'ensuivent les scénarios de production *EOL*

pour le *qZE* et pour le *BE*. On retrouve en dernier, les scénarios *HYD* pour le *qZE* et pour le *BE* qui produisent de l'électricité en moindre quantité.

Bien que les taux de production soient les mêmes, les taux de renouvellement du parc bati wallon qui impactent la production d'électricité provenant des panneaux photovoltaïques sont eux différents. Avec le taux de rénovation le plus élevé (4,5%), les scénarios *PEB+ZE* & *EOL* et *PEB+ZE* & *HYD* sont ceux qui génèrent la production la plus rapide.

On observe aussi que de manière générale, les scénarios de production *EOL* produisent plus d'énergie que les *HYD*.

B | AVAILABILITY – FACTEUR DE DISPONIBILITÉ

En pratique, la mesure du facteur de disponibilité est diminuée notamment par les opérations d'entretien ou les défaillances possibles des équipements. On ajoute à cela l'absence de services de stockage et les variations de production des services énergétiques dues à l'intermittence de la source d'énergie primaire ou aux précipitations variables qui obligent les gestionnaires de réseau à demander la diminution de la fourniture de base en énergie. Ces variabilités de l'apport énergétique induisent des productions électriques irrégulières au cours de l'année qui se ressentent dans le facteur de disponibilité des services énergétiques du territoire.

Comme on peut le voir Tableau 28, en 2050, la durée de fonctionnement du scénario *EOL* (24,84%), composé principalement de sources de production intermittentes, est légèrement supérieure au taux d'approvisionnement minimum (24,66%), tandis que celle du scénario *HYD* (36,47%), constitué essentiellement par des centrales hydroélectriques, dépasse l'exigence.

Tableau 28: Données énergétiques de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'availability

		BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
		HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Production d'énergie en 2050	TWh	8,886	11,053	11,676	13,843	9,357	11,524
Production nominale en 2050	TWh	66,847	77,168	93,925	104,247	71,424	81,745
Facteur de disponibilité Γ_{avail}^{dispo}	%/an	36,47	24,84	36,47	24,84	36,47	24,84

NB: à très long terme, le facteur de disponibilité établi ici est un taux défavorable qui ne prend en compte que les nouvelles grandes infrastructures. L'hypothèse étant faite que les installations préexistantes ne sont pas développées après le début du cycle de transition (→ pas d'amélioration de la durée de fonctionnement), et que la superficie des panneaux photovoltaïques ne peut pas dépasser la superficie utile totale du parc immobilier (→ production négligeable à long terme).

CONCLUSION

Dans les conditions présentées, les installations de production placées pourraient être utilisées comme production de réserve stratégique du territoire. A long terme, il serait dès lors en parfaite autonomie au moins sur le plan de la sécurité d'approvisionnement. Néanmoins, pour améliorer sa disponibilité, il faudrait jouer sur l'efficacité de fonctionnement soit des centrales hydroélectriques, soit des éoliennes suivant le scénario de production choisi.

Comme indiqué Tableau 29, on attribue une cote à chaque scénario suivant le 1^{er} critère d'availability. 1 aux scénarios *EOL* car ils répondent de justesse à l'exigence d'un approvisionnement croissant du parc énergétique, et 2 aux autres puisqu'ils respectent l'exigence et permettent une réserve d'énergie supplémentaire non négligeable.

Tableau 29 : Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère d'availability

	BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
	HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Availability	2	1	2	1	2	1
TOTAL (= $\Sigma 2^*$)	4	2	4	2	4	2

C| ACCESSIBILITY - FACTEUR D'ALLOCATION DES RESSOURCES

Les simulations des différents scénarios présentés Tableau 30 montrent qu'il n'est pas possible d'alimenter le système énergétique wallon avec 100% d'énergie renouvelable produite sur-site à l'horizon 2050 avec les sources d'énergie proposées. Néanmoins, la contrainte de 27% de part de la consommation est atteinte pour tous les scénarios de consommation/production.

Au vu de ses performances, le scénario *PEB+ZE*&*EOL* est celui qui engendre la plus grosse part d'énergie renouvelable dans la consommation finale. Il est suivi des scénarios *PEB+ZE*&*HYD*, *qZE*&*EOL*, puis *BE*&*EOL*. On retrouve en dernier, les scénarios *qZE*&*HYD* et *BE*&*HYD*.

Tableau 30: Données énergétiques de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'accessibility

		BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
		HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Production d'énergie en 2050 - $Q_{p,i}$	TWh	8,886	11,053	11,676	13,843	9,357	11,524
Consommation en énergie finale en 2050 - $Q_{b,i}$	TWh	32,486		32,561		32,520	
Facteur d'allocation des ressources Γ_{access}^{pc}	%	27,35	34,02	35,86	42,51	28,77	35,44
Estimation de l'année d'atteinte du taux d'approvisionnement à 100%		2135	2112	2107	2093	2129	2108

Bien que l'exigence zéro-énergie du territoire ne soit pas abordée, les simulations des scénarios de consommation et de production sont utiles pour évaluer l'écart entre l'ensemble du potentiel d'énergie renouvelable wallon et la demande énergétique prévue en 2050. Cela peut présumer l'allure de la relation consommation/production d'énergie et déduire l'année d'atteinte du critère zéro-énergie du territoire autonome. Cette estimation est présentée Tableau 30.

CONCLUSION

Ces résultats témoignent de la proximité qui existe entre le scénario de consommation *PEB+ZE* et les deux scénarios de production *HYD* et *EOL*. Bien que sa consommation en énergie finale en 2050 (32,56TWh) soit la plus élevée des 3 scénarios de réhabilitation du parc immobilier wallon, ce modèle s'avère être le plus adapté aux systèmes de production d'énergie. Qu'ils soient majoritairement intermittents ou considérés en grande partie comme continus. L'exigence zéro-énergie des bâtiments neufs, et le taux de renouvellement du parc bâti augmente également la part de production dans la consommation finale. Il semble donc que pour obtenir un facteur d'allocation efficace, il faille intégrer la contrainte zéro énergie aux bâtiments.

On retrouve Tableau 31, les cotes assignées à chaque scénarios vis-à-vis de l'accessibility. Le scénario *PEB+ZE*&*EOL* reçoit une note de 2, tandis que les autres sont à 1.

Tableau 31 : Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère l'accessibility

	BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
	HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Accessibility	1	1	1	2	1	1
TOTAL (= $\Sigma 2^*$)	2	2	2	4	2	2

D| AFFORDABILITY - COUT MOYEN DE PRODUCTION DU PARC ENERGETIQUE

Les résultats des simulations Tableau 32 montrent qu'en Wallonie, entre 16 et 25 milliards d'euros d'investissements doivent être réalisés d'ici 2050 si l'on veut évoluer vers un système énergétique fondé exclusivement sur les énergies renouvelables, et arriver à un territoire-quasi-zéro-énergie autonome.

Tableau 32: Données de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'affordability

		BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
		HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Effectif de centrales hydro.	site	82	0	82	0	82	0
N ^{bre} d'éoliennes	unité	0	825	0	825	0	825
Superficie de PV	km ²	47,49		96,83		75,25	
Cout moyen de production $\Gamma_{\text{afford}}^{\text{prod}}$	G€	16,568	17,027	24,914	25,373	17,979	18,438
Cout moyen de rénovation du parc bati $\Gamma_{\text{afford}}^{\text{renov}}$	G€	66,394		36,956		70,377	
➔ Cout total	G€	130,452	83,421	61,87	62,329	88,356	88,815

Entre les 6 scénarios proposés, le *BE*&*HYD* est celui qui demande l'investissement financier le plus bas pour la construction de centrales hydroélectriques et de panneaux solaires photovoltaïques sur les toits des bâtiments du territoire Wallon. Cela est notamment dû à la faible superficie de PV (47,49km²). En toute logique, s'il y en a moins, le montant total sera moindre.

Les scénarios *PEB+ZE*&*HYD* et *PEB+ZE*&*EOL*, se montant respectivement à 24,9 et 25,4 milliards d'euros sont quant à eux les plus coûteux.

Entre les 2 classes, on retrouve les scénarios *BE*&*EOL*, *qZE*&*HYD* et *qZE*&*EOL* pour lesquels on devrait investir respectivement 17, 17.9 et 18.4 milliards d'euros.

Globalement placer des éoliennes en suffisance sur le territoire revient plus cher qu'installer des centrales hydroélectriques. On se rend également compte que la superficie des panneaux photovoltaïques a un impact sur le cout moyen de production. Une estimation de ces derniers est présentée Tableau 33 dans le cas où aucuns panneaux photovoltaïques ne sont placés si ce n'est lorsqu'il faut respecter l'exigences zéro-énergie du bâtiment.

Tableau 33: Estimation des couts moyens moyen de production par scénario, avec et sans PV

		BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
		HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Cout de prod. sans PV	G€	1,297	1,756	11,706	12,164	11,691	12,15
		-92%	-90%	-53%	-52%	-35%	-34%

Les parts d'énergie renouvelables sont toutes inférieures à 27% à l'horizon 2050.

Puisque les bâtiments ne doivent atteindre que la contrainte du passif, les scénarios *BE*&*HYD* et *BE*&*EOL* sont ceux qui ressentent le mieux la suppression des PV du territoire en terme de rentabilité. On constate cependant que pour les autres qui doivent respecter la réglementation ZE, le cout moyen de production diminue de tiers ou de moitié.

CONCLUSIONS

Au vu de sa rentabilité, c'est le scénario *BE*&*HYD* qui sera choisi comme stratégie à mettre en évidence pour répondre au critère d'affordability. Comme on peut le voir Tableau 34, on lui attribue la cote de 2, et 1 aux autres.

En additionnant le cout moyen de rénovation du parc bati et celui de production, on remarque Tableau 32 que c'est le scénario *PEB+ZE*&*HYD* qui se retrouve le moins onéreux. En terme de production ce n'est pas le plus rentable mais quand on considère le prix dans sa globalité, il le devient. On lui attribue donc un bonus de 0 afin de faire valoir cet effet.

Tableau 34 : Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère l'affordability

	BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
	HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Affordability	2	1	1+0	1	1	1
TOTAL (= $\sum 2^x$)	4	2	3	2	2	2

E| ACCEPTABILITY - ACCEPTATION SOCIALE ET ENVIRONNEMENTALE

En terme d'acceptability, le processus de transition vers un territoire-zéro-énergie autonome vise à identifier le ou les scénarios de production qui auront un impact prédéterminant sur la durabilité environnementale et sociale du territoire. Encore une fois, cette démarche tend implicitement à réduire les contestations de la part de la société, et à préserver l'environnement au maximum. Les résultats des simulations présentés Tableau 35, montrent que les services de production d'énergie, provenant de nouvelles infrastructures et de préexistantes, sont relativement acceptables. Les scénarios composés en majorité d'éoliennes ont un taux naturellement moindre que ceux constitués de centrales hydroélectriques.

Tableau 35: Données de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'acceptability

		BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
		HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Taux d'énergie acceptable - $\Gamma_{\text{accept}}^{\text{prod}}$	%/an	93,64	88,87	94,13	89,97	92,72	87,83

CONCLUSION

En garde de la mesure du taux d'énergie acceptable, c'est le scénario *PEB+ZE*&*HYD* qui ressort du lot. Les autres sont donc coté à 1, tandis qu'il est noté à 2.

Tableau 36 : Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère l'acceptability

	BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
	HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Affordability	1	1	2	1	1	1
TOTAL (= $\sum 2^x$)	2	2	4	2	2	2

CHAPITRE 5| BILANS & CONCLUSIONS



5.1| SOLUTIONS ENERGETIQUES A FAVORISER

A ce stade de l'étude, la caractérisation du territoire quasi-zéro-énergie autonome a été établie. On a choisi de faire face aux demandes annuelles d'énergie des bâtiments résidentiels et tertiaires de la Région Wallonne sur un cycle de transition énergétique de 32 ans. Les modélisations des scénarios de consommation et de production ont également été réalisées. Les Tableau 38 et Tableau 39 reprennent les résultats liés à l'efficacité, la proximité, la rentabilité, et l'équité sociale et environnementale des systèmes de consommation et de production du territoire Wallon, par scénario. C'est sur base de ces données qu'il est possible de comparer les différents indicateurs de résilience du territoire.

Ce chapitre est donc la dernière étape permettant de conclure à la solution énergétique à encourager pour permettre la transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie-autonome (TqZEA).

RETOUR SUR LES CRITERES DES 4A

En guise de rappel, le Tableau 37 reprend l'ensemble des caractéristiques liées aux critères des 4A des scénarios étudiés, et un classement de ces derniers.

Tableau 37 : Tableau récapitulatif de comparaison des scénarios de consommation/production vis-à-vis des 4A

	PEB		*BE*		*PEB+ZE*		*PASSIF*		*qZE*	
	HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Availability	-2		2		1+0		1		1+0	
	(-2)	(-2)	2	1	2	1	(-2)	(-2)	2	1
<i>total partiel</i>	0,5	0,5	8	6	7	5	2,25	2,25	7	5
Accessibility	(-2)		1		1		(-2)		1	
	(-2)	(-2)	1	1	1	2	(-2)	(-2)	1	1
<i>total partiel</i>	0,25	0,25	2	2	2	4	0,25	0,25	2	2
Affordability	(-2)		1		2		1		1	
	(-2)	(-2)	2	1	1+0	1	(-2)	(-2)	1	1
<i>total partiel</i>	0,5	0,5	6	4	7	6	2,25	2,25	4	4
Acceptability	(-2)		1		1		1		2	
	(-2)	(-2)	1	1	2	1	(-2)	(-2)	1	1
<i>total partiel</i>	0,5	0,5	4	4	6	4	2,25	2,25	6	6
TOTAL (= $\Sigma 2^*$)	1,75	1,75	20	16	22	19	7	7	19	17
CLASSEMENT	7ème	7ème	2ème	5ème	1 ^{er}	3ème	6ème	6ème	3ème	4ème

En bas du classement, on retrouve les scénarios *PEB* & *HYD* et *PEB* & *EOL*. Ils ont des cotes entre parenthèses puisque que l'exigence d'availability liée à la consommation n'a pas été respectée. Les scénarios, *PASSIF* & *HYD*, et *PASSIF* & *EOL* ont quant à eux été mis de côté pour la suite de la simulation de production car lors de l'étape de première comparaison (étape |10| de la méthodologie de transition vers un TqZEA) ils se sont classés derniers de la liste (sans compter le *PEB* & *HYD* et le *PEB* & *EOL*). Ils subissent donc des notes de -2 en réponse aux indicateurs de résilience liés aux systèmes de production. Les scénarios *qZE* & *HYD*, et *qZE* & *EOL* ont obtenus de bons résultats dans l'ensemble des critères, notamment en terme de réduction acceptable de la consommation en énergie finale du bâtiment en 2050, mais ne réalisent pas de score optimal dans un critère en particulier.

Pour ce qui concerne les autres scénarios, il serait tout à fait envisageable de sélectionner une solution de transition sur base d'un seul des critères des 4A. Le scénario ***BE*&*HYD*** est considéré comme **le plus efficace**. Ses avantages se fondent sur le fait que les exigences de performances énergétiques du bati neuf et rénové sont relativement faibles pour un taux de rénovation raisonnable, et que le système de production d'énergie du territoire est majoritairement composé de ressources fournissant de l'électricité en continu. Le scénario ***PEB+ZE*&*EOL*** est mesuré comme **le plus accessible**. Ses atouts résident dans le fait que l'exigence zéro-énergie sur les bâtiments neufs obligent à la construction de beaucoup plus de surface de panneaux photovoltaïques, et que les taux élevés de renouvellement du parc bati génèrent une plus grande superficie de bâtiments rénovés et neufs sur lesquels placer ces PV. De plus il a été mesuré que le scénario de production ***EOL*** fournit plus d'électricité que le ***HYD***. La part de production dans la consommation finale est dès lors la plus importante de tous les scénarios.

En tenant compte de l'ensemble des critères des 4A, la solution énergétique la plus résiliente et durable est obtenue par le scénario ***PEB+ZE*&*HYD***. C'est le scénario globalement considéré comme **le plus rentable et acceptable** du territoire Wallon. Il se classe par ailleurs 2^{ème} du point de vue de l'accessibilité. L'atout principal de ce scénario se situe sur l'exigence PEB de performance énergétique du bati rénové qui génère un cout moyen de rénovation plus faible et qui permet un investissement financier initial moindre pour la rénovation. De plus, le développement de centrale hydroélectrique associées à une grande part de panneaux photovoltaïques (due à l'exigence ZE des bâtiments neufs, et au taux de rénovation élevé) permet de fournir une quantité d'électricité acceptable plus vaste que dans le cas des autres scénarios.

On ressort de cette simulation des scénarios de consommation et de production d'énergie que l'exigence de performance zéro-énergie des bâtiments neufs et rénovés, associée à un système de production d'énergie en continu permet la meilleure transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome. On note également que la meilleure solution pour arriver à ce territoire n'est pas nécessairement la plus efficace, ni celle qui permet la plus grande part d'énergie dans la consommation finale.

Tableau 38 : Tableau récapitulatif des résultats de la réhabilitation du parc immobilier Wallon, par scénario

			PEB	*BE*	*PEB+ZE*	*PASSIF*	*qZE*
Taux de rénovation	%		18,9	3,6	4,5	2	1,4
Consommation en énergie finale des bâtiments en 2050 - $Q_{b,i}$	TWh		35,05	32,49	32,56	32,54	32,52
Taux de réduction de la consommation calculé - $\Gamma_{avail}^{rédu}$	%		24,85	30,34	30,18	30,23	30,27
Effectif de logements rénovés en 2050	10 ³ log		1581,03	1110,64	1236,29	770,10	588,79
Part de logements rénovés en 2050	% du total		85,45	60,02	66,82	41,62	31,82
Superficie de bâtiments tertiaires rénovés en 2050	km ²		55,67	38,86	43,28	29,91	20,57
Part de surfaces tertiaires rénovées en 2050	% du total		71,93	50,67	56,36	35,21	26,95
Prix relatif de rénovation des bâtiments	Rési.	%	100	200	100	400	400
	Terti.	%	75	150	75	300	300
Cout moyen de rénovation du parc bati - Γ_{afford}^{renov}	G€		47,310	66,394	36,956	92,055	70,377
Indice de vitesse d'évolution de la consommation finale en énergie du bâtiment (=pente moyenne) - Γ_{accept}^{pente}	-		1782218,15	581,78	555,80	406,92	370,96

Tableau 39: Tableau récapitulatif des résultats de la réhabilitation du parc immobilier et la transformation du parc énergétique Wallon, par scénario

		BE		*PEB+ZE*		*qZE*	
		HYD	*EOL*	*HYD*	*EOL*	*HYD*	*EOL*
Production d'énergie en 2050 - $Q_{p,i}$	TWh	8,886	11,053	11,676	13,843	9,357	11,524
Production nominale en 2050	TWh	66,847	77,168	93,925	104,247	71,424	81,745
Facteur de disponibilité - Γ_{avail}^{dispo}	%/an	36,47	24,84	36,47	24,84	36,47	24,84
Facteur d'allocation des ressources - Γ_{access}^{pc}	%	27,35	34,02	35,86	42,51	28,77	35,44
Effectif de centrales hydro.	site	82	0	82	0	82	0
Nombre d'éoliennes	unité	0	825	0	825	0	825
Superficie de PV	km ²	47,49		96,83		75,25	
Cout moyen de production - Γ_{afford}^{prod}	G€	16,568	17,027	24,914	25,373	17,979	18,438
→ Cout total ($\Gamma_{afford}^{renov} + \Gamma_{afford}^{prod}$)	G€	130,452	83,421	61,87	62,329	88,356	88,815
Taux d'énergie acceptable - Γ_{accept}^{prod}	%/an	93,64	88,87	94,13	89,97	92,72	87,83

SCENARIO *PEB+ZE* & *HYD*

À l'horizon 2050, une transition énergétique du territoire Wallon vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome pourrait donc s'opérer comme suivant le scénario *PEB+ZE* & *HYD*. Ses évolutions de consommation en énergie finale des bâtiments et de production finale d'électricité sont présentées Fig. 27 page 96.

Pour arriver à un TqZEA, le parc immobilier existant en 2018 devrait être rénové de minimum 4,5% par an suivant une réglementation PEB adaptée. Les bâtiments subiraient ainsi une réduction de $\pm 30\%$ de leur consommation spécifique en énergie afin d'arriver à une performance de 115 [kWh/m².an] pour les constructions résidentielles, et 130 [kWh/m².an] pour les bâtiments du secteur tertiaire. Dans le même temps, le parc bâti s'agrandirait globalement de l'ordre de 1% par an, tout en démolissant une petite partie du stock de bâtiments existant qui n'auraient pas été rénovés sur l'année ($\approx 0,075\%$ /an en moins). Les nouveaux bâtiments construits, qu'ils soient résidentiels ou tertiaires, devraient respecter la réglementation zéro-énergie. Soit avoir une consommation spécifique en énergie inférieure à 45 [kWh/m².an] et produire un minimum d'énergie provenant de ressources renouvelables de sorte que la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux, l'eau chaude sanitaire et les auxiliaires électriques soit totalement compensée par l'énergie renouvelable produite sur place.

La solution permettant de répondre à la demande électrique des bâtiments résidentiels et tertiaires s'effectuerait par l'utilisation de centrales hydroélectrique à grande échelle et de panneaux photovoltaïque (PV) décentralisés. Bien que les fluctuations annuelles de la production hydraulique soient importantes, son intégration au mix énergétique assurerait une meilleure durée de fonctionnement de la production d'électricité que les systèmes d'énergie éolienne. Cette disponibilité serait d'ailleurs accrue si ces systèmes de production étaient associés à la centrale de transfert d'énergie par pompage de Coo-Trois-Pont. L'utilisation des PV permettrait d'exploiter l'énergie solaire aux endroits les mieux exposés et les mieux acceptés. Ils serviraient en outre de fournisseur d'électricité aux bâtiments devant répondre à l'exigence zéro-énergie. A l'horizon 2050, l'évolution acceptable et rentable de la consommation en énergie finale permettrait une diminution de 30,18%. On passerait d'une consommation de 46,635[TWh] à 32,561[TWh] en 32ans, la durée de fonctionnement du système autorisant le territoire à subvenir à ses besoins d'approvisionnement sécuritaire (36,47%/an supérieurs aux 24,66%/an requis) tout au long du cycle de transition. De plus, en considérant la part d'électricité comme étant le tiers

de la consommation des bâtiments résidentiels et tertiaires, le mix hydroélectrique/photovoltaïque rendrait possible le stockage de 0,605[TWh] des 11,676[TWh] produits sur l'année.

On conclut du parcours de ce scénario spéculatif de réhabilitation du parc bâti et de transformation du parc énergétique que par rapport à la situation Wallonne actuelle, l'évolution que l'on perçoit le mieux dans cette stratégie de transition énergétique semble être la recherche d'une réduction plus poussée des consommations d'énergie des bâtiments à rénover (et à construire en second plan) par l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâti. Néanmoins on estime que cette transition devrait être largement mise en œuvre dès 2020 si le territoire Wallon veut répondre aux défis du changement climatique, de la sécurité d'approvisionnement, de l'indépendance énergétique et de l'abaissement de l'exploitation des ressources fossiles de la planète.

STRATEGIE VERS UN TERRITOIRE ZERO ENERGIE - ANNEE 2050			
SCENARIO DE REHABILITATION ET TRANSFORMATION DU TERRITOIRE		PERFORMANCES ENERGETIQUES DU TERRITOIRE	
Taux de rénovation du parc immobilier:	4,50% *PEB+ZE*	Consommation totale d'énergie finale:	32,561 TWh/an
Taux de production d'ER:	*HYD*	Production nette totale d'électricité:	11,676 TWh/an
	Prod. hyd. de +2,5 site(s)/an Prod. éol. de +0 unité(s)/an Prod. PV de 70% Couverture de toit de 30%	Estimation du stockage (si surplus):	0,605 TWh/an
INDICATEURS SPECIFIQUES			
Territoire zéro-énergie:	Autonome TqZE	Affordability	$I_{renov\ afford}$ 36,956 milliards €
Availability:	$I_{rédu\ avail}$ 30,18 %		$I_{prod\ afford}$ 24,914 milliards €
	$I_{dispo\ avail}$ 36,47 %/an	Acceptability:	$I_{pente\ accept}$ 555,8 -
Accessibility:	$I_{pc\ access}$ 35,86 %		$I_{prod\ accept}$ 94,13 %/an

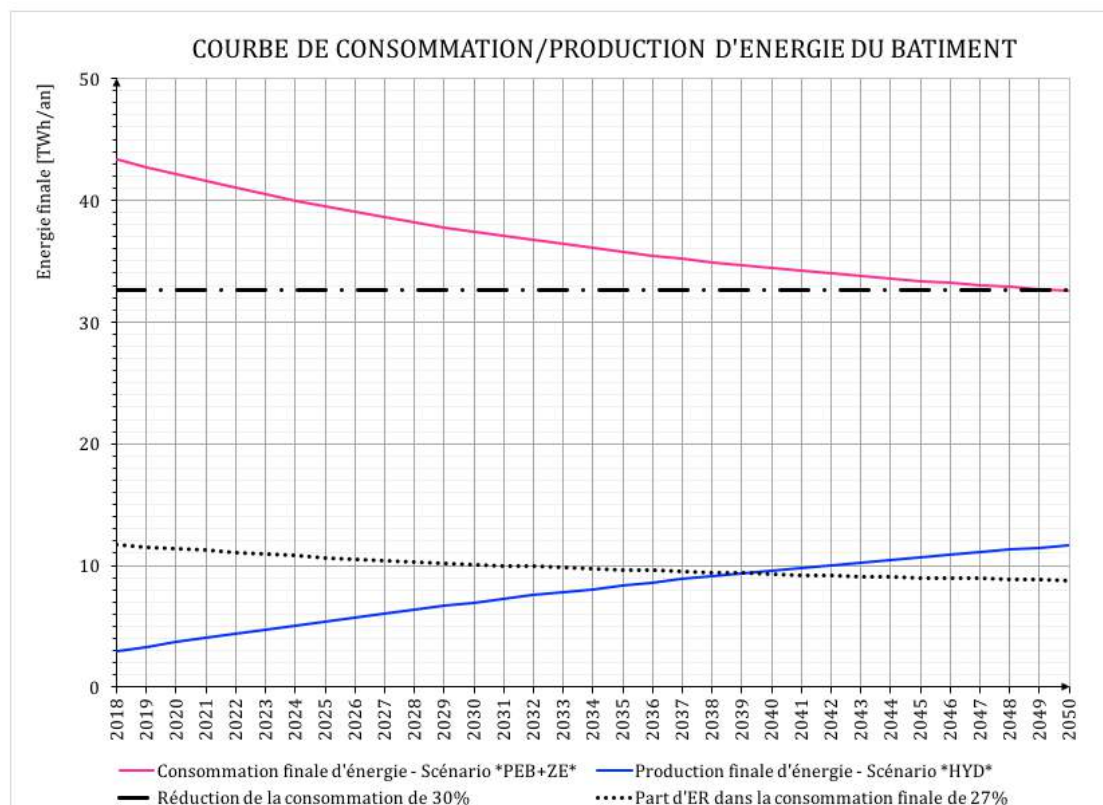


Fig. 27: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – Résultats de stratégie de transition vers un TqZEA

5.2| INDICATEURS DE RESILIENCE

La prise en considération des effets du réchauffement climatique a conduit ces dernières années à un développement majeur du secteur des énergies renouvelables. Qu'ils s'agissent d'analyses technico-économiques, environnementales ou sociétales, les études se basent en générale sur des indicateurs d'efficacité, de rentabilité, etc. pour appuyer leurs résultats. Trois des sept indicateurs présentés dans le cadre de ce travail se réfèrent à des indicateurs communément utilisés dans le domaine scientifique. Le taux de réduction de la consommation calculé ($\Gamma_{avail}^{rédu}$), le facteur d'allocation des ressources (Γ_{access}^{pc}), et le facteur de disponibilité (Γ_{avail}^{dispo}).

Grace à l'implémentation de la méthodologie dans l'outil de calcul, il a été possible de valider les deux premiers indicateurs cités, mais d'observer des incohérences de valeurs concernant le facteur de disponibilité lorsqu'il est établi comme un facteur de charge sur un cycle d'un an. De manière générale, le facteur de charge d'un équipement (FC_i) ou d'un système est une mesure d'efficacité que l'on obtient en divisant l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie produite si le système ou l'équipement avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période. Il s'exprime par $FC_i = \frac{Q_{p,i}}{8760 \left(\frac{Q_{p,i}^{hydro}}{d_{hyd}} + \frac{Q_{p,i}^{eolien}}{d_{eol}} + \frac{Q_{p,i}^{pv}}{d_{pv}} + \frac{Q_p^E}{d_E} \right)}$ dans ce cas d'étude.

Cette mesure est un indice usuel dans le domaine de l'énergie. Cependant, si on le considère tel quel dans le calcul de disponibilité des scénarios du TqZEA, on se rend compte que son évolution n'est pas adaptée à la réalité des conditions imposées dans ce travail pour un territoire résilient et durable. En effet, en prenant comme exemple l'évolution du scénario *qZE*&*EOL* dans les conditions de performances citées plus tôt, on observe (Tableau 40) que, sur un cycle de 32 ans, le facteur de charge décroît, alors qu'il devrait être constant. Le seul fait de l'augmentation de la production d'électricité (jusqu'à une certaine valeur) cause une diminution de la disponibilité des systèmes énergétiques. Au-delà de cette valeur, l'allure de la courbe du facteur de charge augmente puis est constante et s'approche de la mesure de disponibilité qu'elle devrait réellement avoir.

Tableau 40 : Comparaison entre indicateur de disponibilité et facteur de charge

	2020	2030	2040	2050
Scénario *qZE*&*EOL* ($\Gamma_{avail}^{dispo}=24,84\%$)	16,36%	14,12%	13,41%	13,10

La comparaison entre ce facteur de charge et le l'indicateur de disponibilité montre que l'efficacité du facteur de charge est améliorée si elle est complétée par la notion de durabilité à très long terme proposée dans ce travail.

Les quatre autres indicateurs, que sont le cout moyen de rénovation du parc bati (Γ_{afford}^{renov}), le cout moyen de production (Γ_{afford}^{prod}), l'indice de vitesse d'évolution de la consommation finale en énergie du bâtiment (Γ_{accept}^{penet}), et le taux d'énergie acceptable (Γ_{accept}^{prod}) permettent d'obtenir des résultats cohérents et aident de manière relativement efficace à la comparaison des différents scénarios proposés.

Les hypothèses posées pour l'ensemble des indicateurs de résilience d'un territoire-quasi-zéro-énergie semblent donc pertinentes et à valoriser puisque les résultats de la simulation du territoire montrent la capacité de chaque indicateur à classer les scénarios en fonction des critères des 4A. Cependant, d'autres tests doivent être effectués afin d'améliorer la comparaison et la méthodologie pour l'intégration de nouveaux scénarios de consommation et de production d'énergie.

5.3| CONCLUSION

Ce travail s'attèle à la recherche de solutions innovantes vers un mode d'aménagement urbain plus soutenable pour la planète, soucieux du bien-être de la population, respectueux de son environnement, et adapté aux générations futures. Il se veut ainsi transversal en intégrant les différentes dimensions d'un développement durable : l'environnement, la société, et l'économie. Les résultats liés à la création de l'outil de calcul et son application sur cas réel montrent le potentiel de la méthodologie de transition vers un territoire-zéro-énergie mise en place, et permettent de tirer différentes conclusions.

Tout d'abord, un des grands enseignements de cette étude est qu'un nouveau modèle énergétique wallon doit voir le jour afin de participer à la transition vers un territoire-zéro-énergie autonome à l'horizon 2050. On ressort de ce travail que l'exigence de performance énergétique des bâtiments à rénover, qui impacte sur l'efficacité, la rentabilité et l'acceptation de la stratégie énergétique de transition, est le facteur d'importance qui se dégage singulièrement. Les défis attachés à la transition durable doivent donc s'articuler autour de la baisse de la demande d'énergie finale des bâtiments à rénover. On ressort également que l'évolution vers un système énergétique fondé exclusivement sur les énergies renouvelables implique des améliorations de l'efficacité énergétique des systèmes de production en terme de disponibilité, mais aussi de puissance. La variation des taux de production des installations ayant une influence moins perceptible.

En appliquant des exigences raisonnables de l'ordre de la réglementation PEB aux bâtiments à rénover et des exigences zéro-énergie aux nouveaux bâtiments, en intégrant 100% d'énergie renouvelable au bilan de production, et en répondant aux 4 critères présentés (availability, accessibility, affordability, acceptability), le territoire wallon assimile l'ensemble des préoccupations d'un développement zéro-énergie soutenable.

Ensuite, on dégage de cette étude que l'outil d'aide à la conception suit une démarche de justice sociale de la problématique grâce à la mise en place d'un formulaire simple, utilisable sur n'importe quelle plateforme pour autant que l'on sache exploiter un logiciel tableur, qui intègre des données d'entrées aisément trouvable dans la littérature, et qui permet de cadrer l'étude de transition énergétique d'un territoire.

Enfin, cette méthodologie vise à être applicable à tous les territoires. Elle présente différents résultats qui touchent aux informations énergétiques, climatiques, démographiques, et urbaines du cas d'étude (taux de réduction de la consommation, facteur de disponibilité, facteur d'allocation des ressources, cout moyen de production, cout moyen de rénovation du parc bat, indice d'évolution de la consommation finale, et taux d'énergie acceptable), et permet ainsi de comparer assez pertinemment les différents enjeux liés au développement d'un territoire. La méthodologie développée dans ce mémoire peut donc être adaptée ou transposée pour de nombreuses autres régions urbaines en Europe et même plus loin.

Il est important de rattacher les résultats à une représentation simplifiée du monde réel. Néanmoins, plus ce modèle sera amélioré par la pratique, complété par des experts spécialistes dans leurs thématiques respectives, plus il pourra venir en aide aux acteurs publics et privés afin d'augmenter l'objectivité des décisions lors de la conception de plans stratégiques de transition énergétiques à l'échelle d'un territoire.

On conclut que la caractérisation automatisée de l'évolution d'un territoire est possible grâce à la méthodologie proposée. Elle est soutenue par un ensemble d'indicateurs basés sur des paramètres d'efficacité, de proximité, de rentabilité, et d'acceptabilité qui assurent la résilience et la durabilité du territoire.

Le Tableau 41 présente les bénéfices attendus d'une politique favorisant une stratégie vers un objectif zéro-énergie en tenant compte des 4A.

Tableau 41: Récapitulatif de la Stratégie de transition vers un territoire-quasi-zéro-énergie autonome

	Stratégie TqZEA	L'humain	L'environnement	La prospérité
Availability	■ Influence des facteurs de renouvellement du parc bâti dans la réduction de consommation d'énergie ; ■ Utilisation d'un plus grand nombre de sources d'énergie locales et renouvelables.	■ Réduction de la dépendance énergétique du territoire ; ■ Réduction des risques de black-out et/ou conflits internationaux pour l'énergie.	■ Apports en énergies renouvelables respectueuses de l'environnement.	■ Progression vers une autonomie en matière d'énergie.
Accessibility	■ Equilibre entre centralisation et décentralisation des sources d'énergie pour profiter des avantages des 2 modes d'approvisionnement ; ■ Influence des densités bâties sur les sources d'énergie fournies.	■ Accessibilité à l'énergie au plus grand nombre. Même sur des sites isolés.	■ Amélioration du cadre bâti par l'intégration réfléchie dans le territoire ; ■ Respect des zones naturelles.	■ Amélioration de l'anticipation et de la flexibilité par rapport aux évolutions à moyen terme.
Affordability	■ Prises-en compte des facteurs technico-économiques des processus de réduction de la consommation des bâtiments et de production d'ER ; ■ Prise en compte des réseaux et installations existants.	■ Equité sociale par la lutte contre la précarité énergétique.	■ Diminution des coûts dus aux impacts environnementaux des énergies fossiles (changements climatiques, GES, etc.) ; ■ Respect du contexte énergétique existant.	■ Réduction des coûts énergétiques collectifs et individuels à long terme.
Acceptability	■ Prise en compte des aspirations et comportements des divers acteurs concernés (usagers, autorités locales, etc.).	■ Progression sur le bien-être de la population à long terme.	■ Augmentation de la conscience écologique des habitants.	■ Optimisation de la gestion de l'énergie collective et individuelle sur site.

5.4| PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Les différents scénarios et analyses présentés dans cette étude apportent des réponses à certaines questions mais en soulèvent d'autres qui dépassent le champ initial de l'étude.

La période de transition sur laquelle est basé ce travail s'étend sur une année puisque l'équilibre production/consommation sur un territoire est rarement réaliste semestriellement en climats saisonniers. Néanmoins, les courbes mensuelles, voir journalières, de consommations et de productions mettent en évidence la différence qui existe tout au long de l'année entre celles-ci. Le recours à des solutions de production intermittentes d'électricité constitue une source de fragilité dictée par les aléas météorologiques, et indépendante de la consommation. L'irrégularité des systèmes pose inévitablement question. Un enjeu majeur de la transition énergétique est donc la gestion des situations de surproduction d'électricité en période de faible consommation, et des moyens de production sur lesquels on ne peut pas compter en période de pointe. Cet enjeu est gérable par l'introduction de **systèmes de stockage**. (Jacquelin, et al., 2012)

Le problème est qu'actuellement, il est difficile de stocker directement l'électricité. Il faut dès lors la transformer en une autre forme d'énergie plus facilement stockable : gravitaire, thermodynamique, électrochimique, ou thermique. De plus, les dispositifs de stockage d'énergie actuels sont très limités à l'échelle du territoire. Des réflexions sont cependant menées sur de nouveaux types de stockage à grande échelle tels que les STEP marines.

Le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique. Dans le domaine économique, en particulier lors des pointes de consommation, le stockage de l'énergie peut permettre de réguler les fluctuations des prix indexés sur les variations de l'offre et de la demande. Le stockage est aussi un moyen de limiter les pertes lors d'une surproduction et donc de réduire la consommation globale d'énergie. Ce procédé est ainsi un élément clé à intégrer dans une méthodologie de transition vers un territoire-zéro-énergie plus autonome.

La stratégie de transition construite dans ce travail est basée sur la mise en place de scénarios de consommations pour les besoins de chaleur (chauffage, eau chaude sanitaire), de climatisation, et d'électricité (éclairage, ventilation, appareils électriques, etc.) des secteurs résidentiel et tertiaire, et sur la restriction du transfert de l'énergie produite en dehors du territoire autonome. Ces hypothèses ont été élaborées dans les limites de ce travail de fin d'études. Cependant, intégrer des éléments tels que la **demande de transport** des personnes et des biens, les consommations des **secteurs industriels et agricoles**, le besoin d'**éclairage public**, etc. dans le calcul des besoins bruts ne peut que rendre plus réaliste les scénarios prospectifs de consommation d'un territoire. Il serait en outre intéressant de rendre les scénarios prospectifs plus dynamique, par exemple grâce à l'ajout de la variable de **croissance économique** pour faire évoluer plus plausiblement les surfaces de bâtiments tertiaires en fonction de l'évolution de l'emploi. On pense aussi à l'intégration de **ressources énergétiques produisant de la chaleur** ou celles produites en dehors des limites du territoire. L'indicateur de rentabilité dépend également de l'éventuel surplus d'énergie qui pourrait être produit durant le cycle de transition. Dans la mesure où des systèmes de stockage sont envisagés, ces **sources d'énergie off-site** permettraient de comptabiliser dans le bilan, les possibles retours sur investissement associés à la production d'énergie du territoire.

La poursuite de la recherche dans ces domaines, et bien d'autres, permet de mieux estimer l'évolution d'un territoire, et amène ainsi à une meilleure compréhension de la stratégie de transition à mettre en place pour parvenir à un territoire-zéro-énergie durable.

SOURCES

- ADEME, 2018. Production d'électricité : Énergies renouvelables électriques [WWW Document]. URL: <https://www.ademe.fr> (accessed 30.7.18).
- APERe, 2018. Observatoire photovoltaïque [WWW Document]. APERe asbl. URL: <http://www.apere.org/fr/observatoire-photovoltaïque> (accessed 30.7.18).
- APERe, 2017. Eolien : 42 MW installés en Wallonie en 2016 [WWW Document]. URL: http://www.apere.org/sites/default/files/images/observatoire/170119_CP_APERe_stat_eolien_2016_final.pdf (accessed 30.7.18).
- Boulanger, P.-M., Bréchet, T., Henry, A., Marenne, Y., Pichault, F., Vanderstraeten, P., Meessen, J., Vermeulen, P., 2015. Etude de prospective : "Transition énergétique" (Etude pour l'Institut Wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique. No. mars 2015). Région Wallonne.
- CDE, 2011. Énergies renouvelables [WWW Document]. Connaissance des Énergies. URL: <https://www.connaissancedesenergies.org/classement/energies-renouvelables> (accessed 22.7.18).
- Deboosere, P., Lesthaeghe, R., Surkyn, J., Willaert, D., Boulanger, P.-M., Lambert, A., Lohlé-Tart, L., 2009. Enquete Socio-économique 2001 - Monographies : Ménages et familles en Belgique (No. 4-2009), Direction générale Statistique et Information économique. Bruxelles.
- Devogelaer, D., Gusbin, D., 2017. Le paysage énergétique belge à l'horizon 2050 : Perspectives à politique inchangée. (Forecasts & Outlook No. Octobre 2017), Bureau fédéral du Plan. Analyses et prévisions économiques.
- Devogelaer, D., Gusbin, D., Duerinck, Y., Marenne, Y., Nijs, W., Orsini, M., Pairon, M., 2013. Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050.
- DGO4, 2018. Exigences PEB [WWW Document]. Site énergie du Service Public de Wallonie. URL: <https://energie.wallonie.be/fr/reglementation-wallonne-sur-la-peb.html?IDC=7224> (accessed 12.4.18).
- DGO4, 2016. Guide PEB 2015 [WWW Document]. Site énergie du Service Public de Wallonie. URL: <https://energie.wallonie.be/fr/02-02-nature-des-travaux.html?IDD=113482&IDC=9089> (accessed 29.4.18).
- DGO4, 2015. Destination et prescriptions générales des zones, tracés de réseaux d'infrastructures principales, Code wallon de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme et du patrimoine (CWATUP).
- DGO4, AWAC, 2018. Plan Air Climat Energie 2030: deuxième phase de consultation! [WWW Document]. Site énergie du Service Public de Wallonie. URL: <https://energie.wallonie.be/fr/plan-air-climat-energie-2030-deuxieme-phase-de-consultation.html?IDC=6238&IDD=127763> (accessed 1.5.18).
- Énergie+, 2016. Les degrés-jours [WWW Document]. URL: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15567#c9705> (accessed 20.4.18).
- Ernst, F., Hege, P., 2012. Autonomie énergétique d'un territoire, est-ce réaliste? Eco conseil, pour un développement durable.
- Eurostat, 2018. Degree of urbanisation classification - 2011 revision - Statistics Explained [WWW Document]. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Degree_of_urbanisation_classification_-_2011_revision&oldid=213216#Degree_of_urbanisation_classification (accessed 23.7.18).
- Favennec, J.-P., Mathieu, Y., 2014. Atlas mondial des énergies. Ressources, consommation et scénarios d'avenir., Armand Colin Atlas. ed, ifp Énergies nouvelles. Dunod, Paris.

- Gangat, Y., David, D., Payet, D., Courdier, R., 2009. Modéliser et simuler l'aménagement énergétique d'un territoire par les systèmes multi-agents, in: *Convergence Des Réseaux, de l'Informatique, et Du Multimédia Pour Les E-Services (CRIMES)*. Saint Denis de La Réunion, France, p. 15.
- George, P., Verger, F., 2013. *Dictionnaire de la géographie*, Quadrige. Presses Universitaires de France, Paris.
- Greenpeace, WFF, BBL, IEW, 2015. Les limites de la biomasse en Belgique. Le non-sens économique et environnemental des nouvelles grandes centrales à biomasse en Flandre et en Wallonie.
- Huart, M., D'hernoncourt, J., 2016. Hydroélectricité: Des avancées technologiques appliquées en Belgique | Renouvelle [WWW Document]. URL: <http://www.renouvelle.be/fr/technologies/hydroelectricite-des-avancees-technologiques-appliquees-en-belgique> (accessed 1.8.18).
- ICEDD, 2016. Bilan énergétique de la Wallonie 2014. Bilan de production primaire et récupération (y compris cogénération et renouvelables). Bilan de transformation. (No. Février 2016 (version juin 2016)).
- ICEDD, 2014a. Bilan énergétique de la Région de Bruxelles-Capitale 2012 (Publication), Etat de l'environnement. Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable, Bruxelles.
- ICEDD, 2014b. Bilan énergétique de la Wallonie 2012 - Bilan de l'industrie et bilan global (No. Novembre 2014 V2). Belgique.
- ICEDD, 2014c. Bilan secteur domestique et équivalents 2012 (No. Octobre 2014 V2). Belgique.
- Ipsos Belgium, 2010. Perception de l'énergie éolienne en Wallonie [WWW Document]. URL: http://ecolosoignies.be/pdfs/Ipsos_Resume.pdf
- IWEPS, 2016. Degré de densité de la population des communes belges (méthode DG Regio). Iweps.
- Jacquelin, L.-M., Lacroix, O., Bordeleau, M., 2012. Le stockage d'énergie. Enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation.
- JCV, 2018. Précarité énergétique en Belgique: un ménage sur cinq a du mal à se chauffer. RTBF Info.
- Kergueris, J., Saunier, C., 2005. La hausse des prix du pétrole : une fatalité ou le retour du politique (Annexe au procès-verbal de la séance du 24 novembre 2005 No. 105 (2005-2006)).
- Leonardi, P., Attout, X., 2015. «Le parc immobilier augmente, la rénovation aussi». *Le Soir*.
- Marique, A.-F., Reiter, S., 2014. A simplified framework to assess the feasibility of zero-energy at the neighbourhood/community scale. *Energy and Buildings* 82, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.006>
- Marique, A.-F., Reiter, S., 2012. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. *Environmental Impact Assessment Review* 33, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.09.001>
- Marszal, A.J., Heiselberg, P., Bourrelle, J.S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A., 2011. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings* 43, 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>
- Merlin, P., Choay, F., 2015. *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, 4th ed, Dictionnaires Quadrige. Presses Universitaires de France, Paris.
- Monitoring des Quartiers, 2016. Nombre de ménages privés [WWW Document]. URL: <https://monitoringdesquartiers.brussels/indicators/variable/nombre-total-de-menages-prives-2/> (accessed 20.4.18).

- Nihart, R., 2015. Cours de Sustainable Energy : Energies renouvelables en Belgique.
- Ouammi, A., Ghigliotti, V., Robba, M., Mimet, A., Sacile, R., 2012. A decision support system for the optimal exploitation of wind energy on regional scale. *Renewable Energy* 37, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.027>
- Pacot, P.-E., Reiter, S., 2012. Evolution prospective des degrés-jours en Région Wallonne.
- Penders, M., 2013. Rénovation énergétique des ilots : Stratégie d'intégration des énergies renouvelables dans le but de tendre vers l'objectif zéro-énergie (TFE). Université de Liège.
- Peterson, K., Torcellini, P., Grant, R., 2015. A common Definition for Zero Energy Buildings (No. September 2015). the U.S. Department of Energy and the National Institute of Building Sciences.
- PMP asbl, 2017. Guide tertiaire : Guide d'aide à la conception de bâtiments tertiaires à haute performance énergétique (No. 1.00-2017). Plate-forme Maison Passive a.s.b.l, Belgique.
- Praene, J.P., David, M., Sinama, F., Morau, D., Marc, O., 2012. Renewable energy: Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 426–442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.007>
- Quioc, G., Dugua, P.-Y., 2008. Le troisième choc pétrolier. *Le Figaro*.
- Reiter, S., 2017. Cartographie des besoins de chaleur pour la mise en oeuvre d'une unité de production d'énergie (UPE) pour les infrastructures publiques et d'un réseau de chaleur urbain dans le cadre du programme européen FEDER 2014-2020 "Charleroi District Créatif." Université de Liège.
- Reiter, S., Ghiezen, S., Pierson, C., 2014. Une mobilité résidentielle durable est-elle possible? Pratiques de déplacements, modèles urbains et choix de localisation de populations résidentes en Wallonie, in: Actes du Colloque international APERAU 2014 : « Villes à vivre : le quotidien métropolitain entre ancrage et mobilité ». Montréal, p. 21.
- Reiter, S., Marique, A.-F., 2012. Toward Low Energy Cities. *Journal of Industrial Ecology* 16, 829–838. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00533.x>
- Roger-Machart, J., Benassayag, J., Bornemann, B., Borot, D., Boulil, A., Brunetiere, J.-R., Derian, J.-C., Favennec, J.-P., Pare, C., Tardieu, B., Vesseron, P., 2013. Passer d'un modèle centralisé à un modèle décentralisé de l'énergie. Fondation Jean-Jaurès.
- Ruellan, G., 2016. Les problématiques de la rénovation du stock bâti dans la ville de demain : résultats d'une étude initiale en Belgique.
- Sharifi, A., Yamagata, Y., 2016. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 1654–1677. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.028>
- SPF Economie, 2018. Agence de pétrole-petroleum agentschap (APETRA) [WWW Document]. URL: <http://economie.fgov.be/fr/themes/energie/sources-denergie/petrole/agence-de-petrole-petroleum> (accessed 30.7.18).
- Statbel, 2018. Structure de la population | Direction générale Statistique - Statistics Belgium. [WWW Document]. URL: <http://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population> (accessed 23.7.18).
- The World Bank Group, 2018. Electric power transmission and distribution losses [WWW Document]. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2014&locations=BE&start=1960&type=shaded&view=chart> (accessed 27.2.18).

- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., Crawley, D., 2006. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. Presented at the 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.
- Travaux.com, 2018. Guide des prix rénovation 2018 [WWW Document]. URL: <https://www.travaux.com/guide-des-prix> (accessed 17.7.18).
- Vandenberghe, A., Van Loon, S., Isaac, C., 2013. Vade-mecum résidentiel : Guide d'aide à la conception de batiments à haute performance énergétique (No. 1.01-2013). Plateforme Maison Passive a.s.b.l, Belgique.
- Vandresse, M., 2017. Perspectives démographiques 2016-2060 - Population et ménages (Publication). Bureau fédéral du Plan.
- Vanon, R., 2017. Evaluation et scénarii d'améliorations de la consommation en énergie de huit quartiers wallons (Rapport de stage). LEMA, Université de Liège.
- Vera, I., Langlois, L., 2007. Energy indicators for sustainable development. Energy, Third Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 32, 875–882. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.08.006>
- WCED, 1987. Our common future, by World commission on environment and development. Oxford university, London.
- Wiliquet, C., 2014. La transition énergétique : vecteur d'émancipation ou de reproduction des inégalités sociales ? [WWW Document]. centreavec. URL: <http://www.centreavec.be/site/la-transition-energetique-vecteur-d-emanicipation-ou-de-reproduction-des-inegalites-sociales> (accessed 23.11.16).
- Yalçın-Riollet, M., Garabuau-Moussaoui, I., Szuba, M., 2014. Energy autonomy in Le Mené : A French case of grassroots innovation. Energy Policy 69, 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.016>

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1: Réserves courantes en hydrocarbures et en charbons, par pays	3
Fig. 2 :Taux de charge éolien belge 2017	4
Fig. 3: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif-formulaire territoire-zéro -énergie-autonome.....	5
Fig. 4 : Structure du travail	6
Fig. 5: Méthodologie de recherche appliquée : collecte et traitement des données	7
Fig. 6: Consommation d'énergie de la zone urbaine de Liège suivant les 6 scénarios de prévision.....	12
Fig. 7: Consommation finale d'énergie par secteur du BFP	18
Fig. 8: Limite du site, transfert d'énergie et type d'utilisation d'énergie incluse dans le bilan	26
Fig. 9: Représentation schématique des relations entre les 4A	53
Fig. 10: Géolocalisation de la Région Wallonne.....	55
Fig. 11: Pertes de transmission et de distribution d'énergie électrique	56
Fig. 12 : Degré de densité de population des communes wallonnes	57
Fig. 13 : Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – Notice d'emploi du formulaire....	67
Fig. 14: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données administratives.....	68
Fig. 15: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données démographiques et climatiques	68
Fig. 16: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données énergétiques et urbaines	69
Fig. 17: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – prix relatif de rénovation	71
Fig. 18: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif - données énergétiques liées à la production.....	72
Fig. 19: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif –scénarios & taux de rénovation....	73
Fig. 20: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif –scénarios & taux de production....	74
Fig. 21: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – Résultats de stratégie de transition vers un TqZEA	75
Fig. 22 : Exigences liées à la consommation spécifique des bâtiments suivant le scénario de réhabilitation	78
Fig. 23: Comparaison des scénarios de réhabilitation du parc bati résidentiel et tertiaire	80
Fig. 24: Estimation à long terme des scénarios de réhabilitation du parc bati résidentiel et tertiaire	81
Fig. 25: Modulation des variables du scénario "PEB*" de réhabilitation du parc bati résidentiel et tertiaire.....	82
Fig. 26: Comparaison des scénarios de réhabilitation du parc immobilier et de transformation du parc énergétique du territoire Wallon.....	87
Fig. 27: Capture d'écran de l'outil de calcul interactif – Résultats de stratégie de transition vers un TqZEA	96

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Matrice d'association des éléments constitutifs de la résilience énergétique urbaine	11
Tableau 2: Récapitulatif des systèmes de production à l'échelle d'un ilot.....	14
Tableau 3: Hypothèses démographiques pour la Belgique	17
Tableau 4: Glossaire spécifique au TqZEA.....	27
Tableau 5: Récapitulatif des performances énergétiques attendues par type de bâtiment et par scénario ($E_{sc,b}$).....	29
Tableau 6: Récapitulatif des scénarios de réhabilitation du parc immobilier du TqZEA	37
Tableau 7: Tableau récapitulatif des SER	39
Tableau 8: Récapitulatif des scénarios de transformation du parc énergétique du TqZEA.....	44
Tableau 9: Indicateurs de résilience du territoire-quasi-zéro-énergie autonome	52
Tableau 10: Exemple de bilan des scénarios vis à vis des 4A	53
Tableau 11: Consommation spécifique d'énergie d'un bâtiment de référence par secteur	58
Tableau 12: Consommation standardisée par type de logement en Région Wallonne	59
Tableau 13: Consommation standardisée par secteur d'activité en Région Wallonne	59
Tableau 14: Bilan de valorisation des sources d'énergie renouvelable en Wallonie	62
Tableau 15: Récapitulatif des performances des nouveaux systèmes de production d'énergie.....	62
Tableau 16: Règlementation liées à l'aménagement d'éoliennes sur un territoire.....	66
Tableau 17: Evolution des degrés-jours, des ménages et de la consommation d'énergie du bâtiment en Région Wallonne	77
Tableau 18: Données énergétiques et urbaines de réhabilitation du bati du TqZEA par scénario.....	79
Tableau 19: Données énergétiques de réhabilitation du bati du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'availability	81
Tableau 20: Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis de l'availability.....	83
Tableau 21: Données urbaine et de rentabilité du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'affordability	84
Tableau 22: Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis de l'affordability.....	84
Tableau 23: Données énergétique du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'acceptability	85
Tableau 24: Données énergétique du TqZEA par scénario vis-à-vis de l'acceptability – taux de renouvellement équivalent	85
Tableau 25: Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis de l'acceptability	85
Tableau 26: Bilan de la simulation liée à la consommation vis-à-vis des 4A	86
Tableau 27: Exigences liées à la production d'énergie suivant le scénario de transformation.....	87
Tableau 28: Données énergétiques de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'availability	88
Tableau 29: Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère d'availability.....	89

Tableau 30: Données énergétiques de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'accessibility	89
Tableau 31: Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère l'accessibility.....	90
Tableau 32: Données de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'affordability	90
Tableau 33: Estimation des couts moyens moyen de production par scénario, avec et sans PV.....	90
Tableau 34: Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère l'affordability.....	91
Tableau 35: Données de transformation du parc énergétique par scénario vis-à-vis de l'acceptability	91
Tableau 36: Bilan de la simulation liée à la production vis-à-vis du critère l'acceptability	91
Tableau 37: Tableau récapitulatif de comparaison des scénarios de consommation/production vis-à-vis des 4A.....	93
Tableau 38: Tableau récapitulatif des résultats de la réhabilitation du parc immobilier Wallon, par scénario	94
Tableau 39: Tableau récapitulatif des résultats de la réhabilitation du parc immobilier et la transformation du parc énergétique Wallon, par scénario	95
Tableau 40: Comparaison entre indicateur de disponibilité et facteur de charge	97
Tableau 41: Récapitulatif de la Stratégie de transition vers un territoire-quasi -zéro-énergie autonome	99

TABLE DES ANNEXES

Annexe A: Courbes de consommation en E_p du bâtiment.....	A.2
Taux de rénovation de 5%.....	A.2
Taux de rénovation de 4%.....	A.3
Taux de rénovation de 3%.....	A.4
Taux de rénovation de 2%.....	A.5
Taux de rénovation de 1%.....	A.6
Annexe B: Stratégie de transition vers un territoire-zéro-énergie autonome	A.7
Annexe C: Feuille de calcul Excel	A.8
Annexe D : Degré d'urbanisation	A.12
Classification des carreaux de 1 km ² selon leur appartenance à la maille de densité 2011	A.12
Typologie des communes belges selon le degré de densité de population	A.12
Annexe E : Systèmes de production existants.....	A.13
Centrale hydroélectrique de Namur	A.13
Centrale de transfert d'énergie par pompage	A.14

